

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И.Ленина»

Академия электротехнических наук Российской Федерации
Верхнее - Волжское отделение АТН РФ

Организована при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 13-08-06010-г)

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции

«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»

(XVII Бенардосовские чтения)

29-31 мая

II том
Теплоэнергетика

Иваново 2013

В II томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области тепловых и атомных электрических станций; промышленная теплоэнергетика; теплообмен в промышленных установках; систем управления и автоматизации; рассмотрены вопросы математических методов в технике и технологиях.

Редакционная коллегия:

Тарарыкин С.В., ректор, д.т.н., профессор, - председатель;

Тютиков В.В., проректор по НР, д.т.н., профессор;

Шуин В.А., каф АУЭС, д.т.н., профессор;

Казаков Ю.Б., зав. каф. ЭМ, д.т.н., профессор;

Полетаев В.А., зав. каф. ТАМ, д.т.н., профессор;

Воробьев В.Ф., зав. каф. ТЭВН, к.т.н., профессор;

Косяков С.В., зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор;

Колибаба В.И., зав. каф. ЭОиП; д.э.н., профессор;

Бушуев Е.Н., зав. каф. АТП, д.т.н., доцент;

Клюнина С.В., начальник УИУНЛ.

ISBN 978-5-89482-874-9
ISBN 978-5-89482-878-7 (Т. 2)

© ФГБОУВПО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина», 2013.

СЕКЦИЯ «ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Подсекция «ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

УДК 621.311.22

В.Д. БУРОВ к.т.н., заведующий кафедрой ТЭС;
Д.А. ДЯКИНА, магистр
(ФГБОУВПО «НИУ «МЭИ») г. Москва

Применение дожигания на ПГУ ТЭЦ с котлами-утилизаторами

Для нашей страны особенно актуальны вопросы, связанные с исследованием и повышением эффективности ПГУ ТЭЦ с котлами-утилизаторами (КУ). На данный момент одним из перспективных направлений применения на ПГУ ТЭЦ с КУ является дожигание дополнительного топлива в среде выхлопных газов ПГУ. Так как в выхлопных газах содержится достаточное количество кислорода (до 16%) и их температура довольно велика, что создает благоприятные условия для их использования в качестве малоактивного окислителя [1]. На ПГУ ТЭЦ дожигание топлива используется для увеличения мощности и отпуска тепла потребителям, а так же стабилизации параметров генерируемого пара.

На рис. 1 представлен один из вариантов тепловой схемы ПГУ ТЭЦ с двухконтурным котлом-утилизатором и дожиганием топлива перед перегревателем высокого давления.

Возможны различные варианты установки камер дожигания в котле-утилизаторе. В большинстве случаев устанавливается одна камера дожигания перед первой поверхностью нагрева КУ. Для ПГУ ТЭЦ актуально также включение второй камеры дожигания перед газовым подогревателем сетевой воды (ГПСВ), что позволяет повысить параметры сетевой воды, а так же отпускаемую тепловую мощность.

Важным вопросом при исследовании дожигания в ПГУ ТЭЦ с КУ является выбор режима конструкторского расчета тепловой схемы. Авторами выполнены конструкторские расчеты для схемы, представленной на рис 1. для условий центрального региона России. Точками конструкторского расчета являются температура наружного воздуха $-3,1^{\circ}\text{C}$ и температура -15°C . Температурный график теплосети был принят $120/70^{\circ}\text{C}$. КПД ПГУ ТЭЦ по выработке электроэнергии был рассчитан по физическому методу. Проточная часть паровой турбины спроектирована на максимальный расход пара в голову. Для всех вариантов температура после камеры дожигания (КД) была принята равной 600°C , в качестве топлива для КД использовался природный газ. Температурные напоры на горячем конце паропере-

гревателя в вариантах с дожиганием дополнительного топлива и без были приняты одинаковыми.

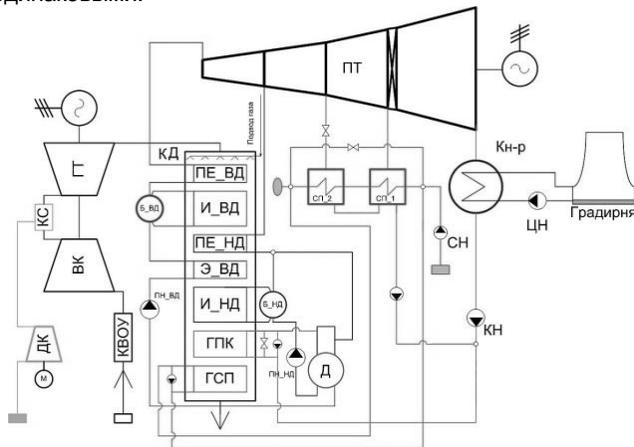


Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ ТЭЦ с КУ с дожиганием топлива.

КД-камера дожигания, ПЕ_НД, ПЕ_ВД – пароперегреватель низкого и высокого давления, И_НД, И_ВД – испаритель низкого и высокого давления, Э_НД, Э_ВД – экономайзер низкого и высокого давления, Б_НД, Б_ВД – барабан низкого и высокого давления, ГПК – газовый подогреватель конденсата, ГСП (ГПСВ) – газовый сетевой подогреватель. КВОУ – комплексное воздушное очистительное устройство, ВК – воздушный компрессор, КС – камера сгорания, ГТ – газовая турбина. ПТ – паровая турбина, Кн-р – конденсатор, СП_1, СП_2 – нижний и верхний сетевой подогреватель. ДК – дожимной топливный компрессор, Д – деаэрактор атмосферного давления, КН – конденсатный насос, СН – насос сетевой воды, ЦН – насос контура циркуляции оборотного водоснабжения, ПН_НД, ПН_ВД – питательный насос низкого и высокого давления.

В исследуемой схеме использовалась ГТУ производства Siemens (SGT-800), которая уже нашла широкое применение на российских ТЭЦ, а также имеет достаточно высокую температуру выхлопных газов. Содержание кислорода в уходящих газах ГТУ при температуре наружного воздуха $-3,1^{\circ}\text{C}$ составляет 13,06%, а при температуре -15°C 12,88 %, что является достаточным для организации дожигания дополнительного топлива.

Исследования выполнены с применением программного комплекса GT PRO и Termoflex производства фирмы Thermoflow. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1 Показатели эффективности вариантов ПГУ ТЭЦ

Температура наружного воздуха °С	-3,1	-15	-3,1	-15
Показатели ПГУ	Без дожигания		С дожиганием	
Электрическая мощность, МВт	70,248	72,034	72,260	74,054
КПД ПГУ по выработке электроэнергии нетто, $\eta_{э \text{ пгу}}$ %	50,52	49,66	48,88	47,82
Расход топлива на ПГУ, т/ч	10,82	11,28	11,502	12,043
Коэффициент использования теплоты топлива (КИТТ), %	72,3	73,09	76,98	77,90
Отпускаемая тепловая мощность, Гкал/ч	26046	29214	35708	40050

Результаты исследований свидетельствуют о возможности регулирования тепловых нагрузок и расширении диапазона регулирования тепловой нагрузки. Применение дожигания позволяет увеличить отпуск теплоты потребителю на 30% и выработку электроэнергии на 3-4%, при этом при более низких температурах наружного воздуха для ПГУ ТЭЦ на базе ГТУ SGT-800 можно разработать схему с более высоким $\eta_{э \text{ пгу}}$ и КИТТ.

Литература

1. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций/ Цанев С., Бузов В.Д., Ремезов А.Н. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.– 584 с.

УДК 621.311.22

В.Д. БУРОВ, к.т.н., зав. каф. ТЭС, ;
Г.В. СОЙКО, аспирант;
А.А. ДУДОЛИН, к.т.н. доцент;
С.М. КРАШЕНИННИКОВ, магистр
(НИУ МЭИ, г. Москва)

Влияние параметров пара на показатели тепловой экономичности конденсационной турбины ПГУ на базе ГТУ MS 6FA

Применение паровой технологии на ТЭС России сдерживается в связи с отсутствием отечественных надежных и экономичных ГТУ. В 2011 г. создано совместное предприятие (ОАО «Интер РАО», фирма GeneralElectric(GE) и ОАО «УК «ОДК»), которое планирует строительство завода в г. Рыбинск по производству ГТУ MS 6FA фирмы GE. Основные характеристики данной ГТУ приведены в табл. 1.

Экономичность парогазовых энергоблоков зависит от профиля теплового энергоблока и характеристик паротурбинной части [1]. В НИЛ «ГТУ и ПГУ ТЭС» НИИ «МЭИ» проведены оптимизационные исследо-

вания моноблочной ПГУ на базе ГТУ типа GE 6FA с паровым горизонтальным котлом-утилизатором двух давлений и конденсационной паровой турбиной (типа К).

Таблица 1. Основные характеристики ГТУ в условиях ISO 2314

Параметр	Величина
Мощность электрическая ГТУ, брутто, МВт	77,06
Расход выхлопных газов, кг/с	211,6
Температура выхлопных газов, °С	598,3
Расход топлива, кг/с	6,028

Исследования выполнены для температуры наружного воздуха равной +15 °С. Расчеты выполнены для условий уральского региона с использованием программного комплекса фирмы «Thermoflow».

Результаты исследования влияния параметров пара высокого и низкого давления на показатели ПГУ приведены соответственно на рис. 1 и 2.

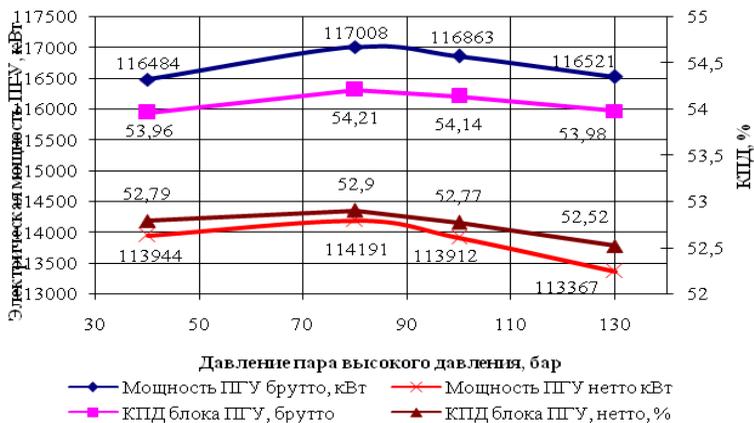


Рис. 1. Изменение основных показателей ПГУ от давления пара высокого давления.

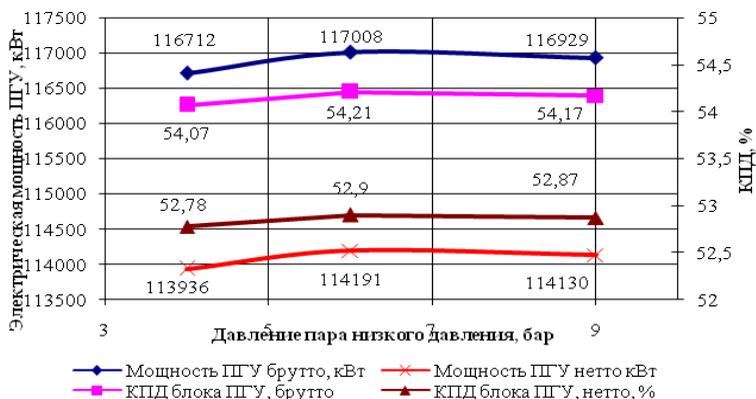


Рис 2. Изменение основных показателей ПГУ от давления пара низкого давления.

Полученные зависимости показывают, что при изменении давления пара высокого давления с 40 бар до 130 бар имеется зона максимума мощности и экономичности энергоблока.

Полученные зависимости показывают, что снижение давления пара низкого давления с 9 бар до 6 бар приводит к незначительному росту мощности паровой турбины и эффективности ПГУ, а дальнейшее снижение давления пара с 6 бар до 4 бар приводит к уменьшению мощности паровой турбины и снижению эффективности ПГУ.

Окончательный выбор параметров пара ПГУ на базе ГТУ MS 6FA должен производиться после технико-экономических исследований [2].

Литература

1. **Газотурбинные** энергетические установки: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д.Буров, А.С.Земцов, А.С. Осыка; под ред. С.В. Цанева. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 428 с., ил.
2. **Буров В.Д., Сойко Г.В., Ковалев Д.А.** К вопросу об оптимизации параметров мощных парогазовых энергоблоков / В.Д.Буров, Г.В.Сойко, Д.А. Ковалев. // Энергосбережение и водоподготовка, 2012. № 6. с.6-11.

Повышение энергоэффективности блока К-160-130 путем установки пароструйного термокомпрессора

Энергоблок К-160-130 снабжен промежуточным перегревом пара и, согласно изначальной принципиальной тепловой схеме турбоустановки, пар из первого после промежуточного перегрева отбора направляется во второй по ходу питательной воды подогреватель высокого давления (ПВД-7). При этом температура греющего пара превышает температуру питательной воды на выходе из ПВД-7 на 319 °С [1, стр.7], что является причиной значительного роста энтропии в процессе нагрева питательной воды в ПВД-7, а значит и роста энтропии в цикле паротурбинной установки.

По мере накопления опыта по ее эксплуатации высокая разность температур была устранена путем реконструкции, заключающейся в отказе от использования пара 2-го отбора и подключении ПВД-7 по греющему пару к паропроводам «холодного» промперегрева (рис. 1). Такое решение позволило повысить экономичность турбоустановки на 0,14% [1, стр. 11]. В результате такая реконструкция была проведена почти на всех энергоблоках К-160-130.

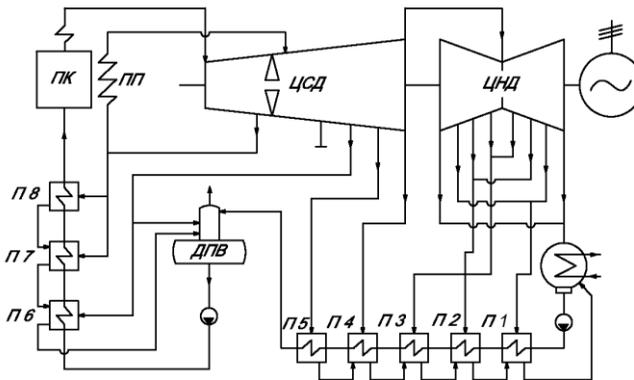


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-160-130 после реконструкции

Таким образом, существующая в настоящее время тепловая схема имеет всего две ступени подогрева питательной воды в подогревателях высокого давления: первая – в ПВД-6, вторая – в ПВД-7 и ПВД-8. В

результате этого температура насыщения в корпусах собственно-подогревателей ПВД-7 и ПВД-8 одинакова и значительно превышает среднюю температуру питательной воды в процессе нагрева в них, а так как передача основной части тепла от пара к питательной воде происходит именно при этой разности температур, рост энтропии в данном процессе оказывается очень значительным.

Разница температур на поверхностях нагрева по ходу теплоносителей не одинакова. Рассмотрим изменение температур теплоносителей по ходу процесса нагрева питательной воды в ПВД-7 и ПВД-8, для чего изобразим их в зависимости от величины теплового потока, передаваемого при этих температурах (рис. 2).

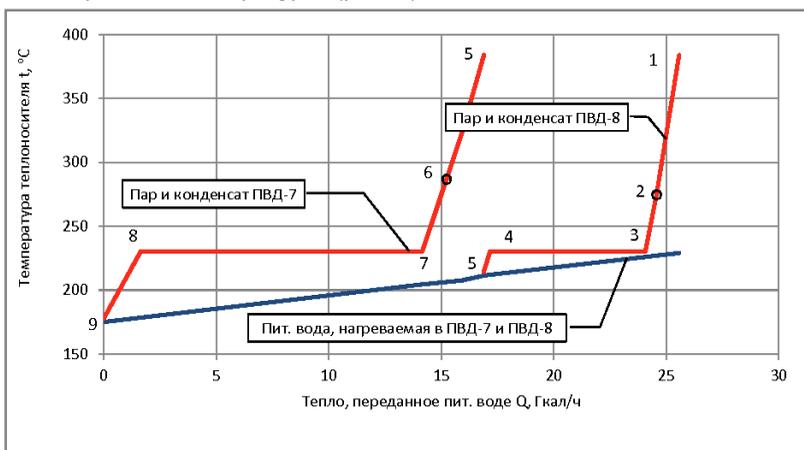


Рис. 2. Температуры греющего пара, конденсата греющего пара и питательной воды в ПВД-7 и ПВД-8 в зависимости от потока тепла, переданного питательной воде в процессе ее нагрева в указанных подогревателях по схеме рис. 1

Из графика на рис. 2 видно, что наибольшая разность температур имеет место на «горячем конце» ПВД-7, в начале охлаждения греющего пара в пароохладителе (процесс 5-6). Чуть менее велика разность температур на «горячем конце» ПВД-8, в начале аналогичного процесса охлаждения пара в пароохладителе (процесс 1-2).

В обоих ПВД, после охлаждения в пароохладителе греющий пар попадает в паровое пространство собственно-подогревателя, где охлаждается до температуры насыщения (процессы 2-3 и 6-7) и конденсируется (процессы 3-4 и 7-8). Далее конденсат греющего пара дополнительно охлаждается в охладителях конденсата (процессы 4-5 и 8-9), на чем его теплообмен с питательной водой в ПВД-7 и ПВД-8 завершается.

Как известно, величина роста энтропии определяется отношением:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

где dQ – количество подводимого тепла; T – температура, при которой производится подвод тепла.

Из этого следует, что площадь под графиками температур пара и конденсата обратнопропорциональна снижению энтропии пара и конденсата, а площадь под графиком температуры питательной воды – росту энтропии питательной воды. Так как температура пара и конденсата всегда выше температуры питательной воды, суммарная энтропия системы увеличивается на каждом из промежутков процесса теплообмена. Наибольший рост энтропии происходит в подогревателе ПВД-7, а особенно в части собственно-подогревателя (процесс 7-8), что вызвано подключением ПВД-7 по греющему пару к линии «холодного» промпрегрева, давлению в котором соответствует довольно высокая температура насыщения, значительно превосходящая температуру питательной воды.

Надо заметить, что в случае, если соотношение нагрева питательной воды в ПВД-7 и ПВД-8 не является точно таким, как на рис. 2, то это не меняет общего соотношения разности температур и теплового потока и не меняет соотношение ранее упомянутых площадей под графиками нагрева и охлаждения, а лишь смещает границу между нагревом в ПВД-7 и нагревом в ПВД-8 влево или вправо.

Снижение роста энтропии в подогревателе ПВД-7 может быть достигнуто путем снижения температуры насыщения в корпусе подогревателя. Снижение давления следует производить максимально изотропно, что предполагает совершение паром работы. Кроме того, снижение роста энтропии на «горячем конце» подогревателя ПВД-7 может быть реализовано путем впрыска воды в поток греющего пара, температура которого будет снижаться из-за нагрева и парообразования инжектированной воды. Но такой процесс будет сопровождаться значительным ростом энтропии вследствие большой разницы температур инжектируемой воды и греющего пара. Поэтому, до впрыска воды, следует снизить температуру пара, осуществляя его адиабатное расширение, после чего инжектировать воду, и адиабатно сжимать пароводяной поток за счет его высокой скорости, приобретенной в процессе расширения, как это осуществляется в термопрессоре.

Для осуществления описанных процессов предлагается использовать пароструйный термокомпрессор (ПСТК), который представляет собой известный пароструйный компрессор, дополненный функцией инжекции воды, вызывающей эффект термопрессии. Эффект термопрессии приводит к росту полного давления потока, что при условии постоянства давления на выходе пароструйного термокомпрессора приведет к увеличению его коэффициента инжекции.

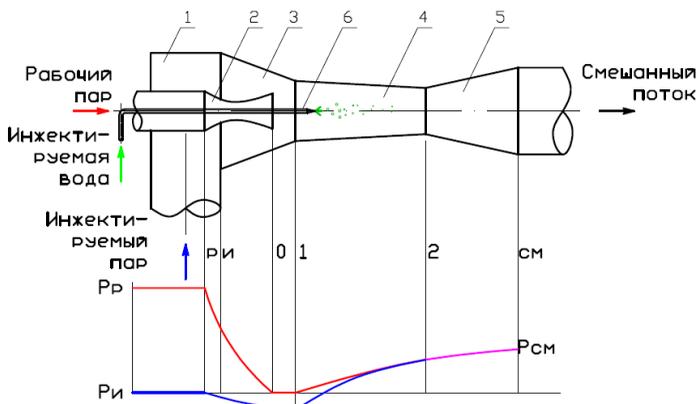


Рис. 3. Пароструйный термокомпрессор и диаграмма изменения давления рабочего и инжектируемого потоков по ходу течения в проточной части аппарата

Теория процессов, происходящих с потоками пара и воды в термопрессоре, достоверно описывается на основе теории процессов, происходящих в пароструйном компрессоре [4] и в трубе постоянного сечения с подводом тепла к потоку [8].

На рис. 3 изображена схема пароструйного термокомпрессора и изменение давления в потоках рабочего и инжектируемого пара. Пароструйный термокомпрессор, как и пароструйный компрессор состоит из приемной камеры инжектируемого потока 1, сопла рабочего потока 2, входного участка камеры смешения 3, собственно камеры смешения 4, диффузора 5, но в отличие от пароструйного компрессора имеет линию подачи инжектируемой воды 6, расположенную соосно с соплом рабочего потока, по которой вода через распыливающую насадку подается в камеру смешения.

Схема установки пароструйного термокомпрессора в тепловой схеме ПТУ приведена на рис. 4. ПСТК по линии рабочего пара подключен к первому отбору пара ПТУ, по линии инжектируемого пара — к четвертому отбору пара ПТУ, а по линии инжектируемой воды через охладитель инжектируемой воды — к напору ПЭН. Охладитель инжектируемой воды по нагреваемому потоку подключен к линии основного конденсата после конденсатных насосов. Выход ПСТК подключен к линии греющего пара ПВД-7.

Включение пароструйного термокомпрессора в тепловую схему приводит к выравниванию ступенчатости подогрева питательной воды и снижению температурных напоров в процессе ее подогрева в ПВД-7 и ПВД-8, как показано на рис. 5.

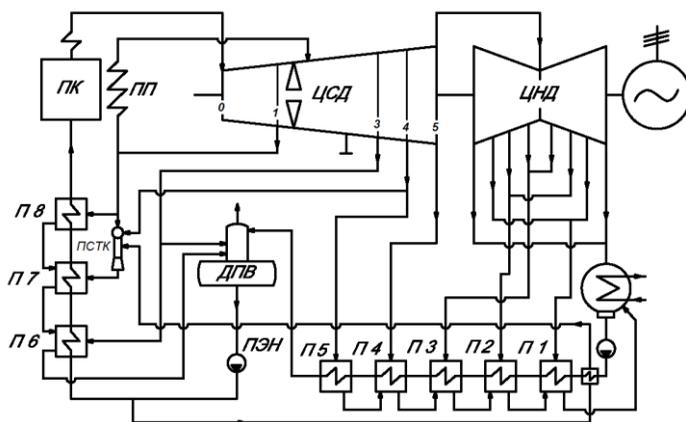


Рис. 4. Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-160-130 с установкой пароструйного термокомпрессора

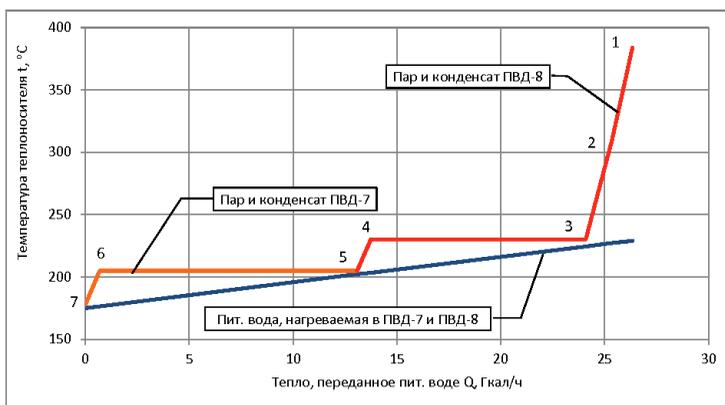


Рис. 5. Температуры греющего пара, конденсата греющего пара и питательной воды в ПВД-7 и ПВД-8 в зависимости от потока тепла, переданного питательной воде в процессе ее нагрева в указанных подогревателях по схеме рис. 4

Таким образом, пар первого отбора частично замещается паром четвертого отбора в соотношении, пропорциональном коэффициенту инжекции инжектируемого пара μ_i ПСТК. Инжекция воды, имеющей температуру намного ниже температуры питательной воды на входе в ПВД-7, увеличивает расход рабочего и инжектируемого пара на величину, необходимую для ее подогрева до температуры дренажа конденсата греющего пара ПВД-7. Но, вызывая эффект термопрессии в каме-

ре смешения ПСТК, она увеличивает коэффициент инжекции инжектируемого пара.

Замещение пара первого отбора паром четвертого отбора приводит к увеличению пропуска пара через отсек ПТУ, расположенный между первым и четвертым отборами (отсек 1-4 рис. 5), что приводит к росту мощности вырабатываемой этим отсеком. Но так как в пределах этого отсека находится промежуточный перегрев пара, то также растет и расход тепла на него. Поэтому удельный расход тепла на прирост мощности $\Delta q'_{\text{э}}$, ккал/(кВт·ч) зависит от точки расширения пара в турбине (отбора турбины), выбираемой для подачи пара в ПСТК в качестве инжектируемого потока:

$$\Delta q'_{\text{э}} = \frac{\Delta Q_{\text{пп}}}{\Delta N_{\text{пту}}} \cdot \frac{3600}{4,18} = \frac{\Delta G_{\text{отс}} \cdot \Delta i_{\text{пп}}}{\Delta G_{\text{отс}} \cdot (i_1 + \Delta i_{\text{пп}} - i_{\text{отб}})} \cdot \frac{3600}{4,18} \quad (2)$$

где $\Delta G_{\text{отс}}$ - изменение расхода пара через отсек ПТУ между первым отбором и отбором, выбираемым для подачи пара в ПСТК в качестве инжектируемого потока, т/ч; i_1 – энтальпия пара первого отбора, кДж/кг; $\Delta i_{\text{пп}}$ – повышение энтальпии пара в промежуточном пароперегревателе, кДж/кг; $i_{\text{отб}}$ – энтальпия пара отбора, выбираемого для подачи пара в ПСТК в качестве инжектируемого потока, кДж/кг.

Если допустить, что изменения расхода пара третьего отбора не происходит, т.ч. изменение пропуска пара через отсек между первым и четвертым отборами равно изменению расхода пара первого отбора, то зависимость удельного расхода тепла на прирост мощности выглядит, как показано на рис. 6.

Следовательно, с точки зрения снижения удельного расхода тепла на прирост мощности использование для инжекции пара в ПСТК пара отборов более низкого давления выгоднее. Но более низкое давление инжектируемого в ПСТК пара приводит к снижению коэффициента инжекции пара и, как показали расчеты, при выборе пятого отбора для подачи пара в ПСТК в качестве инжектируемого потока даже ничтожно малый коэффициент инжекции пара не позволяет получить давление на выходе ПСК равное номинальному давлению второго отбора ПТУ.

Столь высокое снижение давления на выходе ПСТК при ничтожно малом коэффициенте инжекции пара объясняется тем, что большой перепад давления между инжектируемым паром и давлением, необходимым на выходе ПСТК требует не менее большого перепада давления между входом в камеру смешения ПТСК и выходом из диффузора ПТСК и сверхзвуковое течение рабочего потока (число Маха свыше 2) сохраняется в камере смешения до тех пор, пока не происходит скачок уплотнения, вызванный недостаточно низким для дальнейшего сверхзвукового течения давлением на выходе диффузора ПСТК, и сверхзвуковое течение ударно переходит в дозвуковое, что сопровождается выделением тепла с ростом энтропии в потоке. Интенсивность скачка уплотнения в этом случае настолько велика, что даже при нулевом коэффициенте инжекции полное давление потока за ним составляет

1,726 МПа, что на 0,19 МПа меньше давления необходимого на выходе ПСТК.



Рис. 6. Удельный расход тепла на прирост мощности в зависимости от точки расширения пара в турбине (отбора турбины), выбираемой для подачи пара в ПСТК в качестве инжектируемого потока

Поэтому, использование пара пятого отбора для подачи пара в ПСТК в качестве инжектируемого потока становится невозможным.

В результате выбор отбора турбины для подачи инжектируемого пара в ПСТК представляет собой однозначную оптимизационную задачу выбора между третьим отбором и четвертым отборами пара.

Проведенные вариантные расчеты показали, что наибольший положительный эффект от включения в схему К-160-130 пароструйного термокомпрессора имеет место при выборе в качестве источника для подачи инжектируемого пара в ПСТК четвертого отбора ПТУ.

Выводы

1. Доля старых энергоблоков в энергосистеме страны, имеющих промежуточный перегрев пара, остается очень значительной и вывод их из эксплуатации в ближайшие годы не представляется возможным. Поэтому целесообразно внедрение малозатратных быстрокупаемых мероприятий.

2. Применение пароструйного термокомпрессора для снижения потерь от необратимости теплообмена в системе регенерации высокого давления на блоках К-160-130 позволяет снизить удельный расход топлива на отпуск электроэнергии на 0,564 г/(кВт·ч). При этом, благодаря простой конструкции пароструйного термокомпрессора и охладителя инжектируемой воды, капитальные вложения окупаются за период менее 1 года.

Литература

1. «Паровая турбина К-160-130 ХТГЗ» С.П. Соболев – М.:Энергия,1980.- 192с., ил.
2. «Теплотехника» В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. – М.:Высш.шк., 2000.-671 с.: ил.
3. «Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-300-240-2 ХТГЗ» - М.: Министерство энергетики и электрификации СССР, 1977.-31 с.: ил.
4. «Струйные аппараты» Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.: ил.
5. Shapiro A.H., Wadleigh K.R., Gavril B.D., Fowi A.A. "The aerothermopressor - a device for improving the performance of a gas-turbine power plant" //Trans. ASME.- 1956.-V.78.-№ 7.-P.617-653.
6. Зысин В.А. Техническая термодинамика потока. - Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1977.-158 с.
7. Степанов И.Р., Чудинов В.И. "Некоторые задачи движения жидкости и газа в каналах и трубопроводах энергоустановок". - М.: Наука, 1979.-200 с.
8. Абрамович Г.Н. «Прикладная газовая динамика. в 2 ч. 1»: Учеб. руководство: Для вузов.-5-е изд., перераб. и доп.-М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991.-600 с.
9. Перельштейн Б.Х. «Новые энергетические системы»: Казань: Издательство Казанского государственного технологического университета, 2008. 244 с.
10. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. «Техническая термодинамика» - М.: Энергоатомиздат, 1983.- 414с.
11. Анрющенко А.И. «Основы технической термодинамики реальных процессов»: - М.: Высшая школа, 1967.- 269с.
12. Христанович С.А. «Прикладная газовая динамика»: ЦАГИ, 1948.-149с.

УДК 697.34(07)

Б.В. БИРЮКОВ, к.т.н, доцент;
В.В. ШАПОШНИКОВ, аспирант.
(КубГТУ), г. Краснодар.

К вопросу повышения эффективности производства электроэнергии на газотурбинных ТЭС

В настоящее время электроэнергию в России в основном получают на тепловых электростанциях, использующих паротурбинное оборудование с КПД производства электроэнергии порядка 40%, что не эффективно.

Для снижения себестоимости вырабатываемой электроэнергии в настоящей работе предлагается устанавливать газотурбинные установки (рис.1), выполненные на базе ГТУ типа АД-31СТ объединения Са-турн–Люлька г. Москва [1].

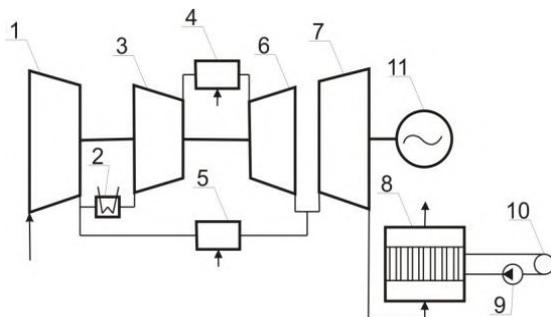


Рис. 1. Схема ТЭС – ГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты в параллельно размещенные камеры сгорания: 1, 3 – воздушные компрессоры низкого и высокого давления; 2 – воздухоохладитель; 4, 5 – основная и дополнительная камеры сгорания; 6, 7 – газовые турбины высокого и низкого давлений; 8 – газоохладитель; 9 – циркуляционный насос; 10 – аппарат воздушного охлаждения, 11 – электрогенератор

Для определения теплотехнических показателей ТЭС ГТУ был произведен расчет характеристик ГТУ с использованием данных АД – 31СТ: массовый расход воздуха, сжимаемого в компрессоре, 61,0 кг/с; давление сжатого воздуха 2,1 МПа; внутренний КПД компрессора 0,87. Полезная мощность ГТУ 20,0 МВт определена при температуре на входе в турбину 1523,15К. Давление газов на выходе турбины принято равным 0,103 МПа. Внутренний КПД турбины в расчете принят равным 0,8994. Эффективный КПД всей ГТУ составил 36,5% [1].

Проведенные в работе расчеты по определению максимального значения КПД ТЭС – ГТУ при разных значениях давлений газов на входе в турбину показали, что максимальное значение эффективного КПД 59,116% может быть достигнуто при давлении газов на входе в турбину 2,6 МПа и температуре 1523,15К (табл.1). Коэффициент избытка воздуха в компрессоре низкого давления составил $\alpha=1,6432$. При этом электрическая мощность ГТУ составила 68,608 МВт и расход топлива на ТЭС – ГТУ $V=3,175$ кг/с.

Таблица 1. Зависимости характеристик ТЭС - ГТУ от давления рабочего тела на входе в газовую турбину при $T_3 = 1523,15$ К и $T_5 = 323,15$ К.

P_2 МПа	P_{21} МПа	$N_{кнд}$ МВт	$N_{квд}$ МВт	N_T МВт	X	Q_T МВт	η^o %	B_T кг/с
2,4	0,4899	19,169	12,066	70,184	1,6746	105,748	59,090	3,250
2,5	0,5000	19,293	12,260	69,390	1,6586	102,430	59,112	3,212
2,6	0,5099	19,408	12,448	68,608	1,6432	99,305	59,116	3,175
2,7	0,5196	19,514	12,630	67,846	1,6284	96,356	59,110	3,140
2,8	0,5292	19,616	12,806	67,101	1,6142	93,579	59,090	3,107

Значительное влияние на характеристики ТЭС – ГТУ оказывает температура газов на выходе из КС2. При увеличении температуры газов на выходе из дополнительной камеры сгорания КС2 с $T_{43}=1523,15\text{K}$ до $T_{43}=1773,15\text{K}$ возрастает значение эффективного КПД ТЭС ГТУ с 59,116% до 59,502% (табл. 2). Полезная мощность ТЭС – ГТУ в этом случае возрастает с 68,608 МВт до 76,84МВт.

Таблица 2. Зависимости характеристик ГТУ от температуры рабочего тела за КС2 при $T_3=1523,15\text{ K}$, $T_5=323,15\text{ K}$.

P_2	T_{43}	$N_{\text{внд}}$	$N_{\text{вд}}$	X	N_T	Q_T	η°	B_T
МПа	К	МВт	МВт		МВт	МВт	%	кг/с
2,6	1523,15	19,408	12,448	1,6432	68,608	99,305	59,116	3,175
2,6	1573,15	19,408	12,448	1,6432	70,188	103,069	59,173	3,245
2,6	1623,15	19,408	12,448	1,6432	71,803	106,929	59,243	3,316
2,6	1673,15	19,408	12,448	1,6432	73,447	110,892	59,320	3,388
2,6	1723,15	19,408	12,448	1,6432	75,130	114,948	58,757	3,460
2,6	1773,15	19,408	12,448	1,6432	76,840	119,112	59,502	3,533

Для проведения комплексной оптимизации параметров рабочих тел в исследуемой ТЭС – ГТУ были созданы граф и математическая модель установки.

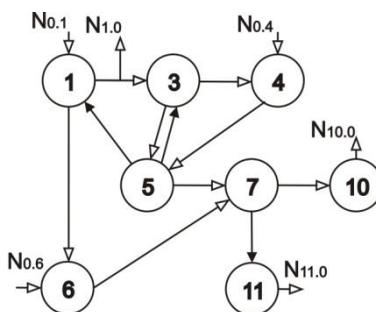


Рис. 2. Граф математической модели ТЭС – ГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха в компрессорах и подводом теплоты в параллельно размещенные камеры сгорания [2]: 1 – компрессор низкого давления; 3 – компрессор высокого давления; 4 – камера сгорания высокого давления; 5 – турбина высокого давления; 6 – камера сгорания низкого давления; 7 – турбина низкого давления; 10 – газоохладитель; 11 – электрогенератор

Стрелками на схеме графа обозначено направление потоков энергии от элемента i к элементу j , мощность которых составляет N_{ij} . В стационарном режиме работы ТЭС – РГТУ сумма входящих в каждый элемент и сумма выходящих потоков энергии равны нулю, поэтому для

каждого элемента схемы можно составить уравнение баланса мощностей:

$$\sum N_{ji} - \sum N_{ij} = 0; \quad i, j = 1 \dots 11. \quad (1)$$

Порядок расчета

1. Задаются известные входные мощности $N_{0,i}$ (газ, воздух);
 2. Задаются приближенные значения величин η_{ij} ;
 3. Решается система балансовых уравнений относительно N_i^0 – (нулевое приближение);
 4. Зная N_i^0 – входную мощность каждого элемента l , определяются уточненные коэффициенты передачи $\eta_{i,j}^0$;
 5. Решается система с $\eta_{i,j}^0$ для определения $N_{i,j}^1$ – (первое приближение);
 6. Далее циклы повторяются до получения требуемой точности.
- Подставив полученные значения коэффициентов передачи потоков энергии в матрицу были определены новые значения эффективного КПД в виде:

$$КПД = \frac{N_{11} \cdot 100}{N_0 \cdot (\eta_{0,4} + \eta_{0,6})} = 59,51\%;$$

Погрешность вычислений для вариантной и комплексной оптимизации параметров рабочих тел газотурбинной ТЭС при оценке КПД составила 0,001%.

Выводы

1. Применение для производства электроэнергии газотурбинных ТЭС с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты в параллельно размещенные камеры сгорания позволяет увеличить мощность ТЭС ГТУ с 20МВт до 68,МВт при высоком значении КПД, составляющем 59,116% (рис. 1).
2. Увеличение температуры газов на выходе из дополнительной камеры сгорания КС2 с 1523,15 К до 1773,15 К позволяет повысить КПД на 0,4% (табл. 1).
3. Применение для оптимизации параметров рабочих тел ТЭС – ГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха и подводом теплоты в параллельно размещенные камеры сгорания математического моделирования с использованием матриц высоко эффективно, на что указывает сходимость значений критерия оптимизации.

Литература

1. **Газотурбинные** и парогазовые установки в России/Ольховский Г. Г. // Теплоэнергетика, № 1, 1999.
2. **Об эффективности** производства теплоты в отопительных теплоцентралях с паровыми котлами и газовыми турбинами./Б.В.Бирюков // Промышленная энергетика, № 7, 2009, с.39.

УДК 621.311.22

Е.Т. ИЛЬИН, к.т.н., доцент,
С.П. ПЕЧЕНКИН, инженер,
М.А. КРЫЛЕНКО, аспирант
(НИУ МЭИ), г. Москва

Изменение показателей тепловой экономичности на различных этапах дозагрузки теплофикационных турбин в отопительный период

Переход от теплового графика работы турбин ТЭЦ к электрическому графику связан с ухудшением экономичности работы станции. Это связано с тем, что дополнительная мощность в режиме работы по электрическому графику вырабатывается за счет открытия регулирующей диафрагмы и большего пропуска пара в ЧНД. То есть в конденсатор поступает расход пара больше вентиляционного, другими словами увеличиваются потери в холодном источнике, и, как следствие, растет удельный расход топлива на электроэнергию [1]. Однако процесс дозагрузки теплофикационных турбин не так однозначен.

Для исследования процесса дозагрузки турбины Т-100/120-130-2 использовалась программа расчета тепловых схем [2]. Исследования проводились для расхода сетевой воды 3000 т/ч и трех различных уровней температур наружного воздуха ($t_{нв}$): -5°C , -15°C , -25°C . Рассчитанные показатели работы турбоустановки сведены в табл. 1–3.

Таблица 1. Расчет режима дозагрузки при $t_{нв} = -5^{\circ}\text{C}$ ($Q_T = 130,1$ Гкал/ч)

Расход пара на турбину, кг/с	95,0	100,0	111,1	116,7	129,2
Расход тепла на турбину, МВт	242,6	254,2	279,6	292,1	319,9
Мощность на клеммах генератора, МВт	75,5	80,7	92,7	98,4	111,3

Таблица 2. Расчет режима дозагрузки при $t_{нв} = -15^{\circ}\text{C}$ ($Q_T = 158,1$ Гкал/ч)

Расход пара на турбину, кг/с	114,3	116,7	122,2	127,8	129,2
Расход тепла на турбину, МВт	286,8	292,0	304,4	316,7	319,8
Мощность на клеммах генератора, МВт	86,8	89,0	94,3	99,9	101,3

Таблица 3. Расчет режима дозагрузки при $t_{нв} = -25^{\circ}\text{C}$ ($Q_T = 175,0$ Гкал/ч)

Расход пара на турбину, т/ч	124,4	129,2
Расход тепла на турбину, МВт	309,3	319,7
Мощность на клеммах генератора, МВт	89,8	94,0

Для расчета показателей тепловой экономичности в среде Excel была составлена математическая модель гипотетического теплофикационного блока с турбиной Т-100/120-130-2 и котельного агрегатом ТГ-МЕ-464. Исходными данными для расчета блока являлись показатели работы турбоустановки и нормативные характеристики котельного

агрегата и вспомогательного оборудования блока. Результатом расчета блока стало получение зависимостей средневзвешенного удельного расхода условного топлива (УРУТ) на отпуск электроэнергии и УРУТ на конденсационную выработку от уровня загрузки турбины (рис.1,2)

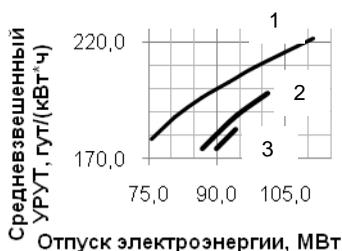


Рис. 1. Изменение средневзвешенного УРУТ на отпуск электроэнергии на различных этапах дозагрузки.

1 – $t_{\text{нб}} = -5^{\circ}\text{C}$; 2 – $t_{\text{нб}} = -15^{\circ}\text{C}$; 3 – $t_{\text{нб}} = -25^{\circ}\text{C}$;

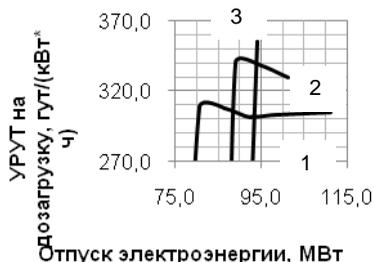


Рис. 2. Изменение УРУТ на дополнительную конденсационную выработку на различных этапах дозагрузки.

Как видно из результатов расчета, УРУТ на выработку электроэнергии растет при дозагрузке. Минимальный удельный расход соответствует режиму работы по тепловому графику, а наибольший удельный расход – режиму работы с максимально-допустимым расходом пара в «голову» турбины.

Вместе с тем, наибольший интерес представляет изменение расхода на прирост конденсационной выработки. Как видно из рис. 2 это изменение носит весьма неоднозначный характер. На первом этапе приоткрывают регулируемую диафрагму и увеличивают расход пара в голову турбины. В ЧНД направляется дополнительный поток пара. Удельный расход топлива на конденсационную выработку растет. Это связано с тем, что пар почти не совершает работу в ЧНД, так как внутренний КПД ЧНД практически равен 0, однако, увеличиваются потери в конденсаторе. В результате УРУТ на дозагрузку резко возрастает. Увеличение вырабатываемой мощности за счет дополнительной выработки в ЧВД и ЧСД. Первый этап продолжается до тех пор, пока удельный расход топлива не достигнет локального максимума. В случае с кривой 3 (рис. 2) дозагрузка ограничивается первым этапом, в связи с достижением максимального расхода пара в «голову» турбины.

На втором этапе начинает повышаться внутренний относительный КПД ЧНД и по мере повышения расхода пара достигает номинальных значений, установленных заводом-изготовителем.

Вырабатываемая турбиной мощность увеличивается не только за счет дополнительной выработки в ЧВД и ЧСД, но и за счет срабатываемого теплоперепада в ЧНД. По мере открытия диафрагмы потери на дросселирование в ней снижаются, что приводит к увеличению тепло-

перепада (рис. 3). При полном открытии регулирующей диафрагмы потери на дросселирование становятся практически равными 0 [1]. Однако для рассматриваемого диапазона тепловых нагрузок режим работы с полностью открытой диафрагмой не наступает, что вызвано ограничением по максимально-допустимому расходу пара в «голову» турбины. В результате улучшения работы ЧНД турбины и снижения потерь на дросселирование в регулирующей диафрагме удельный расход на дозагрузку снижается. Так, для кривой 2 (рис. 2) оптимальной будет дозагрузка оборудования до максимального расхода пара в «голову» турбины, когда степень открытия диафрагмы будет максимальной для заданного уровня тепловой нагрузки. Вместе с тем, по мере повышения расхода пара давление в конденсаторе будет расти, что будет

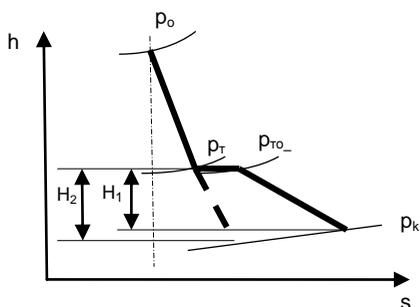


Рис. 3. Процесс расширения в турбине при открытии регулирующей диафрагмы.

H_1, H_2 — теплоперепад в турбине при частичном и полном открытии диафрагмы соответственно

негативно сказываться на экономичности работы турбины. В результате, при определенной нагрузке турбины рост давления в конденсаторе будет настолько существенным, что удельный расход топлива на дозагрузку начнет расти. Этим объясняется излом кривой 3 (рис. 2). Оптимальный уровень дозагрузки турбины в этом случае будет соответствовать нагрузке в точке излома.

На основании результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- оптимальной является поочередная дозагрузка агрегатов ТЭЦ до оптимальной мощности, которая будет определяться теплофикационной нагрузкой и показателями работы конденсационной установки;
- оптимальная загрузка агрегатов ТЭЦ (при рассматриваемых условиях) позволит сэкономить до 12 г/(кВт*ч) условного топлива в зависимости от уровня тепловой нагрузки.

Литература

1. Богачко М. Ю., Ильин Е.Т., Печенкин С.П., Тимофеева Ю.Н. Выбор оптимального условия загрузки теплофикационных агрегатов, несущих тепловую нагрузку в неотапливаемый и переходный периоды. // Теплоэнергетика. – 2005. - №5, С. 53-56.
2. Вульман Ф.А., Корягин А.В., Кривошей М.З. Математическое моделирование тепловых схем паротурбинных установок на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1985.

Б.Л. ШЕЛЫГИН, к.т.н., профессор,
С.А. ПАНКОВ, к.т.н., доцент,
(ИГЭУ) г. Иваново

Влияние впрысков питательной воды в паровой тракт котла ПК-41 на показатели его работы

При работе морально устаревшего энергетического оборудования возможен отказ от ранее принятых проектных решений в случае, если он не ухудшает показателей эксплуатации энергоблока [1].

Первая очередь Конаковской ГРЭС с блоками 300 МВт укомплектована турбоустановками К-300-23,5 ЛМЗ [2] и двухкорпусными газомазутными котлоагрегатами марки ПК-41 паропроизводительностью 950 т/ч Подольского котельного завода «ЗиО г. Подольск» [3].

Котел марки ПК-41 Конаковской ГРЭС – один из первых, введенных в эксплуатацию в начале 70-х годов прошлого столетия [2]. По современным требованиям, ввиду высоких расходов условного топлива на производство электроэнергии, эти котлы считаются морально и физически устаревшими и подлежат модернизации.

В настоящее время целесообразно отказаться от использования штатных впрысков питательной воды в паровой тракт котла ПК-41.

Для анализа показателей действующего котлоагрегата ПК-41 с использованием программного продукта «ТРАКТ» [3] была разработана расчетная модель агрегата, включающая четыре рабочих тракта: газовый и воздушный тракты, паровые тракты высокого (ВД) и низкого (НД) давлений. В качестве топлива был принят природный газ. Расчеты выполнены на один корпус котла. Результаты теплогидравлических расчетов котла ПК-41 при значениях относительной паропроизводительности одного корпуса $D/D_{\text{ном}} = 0,5$ и $1,0$ и долях впрыска питательной воды $d_{\text{впр}} = 0,00; 0,03$ и $0,06$ кг/кг представлены в табл. 1 и 2.

В случае $d_{\text{впр}} = 0,03$ кг/кг при снижении паропроизводительности от 475 до 238 т/ч температура уходящих газов снижается незначительно от 146 до 140 °С. За счет повышенных (против нормативных) присосов холодного воздуха в топку и газоходы котла коэффициент избытка воздуха в уходящих газах α_{yx} возрастает от 1,46 до 1,6. КПД котла (брутто) снижается с 91,27 % до 90,74 %. Соответственно для поддержания постоянства температуры пара за пароперегревателем ВД ($t_{\text{вд}}'' = 545$ °С) должна возрастать величина отношения тепловыделения в топочной камере котла к расходу поступающей в него питательной воды $Q_{\text{T}}/D_{\text{п.в}}$ от 680 до 750 ккал/кг.

Таблица 1. Результаты теплового расчета котла ПК-41 при паропроизводительности одного корпуса $D = 475$ т/ч ($d_{отн} = 1,0$)

Наименование характеристик	Доля расхода питательной воды на впрыск в паровой тракт $d_{впр}$, кг/кг		
	0	0,03	0,06
Расход питательной воды $D_{п.в}$, т/ч	475	475	475
Расход воды на впрыскивающие пароохладители $D_{впр}$, т/ч	0	14,25	28,5
Расход воды в водопаровой тракт, т/ч	475	460,75	446,5
Температура пара ВД, °С	545	545	545
Температура пара НД, °С	545	545	545
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,46	1,46	1,46
Температура уходящих газов, °С	146	146	147
КПД котла (брутто), %	91,28	91,27	91,26
Температура питательной воды, °С	265	265	265
Температура пара ВД на выходе из ППТО, °С	411	420	428
Температура среды на входе в СРЧ, °С	414	417	419
Температура пара за ШПП-2, °С	466	473	479
Температура пара на входе в КПП-1, °С	466	466	466
Доля байпаса пара НД через ППТО	0,38	0,38	0,38

Таблица 2. Результаты теплового расчета котла ПК-41 при паропроизводительности одного корпуса $D = 238$ т/ч ($d_{отн} = 0,5$)

Наименование характеристик	Доля расхода питательной воды на впрыск в паровой тракт $d_{впр}$, кг/кг		
	0	0,03	0,06
Расход питательной воды $D_{п.в}$, т/ч	238	238	238
Расход воды на впрыскивающие пароохладители $D_{впр}$, т/ч	0	7,18	14,36
Расход воды в водопаровой тракт, т/ч	238	230,8	223,6
Температура пара ВД, °С	548	545	545
Температура пара НД, °С	535	541	549
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,6	1,6	1,6
Температура уходящих газов, °С	140	140	140
КПД котла (брутто), %	90,7	90,74	90,67
Температура питательной воды, °С	230	230	230
Температура пара ВД на выходе из ППТО, °С	417	414	412
Температура среды на входе в СРЧ, °С	396	399	401
Температура пара за ШПП-2, °С	479	484	490
Температура пара на входе в КПП-1, °С	479	474	470
Доля байпаса пара НД через ППТО	0	0	0

Согласно табл. 1, независимо от доли впрыска $d_{впр}$, при неизменном тепловосприятии корпуса котла 296,2 Гкал/ч и постоянном расходе топлива ($39173 \div 39183$ м³/ч), КПД котла (брутто) $\eta_k^{бр}$ составляет

91,26÷91,28 %. Аналогичный результат получен и при расчете котла на паропроизводительность корпуса 238 т/ч - 90,67÷90,74 %. Для каждого режима работы энергоустановки, независимо от величины впрыска воды в паровой тракт, значения КПД практически одинаковы (табл. 1 и 2) с их относительным отклонением 0,02÷0,04 %, что укладывается в погрешности измерения теплотехнических характеристик приборами и обработки результатов измерений. Постоянство значений $\eta_k^{бр}$ обусловлено одинаковыми значениями температур уходящих газов и постоянством тепловых потерь q_2 , q_3 и q_5 . При относительной паропроизводительности корпуса котла $d_{отн} = 1,0$, независимо от доли впрыска ($d_{впр} = 0 \div 0,06$ кг/кг) общее тепловосприятие агрегата по рабочей среде равно 296,2 Гкал/ч (табл.1).

В случае отказа от впрысков на 3 % увеличивается расход воды в водяной ЭКО, и при неизменном общем тепловосприятии корпуса (296,2 Гкал/ч) температура пара на входе ППТО снижается примерно на 10 °С. Соответственно при неизменных тепловых потоках от факела к поверхностям нагрева должна снижаться температура металла труб. Отмеченное характерно и для поверхностей нагрева, размещенных между впрыскивающими пароохладителями. При $d_{впр} = 0$ при отключенном пароохладителе «Впр-2» в ступенях конвективного пароперегревателя значения температуры пара выравниваются со значениями $t_{вд}$ базового варианта ($d_{впр} = 0,03$ кг/кг), но не превышают их. При пониженном расходе пара внутри труб радиационных поверхностей нагрева (238 т/ч) и $d_{впр} = 0,03$ кг/кг, когда на 3 % снижается расход среды в СРЧ3-1, температура пара ВД перед ППТО возрастает до $t_{ппто} = 485$ °С.

В случае отказа от впрысков за счет увеличения расхода среды значение $t_{ппто}$ снижается на 20÷25 °С, и соответственно должна снижаться температура металла труб. При увеличении тепловой нагрузки ППТО и глубоком снижении температуры пара ВД $t_{вд}$ до требуемого уровня (400÷410 °С) должно возрасть тепловосприятие пара НД в ППТО. Это достигается увеличением расхода пара НД в ППТО за счет снижения доли байпаса ППТО.

В случае отказа от впрысков характер изменения температуры пара ВД аналогичен характеристикам режима при $d_{отн} = 1,0$. Это позволяет рассчитывать на надежную работу поверхностей нагрева котла независимо от режима его работы. Расчетами установлена принципиальная возможность не использовать штатные впрыски воды при переменных режимах работы котла ПК-41.

Независимо от паропроизводительности котла, отказ от штатных впрысков питательной воды не снижает КПД котла (брутто). Температуры пара высокого давления и металла соответствующих поверхностей находятся на прежнем уровне.

Литература

1. **Мошкарин А.В., Девочкин М.А., Шелыгин Б.Л. и др.** Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики. / Под ред. А.В. Мошкарина / ИГЭУ. – Иваново, 2002.
2. **Котлы большой мощности.** Каталог13-80. НИИЭИНФОРМЭНЕРГОМАШ. – Москва, 1980.
3. **Носков А.И.** Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе ТРАКТ» / А.И. Носков; ЗиО – Подольск. – Подольск, 1984. – 40 с.

УДК 621.321

И.М. ЧУХИН к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

ПГУ с котлом-утилизатором без ограничения температуры пара перед паровой турбиной

Известно, что основной недостаток парогазовой установки с котлом-утилизатором (ПГУ с КУ) это ограничение температуры пара на входе в паровую турбину t_0 величиной температуры газов на выходе из газовой турбины t_4 [1, 2]. Авторы рассматривают возможность использования теплоты газа в камере сгорания (КС) газовой турбины (ГТУ) для перегрева пара паровой турбины (ПТУ) с целью увеличения КПД ПГУ. Схема такой ПГУ с КУ и пароперегревателем (ПП) в камере сгорания представлена на рис. 1, а ее цикл в T,s- диаграмме на рис.2.

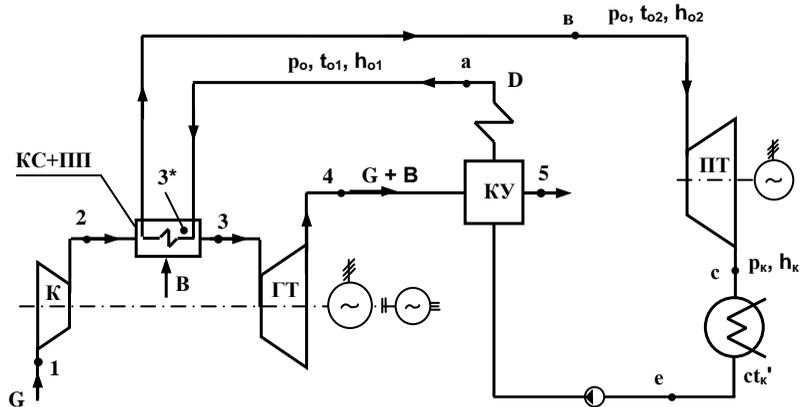


Рис. 1. Схема парогазовой установки с котлом-утилизатором и ПП в камере сгорания: К – компрессор; КС+ПП – камера сгорания с пароперегревателем; ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина; G – расход воздуха; D – расход пара; B – расход топлива в КС

Газы, выходящие из газовой турбины (ГТ), осуществляют перегрев пара в котле-утилизаторе до температуры t_{o1} , вторая ступень перегрева пара до температуры $t_{o2} > t_4$ осуществляется в камере сгорания ГТУ (КС+ПП). В такой схеме двойного перегрева пара нет ограничения по температуре перегретого пара, поэтому величина t_o может достигать значения $550\text{ }^\circ\text{C}$. Одновременно с увеличением значения температуры t_o возможно увеличение значения давления пара p_o с сохранением допустимого значения влажности пара на выходе из турбины.

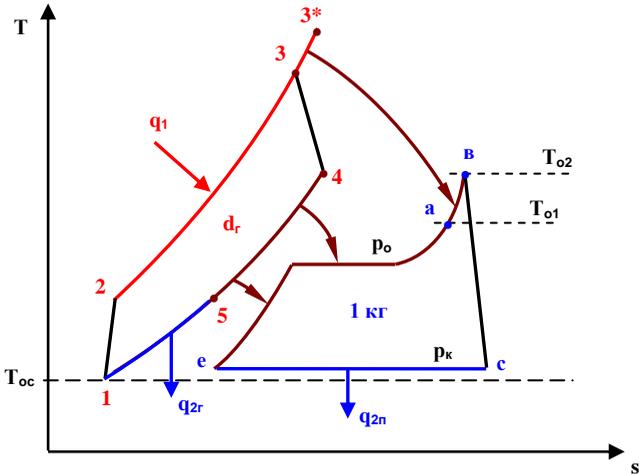


Рис. 2. Цикл ПГУ с КУ и ПП в камере сгорания в T,s- диаграмме

Анализ тепловой экономичности данной схемы выполнен при следующих исходных данных:

для ГТУ: $t_1=20\text{ }^\circ\text{C}$, $t_3=1000\text{ }^\circ\text{C}$, $t_5=140\text{ }^\circ\text{C}$, $\eta_k=0,85$, $\eta_{\text{ГТ}}=0,88$;

для ПТУ в составе традиционной схемы ПГУ с КУ: $p_o=30\text{ бар}$, $t_o=440\text{ }^\circ\text{C}$, $p_k=0,04\text{ бар}$, $\eta_{\text{ПТ}}=0,88$, $\eta_n=0,85$;

для ПТУ в составе схемы ПГУ с КУ и ПП в КС: $p_o=60\text{ бар}$, $t_{o2}=540\text{ }^\circ\text{C}$, $p_k=0,04\text{ бар}$, $\eta_{\text{ПТ}}=0,88$, $\eta_n=0,85$.

Величину степени повышения давления воздуха в компрессоре $v=p_2/p_1$ оптимизировали с учетом реальных температурных перепадов между газами и водяным паром в котле утилизаторе применительно к каждой схеме.

Основные результаты расчета тепловой экономичности традиционной схемы ПГУ с КУ приведены в табл.1, а схемы ПГУ с КУ и ПП в КС в табл. 2.

Таблица.1. Результаты расчетов традиционного цикла ПГУ с КУ

Величина	v	d_r	$I_{ГТУ}$	p_o	t_o	$I_{ПТУ}$	$I_{ПГУ}$	$q_1^{ПГУ}$	$\eta_i^{ПГУ}$
			кДж/кг	бар	°С	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	%
	8	8,89	223	30	440	1049	3032	6254	48,48

Таблица.2. Результаты расчетов цикла ПГУ с КУ и ПП в КС

Величина	v	d_r	$I_{ПТУ}$	p_o	t_{o1}	t_{o2}	$I_{ПТУ}$	$I_{ПГУ}$	$q_1^{ПГУ}$	$\eta_i^{ПГУ}$
			кДж/кг	бар	°С	°С	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	%
	12	10,3	214	60	380	540	1240	3440	6837	50,3

Обозначения величин, приведенных в таблицах:

v – степень повышения давления воздуха в компрессоре;

d_r – удельный расход газа на кг водяного пара в ПГУ;

$I_{ГТУ}$ – удельная работа ГТУ на кг газа;

$I_{ПТУ}$ – удельная работа ПТУ на кг водяного пара;

$I_{ПГУ}$ – удельная работа ПГУ на кг водяного пара;

p_o – давление пара на входе в паровую турбину;

t_o – температура пара на входе в паровую турбину в традиционной ПГУ с КУ;

t_{o1} , t_{o2} – температуры перегретого пара паровой турбины на входе и выходе из пароперегревателя, находящегося в камере сгорания ГТУ;

$q_1^{ПГУ}$ – удельная подведенная теплота в цикл ПГУ на кг водяного пара;

$\eta_i^{ПГУ}$ – внутренний абсолютный КПД цикла ПГУ.

На основании результатов расчетов, приведенных в таблицах, можно сделать следующие выводы:

- применение дополнительного перегрева пара в камере сгорания газовой турбины позволяет увеличить КПД ПГУ с КУ на 3,7 % (относительных);
- введение дополнительного перегрева пара в камере сгорания газовой турбины приводит к увеличению оптимального значения степени повышения давления воздуха в компрессоре (с 8 до 12);
- введение дополнительного перегрева пара в камере сгорания газовой турбины позволяет использовать ПТУ с большими значениями температуры пара перед турбиной (до 550 °С);
- увеличение температуры пара перед паровой турбиной в цикле ПГУ с КУ и ПП в КС приводит к возможности увеличения давления пара p_o ($p_o=60$ бар, $t_o=540$ °С для ПГУ с КУ и ПП в КС против $p_o=30$ бар, $t_o=440$ °С для традиционной ПГУ с КУ)
- увеличение КПД цикла ПГУ с КУ и ПП в КС по сравнению с традиционным циклом ПГУ с КУ в основном объясняется увеличением тепловой экономичности парового контура ПГУ.

Литература

1. Чухин И.М. Техническая термодинамика. Часть 2., учебн. пособие. – ИГЭУ, 2008, 228 с.
2. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки электростанций. Учебн. пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2002, 584 с.

УДК 621.311.22

Е.С. МАЛКОВ, аспирант,
Б.Л. ШЕЛЫГИН, к.т.н., профессор,
(ИГЭУ), г. Иваново

Анализ эффективности работы котла-утилизатора в переменных режимах при использовании камеры сжигания дополнительного топлива для нужд теплофикации

Уходящие газы котлов-утилизаторов (КУ) могут использоваться для нагрева сетевой воды при установке камеры сжигания дополнительного топлива (КСДТ) и газового подогревателя сетевой воды (ГПСВ) в газоходе КУ за низкотемпературными поверхностями нагрева [1, 2].

Энергетические газотурбинные установки (ГТУ) отличаются от паросиловых установок тем, что они редко работают в расчетном режиме. В утилизационных ПГУ параметры работы ГТУ оказывают определяющее влияние на работу КУ.

При создании АСУ энергоблока и алгоритма управления объектом необходима разработка статических характеристик, представляющих зависимости выходными параметрами конкретного элемента установки от определяющих факторов. С этой целью выполнен расчетный анализ изменения отдельных энергетических характеристик установки при изменении электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$ и нагрузки КСДТ.

Исследование проводилось на примере входящей в состав ПГУ-325 расчетной модели ГТЭ-110 [3]. Анализ выполнен при теплоте сгорания природного газа $Q_n^c = 36 \text{ МДж/м}^3$, температуре наружного воздуха $t_{нар} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной нагрузке ГТУ $n_{ГТУ} = N_{ГТУ} / N_{ГТУ}^{НОМ}$ в диапазоне $0,4 \div 1,0$ для последовательного расположения КСДТ и ГПСВ в газоходе КУ за газовым подогревателем конденсата.

С учетом предельно допустимой по условию воспламенения и полноты сгорания природного газа концентрации кислорода в уходящих газах 12,5 % [4] величина максимального относительного расхода в рассматриваемом диапазоне принимает значения от 0,225 до 1,191 (рис. 1) и может быть представлено следующим выражением:

$$\left(\frac{B_{\text{КСДТ}}}{B_{\text{ГТУ}}} \right)^{\text{макс}} = 0,225 + 1,865(1 - \eta_{\text{ГТУ}})^{1,29} . \quad (1)$$

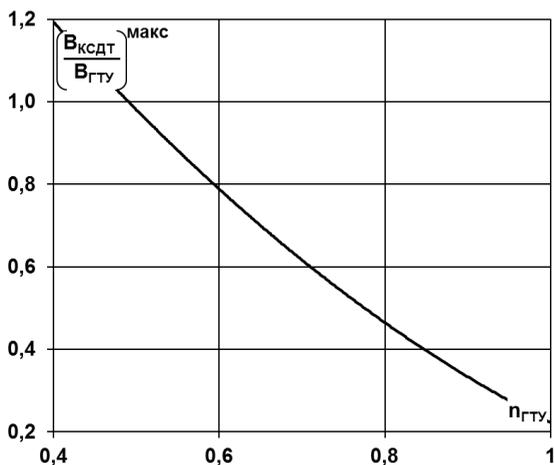


Рис. 1. Изменение предельно допустимой величины относительного расхода топлива в КСДТ в зависимости от относительной мощности ГТУ

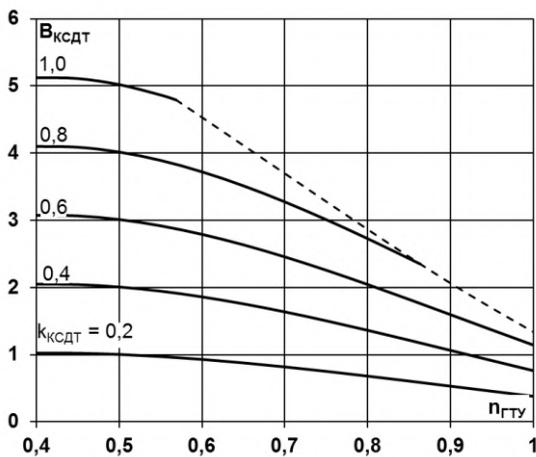


Рис. 2. Изменение расхода топлива в КСДТ в зависимости от относительной мощности ГТУ и нагрузки КСДТ

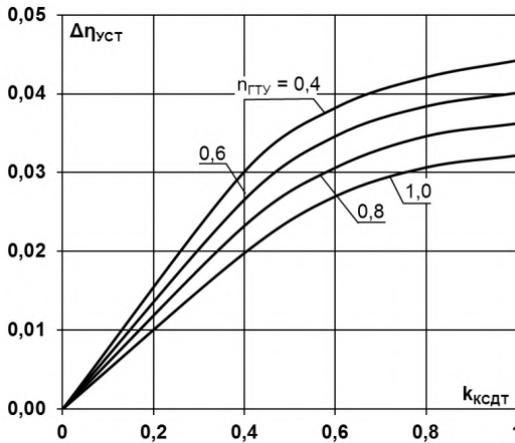


Рис. 3. Зависимость увеличения КПД энергоустановки по сравнению с вариантом КУ без КСДТ и ГПСВ от нагрузки КСДТ и относительной мощности ГТУ

Для сравнительного анализа показателей энергоустановки при переменных режимах её работы принят коэффициент нагрузки КСДТ:

$$k_{КСДТ} = V_{КСДТ} / V_{КСДТ}^{макс} . \quad (2)$$

Величина $k_{КСДТ}$ принята относительно максимально возможного расхода топлива, который определяется режимом работы ГТУ. При снижении нагрузки ГТУ значение $V_{КСДТ}^{макс}$ возрастает.

Для величин $k_{КСДТ}$ от 0,2 до 1,0 значение расхода топлива в КСДТ в зависимости от относительной нагрузки ГТУ (рис. 2) описывается следующим выражением:

$$V_{КСДТ} = 5,5k_{КСДТ} - (3,4k_{КСДТ} + 0,12)(\eta_{ГТУ})^{2,6} . \quad (3)$$

Наибольшее значение $V_{КСДТ}$ принимает при относительной нагрузке ГТУ $\eta_{ГТУ} = 0,4$ (рис. 2). График ограничен пунктирной линией по условию достижения минимального значения коэффициента избытка воздуха в уходящих газах за КСДТ для сжигания топлива в данных условиях $\alpha_{КСДТ}^{вых} = 1,63$.

Эффективность использования располагаемой теплоты газов ГТУ и дополнительно сжигаемого в КСДТ топлива может оцениваться по величине повышения КПД энергоустановки (по обратному балансу):

$$\Delta\eta_{уст} = \Delta q_2 - \Delta(1 - \eta_{сг}) , \quad (4)$$

где Δq_2 - снижение потери теплоты с уходящими газами по сравнению с вариантом КУ без КСДТ и ГПСВ, $\Delta(1 - \eta_{сг})$ - повышение неполноты сгорания топлива в среде, обедненной кислородом.

При неизменной степени сгорания топлива величина $\Delta\eta_{ycm}$ преимущественно определяется изменением потери теплоты с уходящими газами Δq_2 за счет снижения $\alpha_{КСДТ}^{вих}$.

Наибольшее увеличение $\Delta\eta_{отб}$ наблюдается при сниженных нагрузках ГТУ. Так, при $\eta_{ГТУ} = 0,4$ и нагрузке КСДТ $k_{КСДТ} = 1$ увеличение КПД достигает 0,0442. При максимальной нагрузке ГТУ $\eta_{ГТУ} = 1,0$ величина $\Delta\eta_{ycm}$ существенно ниже, и, в зависимости от значения $k_{КСДТ}$, может достигать 0,0322. В случае снижения нагрузки КСДТ $\Delta\eta_{ycm}$ уменьшается.

Полученные зависимости рис. 3 верны при условии равенства температур уходящих газов для вариантов КУ с КСДТ и без неё.

Литература

1. Шельгин, Б.Л., Мошкарин А.В., Малков Е.С. Определение условий использования в качестве окислителя уходящих из котла-утилизатора газов для сжигания дополнительного топлива // Вестн. ИГЭУ. - 2012. - Вып. 2. - С. 4 - 7.
2. Шельгин, Б.Л., Мошкарин А.В., Малков, Е.С.. Тепловая эффективность использования уходящих газов котла-утилизатора при сжигании дополнительного топлива // Вестн. ИГЭУ. - 2012. - Вып. 4. - С. 8 - 12.
3. Мошкарин, А.В., Шельгин, Б.Л., Жамлиханов, Т.А. Режимные характеристики ГТЭ-110 для энергоблока ПГУ-325 // Вестник ИГЭУ. - 2010. - Вып. 2 - С. 7+10.
4. Цанев, С.В., Бузов В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб.пособие для вузов // под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 с.

УДК 621.311.22

Н.Д. ЧИЧИРОВА, д.х.н., профессор,
С.М. ВЛАСОВ, аспирант
А.О. ЗАКИРОВ, студент
(КГЭУ), г. Казань

Влияние системы оборотного охлаждения на экономичность тепловой электростанции

Эффективность эксплуатации паротурбинных установок в значительной степени определяется надежностью и экономичностью конденсаторов турбин. Срок службы конденсатора должен, по меньшей мере, соответствовать сроку службы турбины, а значит около 30 лет. При этом должно обеспечиваться расчетное разряжение в конденсаторе, которое составляет примерно 4-6 кПа.

Известно, что при концентрации в охлаждающей воде способного к распаду гидрокарбоната кальция на уровне 1,0-1,5 мг-экв/л рост

толщины накипи на трубных поверхностях конденсаторов составляет 0,3-0,5 мм/год. При этом коэффициент теплопередачи уменьшается более чем в 3,5 раза, а гидравлическое сопротивление увеличивается до 15%. При увеличении давления в конденсаторе на 1 кПа мощность энергоблоков на конденсационном режиме уменьшается на 0,8-0,9%, а для турбин низкого и среднего давления - на 1,2-1,5% [1].

Хотелось бы отметить, что при уменьшении теплопередачи стенки из-за огромного нароста минеральных солей растет расход топлива на выработку электрической энергии, так как возрастает потребление электрической энергии насоса, который преодолевает большее сопротивление. Эти нежелательные факторы уменьшают доходы станции.

Так же одним из факторов снижения мощности турбин ТЭС является повышение температуры, при котором происходит конденсация пара в конденсаторах, т.е. уменьшение вакуума. Причиной этого может быть либо повышение температуры охлаждающей воды вследствие неудовлетворительной работы градирен, либо образование солевых (преимущественно карбонатных) отложений на внутренних поверхностях трубок конденсаторов, по которым протекает охлаждающая вода.

Неудовлетворительная работа системы циркуляционного водоснабжения приводит к снижению экономичности турбины и блока в целом. Снижение расхода воды на конденсаторы по сравнению с расчетным из-за неполадок в системе (насос, тракт охлаждающей воды) приводит к увеличению нагрева воды в конденсаторе, соответствующему снижению вакуума и потере экономичности блока [2].

Однако если даже удастся сохранить расчетный расход охлаждающей воды путем разворота рабочих лопастей на больший угол, повышенный напор насоса приводит к перерасходу электроэнергии на подачу охлаждающей воды, что опять свидетельствует о понижении эффективности станции, т.е. ее технико-экономических характеристик [2].

Неполадки и неисправности в работе систем технического водоснабжения с градирнями приводят к неэкономичной работе турбин, пережогу топлива и перерасходу электроэнергии на собственные нужды, а иногда и к ограничению мощности электростанции. Они могут быть также вызваны острым дефицитом водных ресурсов, биологическими и химическими загрязнениями систем, технического водоснабжения и зарастанием системы, ограниченным диапазоном регулирования производительности циркуляционных насосов, отсутствием режимных карт эксплуатации систем технического водоснабжения для поддержания экономичного вакуума, недолговечностью глубинных водозаборов, не поддающихся ремонту без полного останова электростанции.

Загрязнение конденсаторов турбин отложениями минерального и органического характера в результате неудовлетворительного качества охлаждающей воды приводит к ухудшению вакуума в конденсаторах и, как следствие, к значительным пережогам топлива, а в ряде случаев к ограничению мощности турбин. Кроме того, образующиеся в конденса-

торах турбин отложения интенсифицируют коррозионные процессы металла трубок [2].

Используемые для охлаждения конденсаторов природные воды содержат растворенные коллоидные и грубодисперсные вещества, а также растительные и животные организмы. Природная вода, попадая в систему технического водоснабжения под действием специфических факторов, изменяет свой физико-химический и биологический состав, что может привести к образованию отложений в конденсаторах турбин.

Для предотвращения образования отложений в конденсаторах турбин, как правило, производят водообмен в водохранилищах-охладителях, что способствует уменьшению отложений солей на трубках конденсатора и повышению технико-экономических показателей всей станции в целом.

Толщина накипи в 1 мм приводит к перерасходу топлива на ТЭС на 7%, а перерасход топлива по этой причине на электростанциях России в среднем составляет 2% и на некоторых ТЭС достигает 10%.

Эффективность многих градирен хуже нормативной, недоохлаждение воды в них составляет до 10 °С. Недоохлаждение воды в градирне может быть вызвано разными причинами, в том числе, и негерметичностью вытяжной башни. По данным испытаний, проведенных фирмой ОРГРЭС, повреждение 10% обшивки градирни площадью орошения 1600 м² ухудшает ее охлаждающую эффективность в теплое время года на 2-3 °С, тем самым вызывает снижение мощности турбоагрегатов, снижение вакуума в конденсаторе [1].

В заключении хотелось бы отметить, что малейшие изменение параметров среды в системе технического водоснабжения с градирнями или другими видами систем технического водоснабжения сильно влияют на всю станцию в целом. Для предотвращения всех проблем в системах технического водоснабжения предложено множество идей по их предотвращению. На сегодняшний день самыми актуальными идеями являются поддержание оптимального водно-химического режима, разработка программного обеспечения для систем технического водоснабжения, разработка новых антикоррозионных, моющих композиций.

Литература

1. **О повышении** эффективности эксплуатации и надежности конденсаторов паровых турбин. Рыженков В.А. д.т.н., Куршаков А.В. к.т.н., Анахов И.П. инж., Свиридова Е.В. инж.,(МЭИ). «Энергосбережение и водоподготовка» №2(52) 2008 стр.29-34.
2. **Доброхотов В.И., Жгулев Г.В.** Эксплуатация энергетических блоков.- М.:Энергомиздат, 1987.-256 с.: ил.

Численное моделирование особенностей работы зданий и технических объектов, расположенных в зонах повышенной сейсмичности и ветрового воздействия

Обязательным требованием к объектам повышенной техногенной опасности (к которым, в том числе относятся сооружения на территории тепловых и атомных электрических станций) является гарантия их надлежащего функционирования при любых нормальных и аварийных режимах работы. Так, при проектировании АЭС [1] должно быть проанализировано влияние возможных природных воздействий, среди которых гидрометеорологические, геологические и другие процессы, и принято решение об их учете в проекте.

Землетрясения представляют собой одно из наиболее частых природных явлений. Общее число отмечаемых ежегодных землетрясений достигает нескольких тысяч или десятков тысяч в год. На практике реализуются антисейсмические мероприятия, которые условно можно разделить на две основные части [2]:

- разработка методов прогнозирования места расположения ожидаемого разрушительного землетрясения и оценка его интенсивности;
- разработка сейсмостойких сооружений, т.е. сооружений, обладающих высокими технико-экономическими показателями и способными воспринять землетрясение ожидаемой эффективности с минимальным ущербом.

Ветровая нагрузка также играет значительную роль при проектировании [3]. Недостаточность знаний о действии ветра на сооружения приводила к обрушению зданий повышенной этажности, опор линий электропередачи, радиомачт. Основными причинами таких аварий были ошибки в назначении величины расчетной ветровой нагрузки, неправильное представление о характере ее распределения по сооружению, недостаточный учет аэродинамических характеристик, вибрация конструкций.

Учитывая многообразие конструктивных решений сооружений, специфику их работы, а также высокую ответственность сейсмических расчетов, в каждом отдельном случае выбору расчетной схемы следует уделять достаточно серьезное внимание с тем, чтобы уже на стадии предварительных расчетов иметь возможность рассматривать особенности предполагаемого поведения рассматриваемой конструкции в реальных условиях ее эксплуатации.

Кроме того, при выборе расчетной схемы необходимо учитывать и специфические особенности, присущие используемому методу расчета, или даже той или иной модификации применяемого программного комплекса. При этом отличительной особенностью методов расчета конструкций на сейсмостойкость является принципиальная невозможность точного задания возмущающего воздействия. В настоящее время используется три метода расчета конструкций на сейсмостойкость:

- статический метод;
- динамический анализ;
- линейно-спектральная теория.

Действие ветра на сооружения проявляется в виде нагрузки, величина которой зависит от скорости ветра и его порывистости. Сила и характер ветра, преимущественное направление сильных ветров определяются климатическими условиями и рельефом местности. Ветровая нагрузка на сооружение зависит от скорости и порывистости ветра, а также от параметров конструкции, включая ее динамические характеристики, аэродинамических коэффициентов формы, размеров и положения конструкции относительно потока.

В настоящее время все более широкое применение находят методы расчета сооружений на ветровую и сейсмическую нагрузку с помощью программных комплексов, основанных на применении метода конечных элементов.

Автором выполнены работы по расчету строительных объектов в системе сквозного проектирования строительных конструкций Ing+ российских разработчиков [4]. Получены оценки прочности и деформативности с использованием встроенных в программные комплексы расчета сооружений библиотек конечных элементов, выполнена численная оптимизация вариантов конструктивных решений с целью удовлетворения требованиям нормативных документов.

Литература

1. **Учет внешних воздействий** природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии: НП-064-05 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – 2006.
2. **Бирбраер А.Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. - 255 с.
3. **Савицкий Г.А.** Ветровая нагрузка на сооружения - М.: Стройиздат, 1972. -110 с.
4. <http://www.tech-soft.ru>

УДК 621.311.22

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент,
 В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
 Е.В. БАРОЧКИН, д.т.н., профессор
 (ИГЭУ) г. Иваново

Регуляризация экспериментальных данных о расходах теплоносителя в энергетических системах

Рассматривается задача регуляризации материальных потоков в энергетических системах сложной структуры. Показано, что для решения важных практических задач сведения материальных и энергетических балансов необходимо учитывать разную степень достоверности определения априорной информации. Для этого предложен метод сведения балансов, разработанный на основе регуляризации Тихонова и матричной модели материальных потоков в системе.

Для описания структуры системы используется направленный граф $\mathbf{G} = (\mathbf{X}, \mathbf{V})$. В качестве узлов графа (x_i) рассматриваются узлы смешения и распределения потоков, а трубопроводы между узлами представляются соответствующими ветвями графа (v_j). Для графа строится матрица инцидентности \mathbf{A} : каждая строка матрицы относится к соответствующему узлу графа x_i , каждый столбец – к ветви графа v_j ; если начало j -й ветви размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы инцидентности равен единице ($a_{ij} = 1$); если конец j -й ветви размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы равен минус единице ($a_{ij} = -1$).

С учетом предложенного описания структуры системы рассматриваемая некорректная задача формулируется следующим образом:

$$\mathbf{AV} + \sigma = 0, \quad (1)$$

где \mathbf{V} – вектор расходов по ветвям графа; σ – числовой параметр, характеризующий погрешность уравнения.

Задача регуляризации сводится к задаче минимизации следующей функции

$$F_c(\mathbf{V}, \lambda) = |\mathbf{AV}|^2 + \lambda |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|^2 \Rightarrow \min, \quad (2)$$

где \mathbf{V}_0 – априорная оценка вектора расходов по ветвям графа; λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать некоторым способом.

Первое слагаемое в целевой функции (2) показывает суммарную невязку балансов по всем узлам $\Delta = |\mathbf{AV}|$, а второе слагаемое характеризует модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора $\Delta \mathbf{V} = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|$.

Для линейной постановки задачи регуляризации известно [1] аналитическое решение:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E})^{-1} \lambda \mathbf{V}_0, \quad (3)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица, верхние индексы «Т» и «-1» показывают транспонирование и обращение матрицы соответственно.

В результате анализа параметрической чувствительности решения (3) показано, что при нулевом значении параметра λ аналитическое решение дает практически нулевую невязку балансов массы в узлах; при увеличении параметра регуляризации уменьшается невязка между найденным решением и исходным вектором (см. рисунок). Однако аналитическое решение не учитывает ограничения на допустимые значения параметров и приводит в ряде случаев к некорректным результатам.

Для устранения указанного противоречия разработан алгоритм численного решения оптимизационной задачи (2) методом статистического программирования [2]. Дополнительным преимуществом численного решения является возможность варьирования параметра регуляризации для каждого потока, что позволяет учитывать степень достоверности определения каждого исходного параметра в отдельности.

Сформулированная задача регуляризации массовых балансов и разработанные алгоритмы ее решения позволяют проводить корректировку исходной априорной информации с учетом степени ее достоверности, что представляет научный и практический интерес для энергетической отрасли.

Предложенный подход может быть использован в ходе первичной обработки экспериментальных данных при испытаниях энергетического оборудования, а также для определения действительных расходов теплоносителей в тепловой схеме электростанции при расчете фактических технико-экономических показателей работы оборудования. В обоих случаях необходимость сведения балансов, согласно требованиям нормативных документов, является обязательной процедурой.

Литература

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. – 1979. – 285 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа. – 2004. – 207 с.

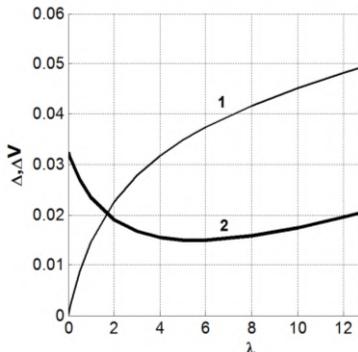


Рис. Зависимость модуля вектора небаланса $\Delta = |\mathbf{AV}|$ (кривая 1) и модуля вектора отклонения решения от исходного вектора $\Delta \mathbf{V} = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|$ (кривая 2) от параметра регуляризации

Моделирование теплообмена в барботажных устройствах атмосферных деаэраторов

Целью исследования является моделирование процесса десорбции кислорода в барботажной ступени атмосферного деаэратора. Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- Задача формирования межфазной поверхности в барботируемом слое жидкости с учетом теплообмена.
- Задача формирования межфазной поверхности с учетом теплообмена и массообмена за счет конденсации пара в пузырьках.
- Построение ячеечной модели теплообмена с учетом десорбции кислорода в барботируемом слое.
- Построение ячеечной модели теплообмена с учетом циркуляции воды в барботажной ступени.
- Задача оптимального управления формированием межфазной поверхности для обеспечения минимального потребления пара при заданном содержании кислорода в деаэрированной воде.

Постановка и решение сформулированных задач подробно обсуждается в работах [1-3], а в предлагаемом исследовании основное внимание уделяется систематизации и обобщению полученных результатов с указанием ссылок на соответствующие работы.

На первом этапе исследования рассматривается задача о формировании межфазной поверхности в слое за счет изменения размеров пузырьков, их гибели или рождения. Задача движения и теплообмена для одиночного пузырька в слое жидкости рассматривается в одномерной постановке [1]. На глубине h_0 от поверхности жидкости образуется пузырек радиусом r_0 с температурой газа T_0 . Считается, что на пузырек при его всплытии кроме силы Архимеда и силы тяжести действует также сила гидродинамического сопротивления. Для описания изменения во времени положения, скорости и температуры пузырька получена система из трех дифференциальных уравнений относительно трех перечисленных функций. Формализованная запись системы позволяет получить ее численное решение стандартными методами. В нашем случае для решения системы используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Анализ результатов решения в виде зависимостей искомых функций от времени показывает, что для условий, характерных для атмосферных деаэраторов, температура газа и скорость пузырька практически мгновенно за время 10^{-3} и 10^{-4} с

соответственно достигают установившихся значений. Расчетный анализ также показал, что при нагреве пузырька газа от 20 °С до 100 °С и подъеме его при этом на 1 м размер пузырька увеличивается на 18 %, а площадь межфазной поверхности - на 39 %.

На втором этапе исследования рассматривается задача тепломассообмена между пузырьками пара и жидкостью с учетом фазового перехода обусловленного конденсацией пара в пузырьке [1]. При постановке и решении задачи принимаются следующие допущения: температура газа в пузырьке равна температуре насыщения при данном давлении; скорость пузырька практически мгновенно становится равной равновесной скорости пузырька данного размера; давление пара в пузырьке мгновенно выравнивается и становится равным гидростатическому давлению жидкости в слое. Результаты расчетных исследований показали, что при низкой температуре жидкости наиболее интенсивно происходит теплообмен, конденсация и, соответственно, уменьшение массы газа пузырька. При достижении нулевой массы происходит схлопывание пузырька пара в слое жидкости. При таких режимах абсорбированный газ из пузырьков опять возвращается в слой жидкости, что снижает эффективность процесса деаэрации воды.

На третьем этапе исследования тепломассообмена дополнительно учитывается процесс десорбции кислорода в барботажной ступени. Постановка и решение задачи выполняется на основе ячеечного подхода и кинетического уравнения Больцмана [2], которое позволяет описывать эволюцию плотности распределения вещества по выбранным фазовым координатам при совместном протекании двух и более процессов. В предлагаемом подходе искомой функцией является плотность распределения вещества по выбранному фазовому пространству. В качестве координат фазового пространства рассматриваются вертикальная геометрическая координата z и размер пузырька x . В качестве третьей координаты выбрана ось Φ , вдоль которой откладываются дискретные значения, показывающие теплоносители и их фазовое состояние: 1 - пар, 2 - вода, 3 - газ в паровой фазе, 4 - газ в жидкой фазе. Разработка модели на основе ячеечного подхода заключается в разбиении рабочего объема аппарата на ячейки, указании связей между ячейками и соответствующих этим связям вероятностей переходов. Искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется при расчете одномерным вектором $\mathbf{S}=\{S_i\}$, где индекс i соответствует номеру ячейки. Расчет согласно предложенной модели позволил определить установившееся распределение пузырьков по высоте слое и по крупности. Данные распределения позволяют в каждой точке фазового пространства определить площадь межфазной поверхности, что, в свою очередь, позволяет рассчитать кинетику тепломассообменных процессов.

На предыдущем этапе исследований движение теплоносителей рассматривалось как одномерное. Однако известные экспериментальные и расчетные исследования показали, что при барботаже жидкость в слое начинает циркулировать. Очевидно, что такой характер движения приво-

дит к изменению времени пребывания теплоносителей в слое и, следовательно, к изменению условий протекания тепломассообменных процессов. Для оценки влияния циркуляции жидкости на процесс деаэрации движение воды в каждой ячейке модельно представляется суперпозицией (или суммой) двух скоростей: расходной и циркуляционной. Построенное на основании приведенных допущений поле скоростей жидкости, с одной стороны, обеспечивает выполнение материальных балансов в каждом горизонтальном сечении, и, с другой стороны, позволяет оценить влияние циркуляции жидкости на тепломассообмен в слое. Для учета влияния циркуляции на процесс движения в модель вводится параметр K , равный отношению скорости циркулирующего потока к скорости расходного потока. Проведенные расчеты показали, циркуляция потока существенно влияет на десорбцию кислорода: изменение параметра K от 0 до 3 привело к уменьшению остаточного содержания кислорода в деаэрированной воде с 50 до 20 мкг/кг.

На пятом этапе исследований формулируется задача оптимального управления межфазной поверхностью в барботажной ступени [2] в следующем виде: определить оптимальное распределение подачи пара в ступень по высоте слоя z и по размеру пузырьков x $U(x,z)$, которое наилучшим образом обеспечивает протекание процесса деаэрации в барботажной ступени. В качестве критерия наилучшего протекания процесса выбирается минимальный расход пара (энергонасителя) на деаэрацию, при котором обеспечивается заданное качество деаэрированной воды. Данная задача относится к классу вариационных задач, в ходе решения которой определяется вид двухмерного оптимального управления $U(x,z)$. В рассматриваемой тестовом примере решение задачи сводится к многомерной оптимизационной задаче, которая решается методом статистического программирования. Найдено оптимальное решение, которому соответствует минимальный расход пара при обеспечении заданного качества деаэрированной воды ($c_2=10$ мкг/дм³).

Предложенный ячейный подход к моделированию десорбции кислорода планируется развивать в направлении инженерной реализации найденных оптимальных решений, а также в направлении учета в модели струйных отсеков атмосферных деаэраторов,

Литература

1. **Эволюция** межфазной поверхности тепломассообмена в барботируемом слое / Вестник ИГЭУ // Жуков В.П., Барочкин Е.В., Ненаездников А.Ю. и др. – 2012, вып. 4. С.12-16.
2. **Оптимальное** управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов / Вестник ИГЭУ // Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ненаездников А.Ю. и др. – 2012, вып. 4. С.58-62.
3. **Моделирование** деаэрации в барботажной ступени с учетом циркуляции потоков жидкости / Вестник ИГЭУ // Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ненаездников А.Ю. и др. – 2012, вып. 6. С.9-13.

УДК 621.311.22

С.Д. ГОРШЕНИН, инженер,
 А.А. КОРОТКОВ, старший преподаватель,
 Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент,
 В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
 Е.В. БАРОЧКИН, д.т.н., профессор
 (ИГЭУ), г. Иваново

Разработка формализованной матричной модели струйных отсеков атмосферных деаэраторов

Учитывая многообразие конструкций термических деаэраторов, их математические модели целесообразно строить путем синтеза моделей отдельных элементов. Продуктивным подходом при решении такой задачи может стать использование математических моделей, разработанных в рамках матричной формализации расчета теплообменных систем со сложной конфигурацией потоков [1]. В этом случае удастся разработать простые рекомендации относительно порядка решения задачи, при этом не только вычисления, но и предшествующее составление матриц хорошо поддаются автоматизации.

Исходное математическое описание для струйного отсека представлено системой дифференциальных уравнений, описывающих изменение температуры воды, расходов пара и воды, концентрации кислорода в воде и паре вдоль поверхности контакта фаз F [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dF} = -\frac{k\tau}{c_2\tilde{G}_2} - \frac{k\tau^2}{r_1\tilde{G}_2}, & \frac{d\tilde{G}_1}{dF} = -\frac{k\tau}{r_1}, & \frac{d\tilde{G}_2}{dF} = -\frac{d\tilde{G}_1}{dF} \\ \frac{dc_{g1}}{dF} = \frac{k_m(k_g c_{g2} - c_{g1})}{\tilde{G}_1}, & \frac{dc_{g2}}{dF} = -\frac{k_m(k_g c_{g2} - c_{g1})}{\tilde{G}_2} \end{cases} \quad (1)$$

где τ – температурный напор, k – коэффициент теплопередачи, c^* – удельная теплоемкость, r – удельная теплота парообразования, c_g – концентрация газа, k_m – коэффициент массопередачи по рассматриваемому газовому компоненту, k_g – коэффициент фазового равновесия, определяющий связь между концентрацией газа в воде и равновесной концентрацией газа в паровой фазе, нижний индекс 1 относится к горячему, 2 – к холодному теплоносителю, n – к состоянию насыщения.

Баланс аддитивных характеристик потоков позволяет представить уравнение процесса в матричном виде [1]:

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & \dots & K_{2n}B_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \vec{O} = \begin{pmatrix} [X]_1 \\ [X]_2 \\ \vdots \\ [X]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{\text{ад}}]_1 \\ -[X_{\text{ад}}]_2 \\ \vdots \\ -[X_{\text{ад}}]_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где \mathbf{B} – матрица процесса в ступени, \mathbf{K} – матрица коммутации, \mathbf{X} – вектор аддитивных параметров, \mathbf{I} – единичная матрица, индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.

Эмпирическое обеспечение модели, включающее методы расчета площади поверхности контакта фаз F , коэффициента теплопередачи k и коэффициента массопередачи k_m , разработано по результатам натурных испытаний деаэраторов различных конструкций. Схема отбора проб и алгоритм обработки экспериментальных данных разработаны таким образом, чтобы обеспечить получение значений расходов, теплофизических и химических характеристик потоков пара и воды до и после каждой ступени.

Анализ опубликованных данных по гидродинамике в струйных отсеках теплообменных аппаратов [2] позволил выбрать базовое расчетное выражение для определения искомой площади $F_{стр}$, m^2 , справедливое для струйного режима течения воды в отсеке:

$$F_{стр} = \frac{2\pi d W_{ж}^2}{3\mu^{3/2} g} \left[\left(1 + \frac{2\mu^2 g L}{W_{ж}^2} \right)^{3/4} - 1 \right], \quad L = 3W_{э} \sqrt{\frac{\rho_{э}^{э} d^3}{\sigma_{э}}} \quad (3)$$

где μ – коэффициент расхода, принимаемый равным 0,75 при диаметре отверстий тарелки 5-8 мм и толщине этой тарелки 4-6 мм [2]; L , м – средняя высота зоны чисто струйного режима течения воды в отсеке.

Все режимы работы струйных отсеков рассматриваемых деаэраторов являются струйно-капельными [3, 4]. При определении площади поверхности контакта фаз F для таких условий предложен следующий подход. Площадь поверхности контакта определяется как сумма площадей поверхности струй и поверхности капель. Длина и площадь поверхности струй определяется согласно (3). Для определения площади поверхности капель в выражение (3) вводится поправочный коэффициент, диапазон значений которого по результатам специального анализа фотографических изображений составил от 1,4 до 1,6, а вместо длины струй L используется высота зоны капельного режима ($H - L$).

При указанном способе расчета площади поверхности контакта фаз F значения искомых коэффициентов k и k_m определялись по минимальному рассогласованию между экспериментальными и рассчитанными согласно (2) значениями выходных параметров.

$$Nu = \exp(15,021)(H/d)^{-1,594} Lap^{0,046} Fr^{0,288} Pr^{-1,833} K^{-0,865}, \quad (3)$$

$$Sh = \exp(5,044)(H/d)^{0,897} Lap^{0,318} Fr^{0,468} Sc^{-0,413} K^{-0,802}, \quad (4)$$

$$Nu = kd / \lambda_{ж}, \quad Sh = k_m d / (D_{ж} \rho_{ж}), \quad Lap = \rho_{ж} W_n^2 d / \sigma_{ж}, \quad Fr = W_{ж}^2 / (gd),$$

$$Pr = \nu_{ж} / a_{ж}, \quad K = r / [c_{ж}(t_2 - t_1)], \quad Sc = \nu_{ж} / D_{ж}, \quad W_{ж} = 4G_{ж}^{ex} / (\pi d^2 n \rho_{ж}^{ex}),$$

$$W_n = (W_n^{ex} - W_n^{эвix}) / (\ln(W_n^{ex} / W_n^{эвix}))$$

при $W_n^{ex} / W_n^{ebix} \geq 1,7$, $W_n = 0,5(W_n^{ex} + W_n^{ebix})$

при $W_n^{ex} / W_n^{ebix} < 1,7$, $W_n^{ex} = D_n^{ex} u_n^{ex} / \Omega_{ex}$, $W_n^{ebix} = D_n^{ebix} u_n^{ebix} / \Omega_{ebix}$,

где Nu и Sh – критерии соответственно Нуссельта и Шервуда; k, Вт/(м²К) – средний по поверхности контакта фаз коэффициент теплопередачи в отсеке; λ^* , Вт/(мК) – средний в отсеке коэффициент теплопроводности воды; k_m , кг/(м²с) – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду в отсеке, t_1 и t_2 , °С – температуры воды соответственно на входе и выходе струйного отсека; Lar, Fr, Pr, K и Sc – критерии соответственно Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутеладзе и Шмидта; H, м – высота отсека от нижней поверхности струеобразующей тарелки до борта нижней тарелки; d, м – диаметр отверстий струеобразующей тарелки; $\rho_{ж}$, кг/м³ – средняя плотность воды; W_n , м/с – средняя скорость парового потока в отсеке; $\sigma_{ж}$, Н/м – средний коэффициент поверхностного натяжения воды; $W_{ж}$, м/с – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки; g, м/с² – ускорение свободного падения; $v_{ж}$, м²/с – коэффициент кинематической вязкости воды; $a_{ж}$, м²/с – коэффициент теплопроводности воды; γ , кДж/кг – скрытая теплота парообразования; $c_{ж}$, кДж/(кг·°С) – изобарная теплоемкость воды; $D_{ж}$, м²/с – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде; $G_{ж}^{ex}$, кг/с – массовый расход воды на входе в отсек; n, шт. – число отверстий струеобразующей тарелки; $\rho_{ж}^{ex}$, кг/м³ – плотность воды на входе в струйный отсек; W_n^{ex} и W_n^{ebix} , м/с – скорости пара соответственно во входном и выходном сечениях отсека; u_n^{ex} и u_n^{ebix} , м³/кг – удельные объемы пара соответственно во входном и выходном сечениях отсека; $\Omega_{вх}$ и $\Omega_{вых}$, м² – площади проходного сечения соответственно на входе и выходе пара из отсека.

Выраженные в процентах среднеквадратические отклонения, характеризующие точность предложенной модели, составили: при расчете процесса теплообмена $\pm 10,8$ %; при расчете процесса десорбции растворенного кислорода $\pm 17,2$ %.

Литература

3. **Жуков, В.П.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, – Иваново: ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина». – 2009. – 176 с.
4. **Шарапов, В.И.** Термические деаэраторы / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра. – Ульянов. гос. техн. ун-т., 2003. – 560 с.
5. **Экспериментальные** исследования и моделирование технологических процессов атмосферной струйно-барботажной деаэрации воды / А.В. Мошкарин, В.Н. Виноградов, Г.В. Ледуховский и др. // Теплоэнергетика, 2010, № 18, с. 21-25
6. **Ледуховский, Г.В.** Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно-барботажных деаэраторах атмосферного давления : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14. – Иваново, 2008. – 226 с.

Алгоритм расчета скорости деформации гибов паропроводов

Одним из наиболее ответственных элементов теплоэнергетического оборудования, разрушение которых приводит к большим материальным потерям и часто к человеческим жертвам среди обслуживающего персонала, являются гибы паропроводов, работающих в условиях ползучести. Условия безопасной эксплуатации, частота и объем контроля гибов, регламентированные [1], позволяют получить достоверные оценки состояния гибов на момент проведения диагностики. Однако безопасность эксплуатации оборудования должна быть обеспечена также как минимум на межремонтный период будущей эксплуатации. В этой связи особое значение приобретает прогнозирование состояния оборудования.

Основной причиной разрушения паропроводов является возникновение и развитие пор и микротрещин в металле, переходящих в макротрещины. Процесс накопления повреждений можно контролировать с помощью микроструктурного анализа металла, однако этот метод трудоемок и применяется в обязательном порядке только после исчерпания паркового ресурса элементов.

Более часто контролируется величина остаточной деформации, которая в условиях ползучести является основной причиной роста несплошностей в металле. В работе [2] предложена методика прогнозирования поврежденности металла по величине остаточной деформации, скорость накопления которой оценивается по результатам измерений на однотипных элементах. Достоверность прогноза определяется тем, насколько точно согласуется расчетная скорость деформации с действительной.

Скорость деформации на интервале $[t_i, t_{i+1}]$ для j -го гива рассчитывается по формуле

$$w_{j,i} = \frac{\varepsilon_{j,i+1} - \varepsilon_{j,i}}{t_{j,i+1} - t_{j,i}}. \quad (1)$$

Средняя скорость деформации гива на всем интервале контроля состояния определяется выражением

$$\bar{w}_j = \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{i,j} w_{j,i} = \frac{\varepsilon_{j,n} - \varepsilon_{j,1}}{t_n - t_1}. \quad (2)$$

Здесь $\beta_{i,j}$ – весовой коэффициент, определяющий вклад i -ой локальной скорости в общий процесс накопления деформации гива,

$$\beta_{j,i} = \frac{t_{i+1} - t_i}{t_n - t_1}. \quad (3)$$

Общепризнано, что на втором этапе ползучести, характерном для основного периода эксплуатации паропроводов, скорость ползучести постоянна, однако результаты расчетов по (1) и (2) демонстрируют заметный разброс значений средней скорости у однотипных элементов и локальных скоростей у одного и того же гйба. Этот разброс связан с неконтролируемым влиянием дополнительных напряжений при режимах пуска, останова и изменения нагрузки, неоднородностью металла гйбов, индивидуальными особенностями работы элементов подвесной системы и погрешностью измерений деформации. Отсюда следует, что скорость деформации должна рассматриваться как случайная величина с некоторым средним значением, одинаковым для группы однотипных элементов, и дисперсией, определяющей величину разброса.

Для получения более объективной информации о характеристиках оцениваемой величины желательно из общей совокупности измерений удалить промахи. В общей совокупности однотипных элементов можно выделить три категории гйбов, результаты измерения деформации которых заметно отличаются от средних величин.

К первой категории относятся гйбы, у которых выделяются средние значения деформации и, соответственно, средние скорости деформации, рассчитанные по (2). Эта ситуация может быть связана с перераспределением напряжений от весовых нагрузок между отдельными элементами вследствие неудовлетворительного состояния подвесной системы или неоднородностью механических свойств металла элементов. Вторую категорию образуют гйбы, при диагностике состояния которых величина деформации оставалась длительное время практически неизменной, а затем за малый промежуток времени скачком изменилась до среднего по однотипным элементам значения. Такие данные свидетельствуют об ошибках измерений. В третью категорию выделяются гйбы, у которых наблюдаются единичные выбеги скорости деформации.

Нами предложен алгоритм обработки результатов измерений деформации, согласно которому в качестве единичного объекта рассматривается отдельный паропровод (нитка), элементы которого в зависимости от конструктивных и режимных параметров распределяются по группам. Для каждой группы одной нитки по (2) рассчитываются средние скорости деформации \bar{w}_j , затем рассчитывается среднее значение скорости в группе

$$\bar{w} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{w}_j, \quad (4)$$

где k – количество гйбов в группе.

Далее находятся отклонения от средней скорости

$$d_j = |\bar{w}_j - \bar{w}| \quad (5)$$

и для максимального отклонения рассчитывается значение r -критерия по формуле

$$r_{\max} = \frac{d_{\max}}{\bar{S}} \sqrt{\frac{k}{k-1}}, \quad (6)$$

где \bar{S} - среднеквадратичное отклонение \bar{w}_j от \bar{w} .

Полученное значение r_{\max} сравнивается с критическим $r_{кр}(\alpha, \nu)$, взятым для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $\nu = k - 2$ из таблицы r -распределения [3]. При $r_{\max} > r_{кр}$ результаты наблюдений за j -м элементом признаются грубым промахом и удаляются из рассматриваемой совокупности. Затем для локальных скоростей деформации, рассчитанных по (1), вычисляются дисперсии скоростей, и по (4) – (6), подставляя вместо скорости значения дисперсий, выявляются промахи по дисперсиям. При наличии промахов из совокупности удаляются результаты измерений деформации j -го гига. Далее локальные скорости деформации всех гибов одной группы объединяются в один массив, и в нем также выполняется проверка на наличие промахов.

Для получения более точных оценок проверяется возможность объединения массивов локальных скоростей деформации для однотипных элементов нескольких ниток одного энергоблока, а затем однотипных блоков. Сначала по критерию Фишера проверяется равнозначность оценок скоростей деформации для однотипных элементов различных паропроводов. В случае однородности дисперсий рассчитывается значение критерия Стьюдента по формуле

$$t = \frac{|\bar{w}_1 - \bar{w}_2|}{\sqrt{\bar{S}_\Sigma^2}} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (7)$$

где n – количество измерений локальных скоростей деформации в группе; \bar{S}_Σ^2 - средневзвешенная дисперсия скоростей, а индексы 1 и 2 относятся к данным для первого и второго паропроводов. Полученное значение параметра сравнивается с критическим, взятым для уровня значимости $\alpha = 0,05$. При $t < t_{кр}$ данные объединялись в одну группу.

На основе этого алгоритма разработана автоматизированная система, которая при получении новых результатов диагностики производит проверку на наличие промахов и пересчитывает скорости деформации.

Литература

1. **СТО 17230287.27.100.005-2008.** Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. – М.: ОАО «ЕЭС России», 2008. – 657 с.
2. **Митюшов А.А.,** Шувалов С.И. Математическое моделирование состояния трубопроводов ТЭС, работающих в условиях ползучести// Вестник ИГЭУ, 2012, вып.6, с.55-59.
3. **Налимов В.В.** Применение математической статистики при анализе вещества. – М.: Физматлит, 1960. – 430 с.

УДК 621.18:533.36

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
Д.В. РАКУТИНА, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Энергосбережение в системе тепловоздухоснабжения главного корпуса блочной ТЭС

Одним из способов энергосбережения на ТЭС является выбор рационального режима работы системы тепловоздухоснабжения главного корпуса. Неправильная организация вентиляции и теплообмена приводит к увеличению затрат на собственные нужды станции и к ухудшению параметров воздушной среды внутри помещения.

В главных корпусах ТЭС с блоками до 300 МВт для организации воздухообмена, как правило, используется аэрация с установкой калориферов "на просос" и частичным или полным забором воздуха на горение из котельного отделения. В этом случае формирование тепловоздушного режима в главном корпусе представляет собой комплексный процесс, на который оказывают влияние аэродинамика воздушных потоков (тепловых струй) и теплообмен между тепловыделяющим оборудованием, приборами системы теплоснабжения, воздушной средой и внутренними ограждениями здания. Температурное поле внутри помещения зависит также от температуры окружающей среды (тепловые потери через ограждения) и от количества воздуха, забираемого из котельного отделения.

С целью повышения энергетической эффективности системы тепловоздухоснабжения было проведено экспериментальное исследование и разработана трехмерная математическая модель процессов тепловоздухообмена в главном корпусе блочной ТЭС. Адекватность математической модели проверена путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

По результатам математического моделирования получена регрессионная модель, характеризующую зависимость температуры воздуха

внутри помещения от количества воздуха, забираемого дутьевыми вентиляторами из котельного отделения, нагрузки системы теплоснабжения и температуры наружного воздуха. Результаты расчета на модели представлены в виде номограмм, с использованием которых можно подобрать такие значения забора воздуха из помещения и нагрузки приборов системы теплоснабжения, при которых температура внутри главного корпуса будет соответствовать допустимой при заданной температуре наружного воздуха.

Расчетно-экспериментальное исследование тепловоздушного режима позволило выявить значительный резерв (до 40%) уменьшения тепловой нагрузки приборов системы теплоснабжения главного корпуса за счет уплотнения оконных проемов турбинного отделения, что дает значительный экономический эффект.

УДК 621.311.22

А.Е. ЗАРЯНКИН, д.т.н., профессор
В.В. НОСКОВ, к.т.н., ассистент
(МЭИ (ТУ)) г. Москва
Е.Ю. ГРИГОРЬЕВ, ст. преподаватель
(ИГЭУ) г. Иваново

Применение оребренных диффузоров и диффузоров с пристеночными перфорированными экранами в выхлопных патрубках газовых турбин

Повышение показателей эффективности энергетического оборудования является актуальной задачей не только при модернизации действующих установок, но и при создании нового оборудования. Одним из ключевых вопросов при проектировании и эксплуатации энергооборудования является обеспечение его надежной работы. Решение указанных задач зачастую является взаимосвязанным. Во многих случаях, воздействуя на характер течения в проточной частях различных установок с целью повышения их экономичности сопровождается и повышением показателей надежности, в связи со снижением динамических нагрузок, действующих со стороны потока на стенки соответствующих каналов.

Рассматривая проблему повышения экономичности тепловых и атомных энергоблоков, следует отметить, что эта проблема может быть решена как за счет повышения экономичности основного и вспомогательного оборудования указанных установок, так и за счет совершенствования их тепловых схем с целью повышения термодинамического КПД соответствующих циклов.

Однако, при всей актуальности обозначенной проблемы, ее даже частичное решение в части дальнейшего повышения экономичности паровых и газовых турбин представляет исключительно сложную задачу, так как традиционные пути повышения экономичности и надежности проточных частей мощных энергетических газовых и паровых турбин практически себя исчерпали.

Действительно, если рассматривать мощные энергетические газовых турбины, то КПД их проточных частей достигает 91÷92 %, что вплотную приблизило указанные значения к теоретически возможным величинам.

В этой связи наиболее перспективными, с точки зрения повышения внутреннего относительного КПД турбины, являются работы, связанные со снижением безвозвратных потерь кинетической энергии потока рабочих тел, покидающих последние ступени этих турбин

В газовых турбинах величина указанных потерь достигает 7÷8 % от полезной мощности газотурбинной установки (ГТУ). Так, например, в ГТУ V94.3А фирмы «Siemens» при расходе газа через последнюю ступень турбины равном $G=634$ кг/с и осевой скорости $C_{2z}=250$ м/с ($M_z=0,3$), эквивалентная мощность уходящего потока достигает 18 МВт (9% от полезной мощности ГТУ).

Все турбостроительные фирмы мира проблеме снижения указанных потерь энергии уделяют особое внимание, пытаясь использовать кинетическую энергию уходящего потока на создание за последней ступенью высокого диффузорного эффекта.

В результате использования развитых кольцевых диффузоров в газовых турбинах удалось преобразовать в потенциальную энергию до 50% кинетической энергии потока, покидающего последние ступени этих турбин. Однако, одновременно возникли серьезные проблемы, связанные с обеспечением вибрационной надежности диффузоров, связанной с очень большими амплитудами пульсаций давления в их проточных частях.

В результате пришлось существенно ограничивать значения углов раскрытия их проточных частей, что привело к чрезмерному увеличению осевых длин этих устройств при сохранении высоких степеней расширения, а при сохранении осевых размеров к уменьшению степеней расширения и существенному снижению экономичности.

Как свидетельствуют данные приведенные в таблице 1 в большинстве случаев на газовых турбинах при сохранении разумной длины кольцевого диффузора с прямолинейными образующими не удается выполнить выхлопные патрубки с большими степенями расширения n . Как правило, указанный параметр редко превышает 2, что сдерживает возможности для повышения аэродинамической эффективности данных отсеков и всей ГТУ в целом.

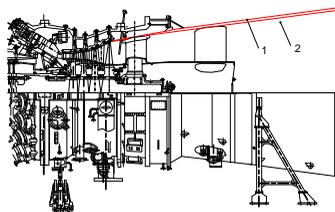
Предлагаемые пути повышения вибрационной надежности диффузоров [2]: внутреннее оребрение (рис. 1), перфорированные экраны (рис. 2); позволяют применять в системе выхлопа газовых турбин широ-

коугольные кольцевые диффузоры с увеличенными углом раскрытия до $\alpha_1=15^0$ и степенью расширения до $n=4$.

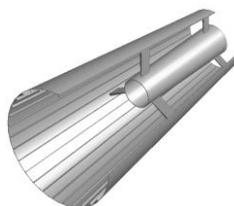
Таблица 6.1. Геометрия диффузоров некоторых стационарных газотурбинных установок

Фирма, газовая турбина	Число ступеней	Угол раскрытия внешней образующей диффузора, α_1	Угол раскрытия внутренней образующей, α_2	Степень расширения, n
ABB GT8	3	-	-	2,06
ABB GT11N	4	10	6,5	2,99
ABB GT13	4	10	7	2,75
ABB GT13E	5	-	-	2,68
GE LM 2500	6	6,5	0	1,71
GE MS6001B	3	8	0	1,88
GE MS 9001E	3	8	0	2
MAN-GHH FTS	4	6	0	1,97
FIAT TG3000		10	0	2,34
Ford 704		6	0	2,2
Alstom GT24	4	6	0	-
Siemens V64	4	7	0	1,9
Siemens V84	4	7	0	1,81
Siemens V94.2A	4	7	0	1,9
Westinghouse 701F	4	10,7	2,8	2,28
ЛМЗ ГТЭ-65	4	10	0	1,9
Mitsubishi M701F4	4	10	0	2

Подобное решение позволяет значительно уменьшить сопротивление выхлопного патрубка, снизить виброхарактеристики до уровня семиградусного диффузора со степенью расширения $n=2$. Кроме того, при модернизации действующих ГТУ, в системах отвода рабочего тела, в которых применяются диффузоры с углом раскрытия $\alpha_1=7^0$ и степенью расширения $n=2$, переход к использованию нового диффузора с $\alpha_1=15^0$ и $n=4$ не ведет к увеличению габаритов всей ГТУ, это обстоятельство немаловажно при стыковке турбины с другими системами и оборудованием, например, котлом-утилизатором в случае работы ГТУ в составе блока парогазовой установки.

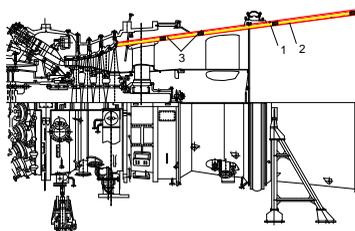


а

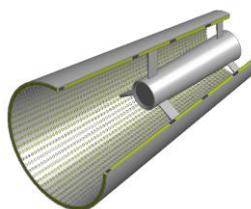


б

Рис. 1. Газовая турбина Mitsubishi M701F4 с новым кольцевым диффузором с системой внутреннего оребрения (а) (условно показано одно ребро) и изометрия нового диффузора (б)



а



б

Рис. 2. Газовая турбина Mitsubishi M701F4 с новым кольцевым диффузором с внутренним экраном (а) и изометрия нового диффузора (б)

Литература

1. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. — М.: Энергия, 1970.
2. Зарянкин А.Е., Носков В.В., Григорьев Е.Ю. Новые методы стабилизации течения в плоских, конических, кольцевых диффузорных каналах турбомашин // Вестник ИГЭУ, 2012, №5, с. 5-9.

УДК 621.311.25

А.Л. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., зав. каф. ПГТ
А.И. КИСЕЛЁВ, к.т.н., доцент
А.А. КРАСНОВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Разработка математических моделей при создании компьютерных тренажёров для эксплуатационного персонала газотурбинных установок

Вопросы обучения и тренировки оперативного персонала в энергетике всегда стояли очень остро. В то же время, современная тенденция в энергетике, связанная с внедрением современного парогазового оборудования

и дефицитом квалифицированного персонала для его эксплуатации, ещё более усугубляет эту проблему.

С развитием и внедрением в процесс обучения компьютерных тренажёрных технологий появилась возможность по-новому взглянуть на способы решения проблемы подготовки персонала в энергетике.

Преимущества компьютерного тренажёра очевидны – простота в использовании, компактность, практически безграничные возможности для моделирования различных внештатных ситуаций и программирования сбоев работы оборудования.

Другим достоинством тренажёра является то, что на его математической модели (при соответствующем её качестве) возможно проведение различных исследований работы оборудования энергоблока с целью повышения качества его эксплуатации.

Несмотря на то, что рассматриваемые системы присутствуют на рынке уже несколько лет, до сих пор не выработано определенного стандарта по их разработке, и продукция различных организаций имеет сильные отличия как по внутренней структуре и функциональности, так и по качеству математических моделей.

В представленных материалах рассматриваются способы и приемы, использованные при разработке математической модели энергетической газовой турбины ГТУ-110, используемой в составе различных блоков ПГУ. Рассмотрены вопросы, связанные с вводимыми допущениями и приближениями и их влияние на показатели модели. Также освещаются отдельные моменты, относящиеся непосредственно к построению математических моделей основного оборудования газотурбинной установки.

Обучение эксплуатационного персонала на полноценном тренажёре, точно имитирующем работу основного и вспомогательного оборудования, безусловно, позволит повысить квалификацию эксплуатационного персонала, снизить аварийность и повысить надежность работы электростанции.

УДК 621.311.25

А.Л. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., зав. каф. ПГТ
А.И. КИСЕЛЁВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Тренажеры нового поколения для подготовки персонала энергопредприятий

В Учебно-научном центре тренажёров в энергетике (УНЦТЭ) Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) при поддержке целого ряда энергетических предприятий России уже достаточно давно ведутся работы по созданию и совершенствованию тренажёров для подготовки оперативного персонала котло-турбинных цехов энергопредприятий. Нами разработан и внедрён целый ряд тренажёров

для энергоблоков различных типов и мощности (в том числе ПГУ), сжигающих все виды топлива и имеющих в своём составе самое разное оборудование. Все это время споры вокруг тренажёров не утихают. В настоящее время на рынке имеется достаточное количество различных тренажёрных продуктов. Многие из них, по нашему мнению, не отвечают требованиям, предъявляемым к тренажёрам на современном этапе развития энергетики. Цель данной публикации – это представить наш взгляд на перспективы развития данной отрасли и поделиться собственным (может быть, скромным) опытом работы в ней.

В настоящий момент вопрос о необходимости непрерывной тренажерной подготовки персонала энергопредприятий не вызывает никаких споров. В первую очередь это связано с борьбой за повышение надёжности, безаварийности и экономичности работы оборудования энергоблока.

Первоочередной задачей подготовки персонала на тренажере является задача научить персонал ориентироваться в сложных ситуациях аварийных и переходных режимов и выбирать правильные решения. Тренажерная подготовка открывает возможность разыгрывания на математических моделях, положенных в основу тренажера, самых разнообразных ситуаций, которые могут встретиться на практике, в том числе самых маловероятных аварий, не рискуя при этом оборудованием станции.

При этом современный тренажёр, по нашему мнению, должен отвечать ряду очень жёстких требований.

1. По составу, динамике, функциям интерфейса, технологическим нюансам и т.д. тренажёры должны быть максимально приближены к оборудованию реального блока-прототипа и условиям работы на нём. Соответственно таких тренажёров на энергопредприятии должен быть не один, а как минимум один на каждую очередь. Хотя и этого может быть недостаточно. Как известно, у нас в стране «нет двух одинаковых блоков». Процесс разработки и строительства блоков ПГУ это лишний раз доказал. В идеале – каждому блоку свой тренажёр. А поэтому, тренажёры должны быть дешёвы (по крайней мере, относительно).

2. Тренажёры должны быть мобильны и доступны.

Под мобильностью и доступностью мы подразумеваем простоту и дешевизну их разработки, установки и обслуживания, отсутствие ограничений по тиражированию внутри предприятия.

При этом количество рабочих мест тренажёра должно быть неограниченным и определяться в зависимости от целей и задач тренировки инструктором тренажёра. Тренажёр должен позволять проведение тренировок как индивидуально, так и в составе смены.

Для достижения дешевизны разработки можно дать несколько практических советов:

а) привлекать к разработке тренажёров организации, имеющие богатый опыт их изготовления, а значит, кроме опыта, имеющие достаточное количество заготовок, шаблонов, стандартных отработанных решений и

т.д. Это может значительно снизить цену тренажёра и сократить сроки его разработки;

б) не использовать при разработке тренажёров каких либо внешних автономных (часто неспециализированных) математических и графических пакетов. Они дороги сами по себе, капризны при работе, поглощают очень много времени и ресурсов;

в) разработку тренажёров проводить «оптом», сразу для нескольких блоков, особенно если они однотипны. Это также позволит резко сократить их стоимость.

Для достижения простоты и дешевизны установки и обслуживания:

а) тренажёр должен работать на обычных серийных компьютерах под управлением стандартной широко распространённой системы (например, Windows), в обычной локальной сети. При этом должны использоваться только стандартные приложения, для работы которых не нужно приобретать дополнительных лицензий и сертификатов;

б) тренажёры должны легко устанавливаться персоналом энергопредприятия без помощи разработчиков;

в) тренажёры ничем не должны быть защищены от тиражирования (внутри предприятия) и могут быть установлены в любом количестве копий, необходимых для организации качественного учебного процесса.

3. Математическая модель тренажёра должна быть:

а) полная, т.е. должна охватывать всё оборудование блока, от работы которого зависит качество ведения режима;

б) всерезжимная, т.е. позволять обучаемому работать во всём диапазоне нагрузок и режимов реального блока-прототипа;

в) неразрывная.

Под этим требованием понимается способность модели обеспечить непрерывную работу тренажёра во всём диапазоне нагрузок в режиме «свободного полёта» без каких либо перескакиваний, искусственных переходов, перезагрузки тренажёра. Например, обучаемый должен иметь возможность растопиться, набрать нагрузку, поработать по графику, включить/отключить любое оборудование, «отвалиться по защите», осуществить горячий подхват с расхолаживанием тракта до ВЗ и т.д. И всё это в «свободном полёте» без каких либо ограничений и перезагрузки режима.

г) точная.

Современные компьютеры, с нашей точки зрения, способны обеспечить такую точность моделирования, при которой тренажёры можно использовать для проведения на нём исследований работы оборудования блока в различных режимах (в том числе АСУ, системы регулирования, контроллеров). Тренажёр – достаточно дорогая вещь и использовать её только для подготовки персонала, с нашей точки зрения, уже нерационально. Возможно и необходимо проводить на нём различные исследования с целью оптимизации режимов и повышению надёжности работы оборудования, прогнозированию его состояния, поиска оптимальных

алгоритмов работы АСУ и т.д. Тем более, что данные, накопленные в современных АСУ ТП, дают очень широкие возможности в этом плане.

4. Тренажёр – это обучающая программа. Поэтому, наряду с хорошей качественной математической моделью и интерфейсом, тренажёр обязательно **должен иметь обучающую направленность**, заключённую обычно в АРМе (автоматизированное рабочее место инструктора).

В тренажёре должны обеспечиваться такие стандартные очень важные учебные функции как автоматическое оценивание, протоколирование, откат, заморозка, ускорение/замедление процесса, обеспечение различных режимов работы тренажёра (самоподготовка, проверка и т.п.), запись всего хода тренировки с возможностью последующего анализа и повторного прохождения с любого места и другие функции, обеспечивающие учебные свойства тренажёра. Это не менее важно для тренажёра, чем хорошая модель и интерфейс.

Автоматизированное рабочее место инструктора – это также очень важная составляющая учебного процесса с использованием тренажёров. Помимо стандартных функций полномасштабного контроля за учебным процессом, АРМ, с нашей точки зрения, должен обладать ещё рядом свойств.

При знакомстве с тренажёром нас часто спрашивают – «сколько исходных состояний в вашем тренажёре, какие тренажёрные задачи в нём присутствуют, какие действия обучаемого и по какому алгоритму оцениваются?».

Все эти вопросы, по нашему мнению, не к разработчику. Рабочее место инструктора должно позволять ему самостоятельно (без помощи разработчика) создавать любые исходные состояния, разрабатывать и реализовывать на тренажёре любые сценарии тренировок, формировать способы, качественные и количественные критерии автоматизированной оценки действий обучаемого. При этом тренажёр превращается в динамический саморазвивающийся и постоянно совершенствующийся объект, постоянно находящийся «на острие» борьбы за организацию качественного, экономичного и безаварийного процесса производства энергии.

Как уже отмечалось выше, современный тренажёр – это не только учебный, но также и исследовательский инструмент, позволяющий (при качественном его изготовлении) проводить самые разные исследования по оптимизации режимов работы оборудования энергоблока, изучению надёжности его работы, разработке и оптимизации алгоритмов работы автоматики и т.д. На наших тренажёрах уже достаточно давно проводятся подобные исследования. В связи с этим хотелось бы остановиться ещё на одном направлении тренажёростроения.

С началом внедрением на энергопредприятиях АСУ ТП нового поколения и бурным развитием компьютерной техники появилась возможность соединения реального оборудования этих систем с полномасштабной математической моделью энергоблока и создания «виртуального» энергоблока. Эта задача в настоящее время многим (и нам в том числе)

кажется достаточно актуальной и перспективной. Наличие виртуального энергоблока на базе ПТК дает возможность решить широкий круг задач, вплоть до полной автоматизации управления блоком в различных режимах его работы.

Сложившийся в УНЦТЭ ИГЭУ и признанный энергетикой высокий уровень разработки математического и программного обеспечения для тренажеров, позволил подойти к этой задаче вплотную.

Три организации: УНЦТЭ ИГЭУ (разработка программно-технического комплекса со всережимной математической моделью), ООО «Квинтсистема» (разработка программного обеспечения виртуальных контроллеров) и ООО «АЭН-Партнер» (подключение и настройка) объединили свои усилия и при поддержке руководства станции на базе модели тренажера энергоблока 300 МВт Костромской ГРЭС и виртуальной АСУ ТП этого блока успешно решили эту задачу. В настоящее время существует полнообъемная версия виртуальной ПТК «Квинт» для блока 300 МВт КГРЭС (включая турбинный контроллер) с математической моделью.

Виртуальный блок позволит:

1. Получить полную идентичность работы систем автоматики;
2. Производить предварительную проверку и тестирование новых систем и алгоритмов работы автоматики (вплоть до реализации пошагового автоматического пуска) до реализации их на блоке;
3. Тестировать и совершенствовать работу действующей автоматики в различных технологических режимах;
4. Модель реального блока при постановке соответствующей задачи позволит до пуска блока отработать предстоящие режимы работы, определить наиболее оптимальные из них, разработать режимные карты и энергетические характеристики, которые актуализируются после корректировки на работающем оборудовании, существенно сокращая время освоения блока;
5. Для проектных и пусконаладочных организаций появляется возможность проверки проектных решений на стадии проектирования АСУ ТП. В частности, возможна проверка объема и правильности работы технологических защит, технологических блокировок, в том числе блокировок взрывобезопасности. Возможна предварительная оценка настроечных коэффициентов автоматических регуляторов.

Полезность такого продукта несомненна, но, к сожалению, проанализировав полученный продукт, мы поняли, что это не тренажёр. Мы получили специализированный «полигон» для проведения всевозможных исследований. Тренажёром (в нашем понимании) он не может являться потому, что почти полностью утратил свою обучающую направленность из-за того, что реальный ПТК никоим образом не предназначена для реализации учебных функций. Он не позволяет (или позволяет с очень большим трудом) реализовать практически ни одну из рассмотренных выше «учебных» функций тренажёра. При этом продукт получается очень

дорогим как при разработке, так и при обслуживании, полностью немобильным и нетиражируемым.

Таким образом приходится сделать вывод о том, что в настоящее время существуют два направления в нашей отрасли: тренажеростроение и «полигоностроение». И нам кажется, их пока нельзя смешивать.

Литература

1. **Виноградов А.Л., Киселев А.И., Буданов В.А.** Тренажеры нового поколения для подготовки персонала энергопредприятий. VI международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования», Иваново, 2011;
2. **Виноградов А.Л., Киселев А.И., Буданов В.А., Григорьев Е.Ю., Краснов А.А.** Программный комплекс «Сетевой компьютерный тренажер парогазового энергоблока с газовой турбиной ГТЭ-110». Свидетельство №2012613804 – М.: Роспатент РФ от 23.04.2012;
3. **Виноградов А.Л., Киселев А.И., Григорьев Е.Ю.** Сетевой программный комплекс «Математическая модель котлоагрегата П-74» для тренажера. Свидетельство №2012614252 – М.: Роспатент РФ от 12.05.2012;
4. **Виноградов А.Л., Киселев А.И., Краснов А.А.** Сетевой программный комплекс «Математическая модель турбоагрегата ГТЭ-110 для тренажера». Свидетельство №2012613803 – М.: Роспатент РФ от 23.04.2012;
4. **Рабенко В.С., Виноградов А.Л., Киселев А.И., Буданов В.А.** Соревнования комплексных бригад оперативного персонала филиалов ОАО «ОГК-3». Вестник ИГЭУ. Вып. 4 – Иваново, 2010;
5. **Рабенко В.С., Виноградов В.Л.** Тренажер нового поколения на базе ПТК «КВИНТ». V Юбилейная всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования» - Иваново, 2010.

УДК 620.9.001.5

А.А. ШИПКОВ, к.т.н., доцент,
С.В. ШЕПЕЛЕВ, ассистент
(НИУ «МЭИ», г. Москва)
В.А. БУДАНОВ, к.т.н., доцент,
(ИГЭУ), г. Иваново

Определение минимально-допустимой толщины стенки элементов и узлов трубопроводных систем, энергетических объектов подверженных локальному эрозионно-коррозионному износу

Эрозионно-коррозионные (ЭК) дефекты являются преобладающим механизмом утонения металла трубопроводов и оборудования, работающих в однофазных и двухфазных потоках конденсатно-питательного и влажно-парового трактов российских тепловых и атомных электростанций. Повреждение или выход из строя элементов трубопроводов, как

правило, приводит к вынужденному отключению отдельной части теплоэнергетического оборудования, а в некоторых даже к авариям и останову энергоблоков. Мировой опыт эксплуатации в ядерной энергетике, аккумулярованный в материалах МАГАТЭ, международных конференций и различных совещаний, показывает, что современное состояние технологии ресурсного проектирования, изготовления и монтажа не в состоянии обеспечить в полной мере назначенный ресурс эксплуатации и безотказную работу элементов конструкций на протяжении всего назначенного срока службы [1]. В связи с этим эксплуатирующие АЭС организации вынуждены создавать и реализовывать на АЭС дополнительные технологии и средства контроля ресурсных характеристик и восстановления ресурса в случае его преждевременного исчерпания.

Во всём мире проблема эрозионно-коррозионного разрушения элементов энергетического оборудования становится весьма актуальной в связи со значительной наработкой энергоблоков. С 2010 года у нас в стране действует руководящий документ «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе» регламентирующий методику расчёта допустимой толщины стенок прямых участков, гибов и переходов трубопроводных систем АЭС [2]. В РД описана методика расчёта допустимой толщины стенки трубопроводов нагруженных внутренним давлением при равномерном износе. Расчёт ведётся с использованием приближённых формул без учёта местоположения эрозионно-коррозионного износа по длине трубопровода. Так, например, для гибов производится расчёт только при износе по растянутой стороне. На практике, однако, встречаются ситуации, когда гибы получают наибольший износ по внутренней стороне и принятие решения о дальнейшей эксплуатации элемента трубопровода необходимо обосновывать расчётами, произведёнными при помощи программных комплексов.

В работе проведён анализ существующих методик оценки минимально-допустимых толщин стенки металла трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу. Рассмотрены модельные и тестовые расчёты по определению минимально-допустимой толщины стенки элементов трубопроводов АЭС, содержащих эрозионно-коррозионные дефекты. Полученные результаты использованы при создании программных комплексов поддержки персонала отечественных электростанций [3].

Данные исследования проводились при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Литература

1. **Тепловые** и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: ил. – (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 3).

2. РД ЭО 1.1.2.11.0571-2010 Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе
3. **Томаров Г.В., Шипков А.А.**, Принципы создания и особенности практического применения программных средств для решения проблем эрозии-коррозии металла в энергетике // Теплоэнергетика. – 2011. №2. – С.44-50.

УДК 621.321

Л.Д. ЯБЛОКОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Паровые турбины малой мощности в энергетике России

В тяжёлом положении находится энергетика России. Рост цен на топливо привел к резкому увеличению себестоимости тепловой и электрической энергии. Электрогенерирующее оборудование на ГРЭС, ГЭС и АЭС, в ряде случаев, изношено не только морально, но и физически, и требует замены. В тоже время, срок окупаемости техперевооружения ТЭС традиционными установками составляет не менее 6 лет, а ввода новой мощности 7-8 лет. Кроме того, одновременные капитальные вложения, при этом, очень велики. Ликвидация «РАО ЕЭС» России привела к образованию территориальных генерирующих компаний, которые, в ряде случаев, не имеют резервных генерирующих мощностей и, как следствие, мы имеем системные аварии с отключением тепло- и электроснабжения, большого числа потребителей.

Анализ современных тенденций в энергетике указывает на переход от централизованной к распределенной мини-микро-генерации, максимально приближенной к окончательному потребителю, как на общемировую тенденцию. [1] Очень привлекательной с экономической и экологической точки зрения выглядит схема когенерации, т.е. одновременной выработки тепла, электроэнергии (а иногда, еще и холода). В России дополнительными аргументами в пользу внедрения технологии когенерации на существующих котельных служит то обстоятельство, что в условиях спада производства большинство паровых отопительных и пароводогрейных промышленных и промышленно отопительных котельных не используют полностью установленные мощности. Номинальные параметры свежего пара на этих котельных $P_0=1,4; 2,4; 4$ МПа. В этих условиях, логично превращение существующих котельных в ТЭЦ малой мощности.

Мини ТЭЦ могут базироваться на котельных небольшой мощности, что особенно важно для городов с численностью населения до 100 тыс. человек. Достаточно эффективной технологией преобразования таких котельных в мини ТЭЦ являются паровые турбины. До 80% в

этих котельных установлены котлы ЗАО ПО «Бийскэнергомаш» производительностью от 2,5 до 25 т/ч. помимо этого в странах СНГ находится достаточно большое количество котлов этой марки.

По оценкам специалистов в России около 100 000 котельных общей установленной мощности (тепловой) в паре и воде более 200 000 Гкал/час. В котельных можно осуществить турбопривод энергоёмких механизмов и автономных электрогенераторных установок с помощью небольших энергетических установок.

В [2] дан подробный обзор турбин малой мощности для автономных энергоисточников. Развитие распределенной электрической системы, состоящей из множества преимущественно мелких источников, находящихся непосредственно у потребителей, обеспечит дополнение и резервирование системы централизованного энергоснабжения. При этом потребитель, обладающий собственным источником энергии (мини ТЭС на базе собственной котельной), во-первых, получает ее по себестоимости, которая в разы ниже имеющихся тарифов, во-вторых повышает надёжность энергоснабжения, в-третьих, может получить дополнительные выгоды от продажи электроэнергии; в-четвёртых, снижает пиковые нагрузки на ТЭС, что приведёт к увеличению срока службы оборудования ТЭС; в-пятых, может максимально использовать недорогое местное топливо.

Отметим, что, как упоминалось выше, за подключение новой мощности к энергосистеме потребитель должен заплатить достаточно большую сумму за кВт установленной мощности. Поэтому потребитель стоит перед выбором либо заплатить деньги за подключение к электросети либо приобрести и установить свой источник электроэнергии.

В России и за рубежом существует большое число изготовителей паровых турбин малой мощности. Ими выполняется широкий спектр турбин мощностью от 100 кВт до 25 МВт.

ООО «Практическая Энергетика» (г. Екатеринбург) разработаны турбины мощностью 30–5000 кВт и через ООО «Электротехнический альянс» (ЭЛТА) (г. Екатеринбург) организуется их производство на ОАО НПК «Уралвагонзавд». Турбины работают без развитой системы маслоснабжения, подшипники смазываются консистентной смазкой, отсутствует система охлаждения масла. Турбины работают без редуктора и соединяются напрямую с приводимыми установками (вентиляторы, дымососы, питательные насосы, электрогенераторы и т.п.). К разработке и поставке систем управления энергоустановками привлечена компания «ПроСофт» (г. Екатеринбург).

Турбины, выполненные по принципиальному проекту специалистов ООО «Практическая энергетика» обладают преимуществами, присущими этому проекту:

- а) отсутствие традиционной системы маслоснабжения и маслобака с системой охлаждения;
- б) компактность установки;

в) отсутствие редуктора между турбиной и приводимым агрегатом.

Данные турбины отличаются оригинальностью конструкции от традиционных паровых турбин с осевым потоком пара. Ротор турбины представляет собой беличье колесо а сопла ступеней расположены сверху и снизу колеса. Внутренний относительный КПД этих турбин составляет 0.6-0.7. Турбины малой мощности производят и :

1) Калужский турбинный завод с линейкой мощности от 0.5 до 2МВт;

2) ЗАО «Независимая энергетика» г.Москва может изготовить и поставить винтовую расширительную машину (ВРМ)

Мощностью от 500 до 1000 кВт.

Из зарубежных производителей следует отметить:

1) Белорусских производителей которые создают маломощные турбины с широкой линейкой мощностей;

2) Чешских производителей, с радиально осевой турбиной (STG) с линейкой мощностей от 0.1 до 6 Мвт;

Немецких производителей с линейкой мощностей от 1 до 5000 Квт.

С нашей точки зрения надо отдать предпочтение турбинам фирмы (ЭЛТА) г. Екатеринбург. По данным этой фирмы турбины могут применяться:

1) в отопительных, промышленных и пиковых котельных;

2) на электростанциях (ТЭС и АЭС).

Объем рынка ТЭС при стоимости турбопривода 400 \$ США за Квт установленной мощности, составляет 2.8 миллиарда \$ США.

Объем рынка АЭС соответственно составляет 400 миллионов \$ США.

Объем рынка промпредприятий составляет 16 миллиардов \$ США.

Литература

1. **Левин Б.И., Степина Е.М.** «Новости теплоснабжения» №6 2002 г.
2. **Неуймин В.М., Усачев, И.П., Пономарев С.Б.** «Турбины малой мощности» для сетевых насосов и автономных энергоисточников». Энергосбережение и водоподготовка №3 2006 г. стр.14-16.

Подсекция «АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

С.Г. АНДРИАНОВ к.т.н. профессор,
А.Г. ИЛЬЧЕНКО к.т.н., доцент.
А.Р. КРЫЛОВ, студ.,
М.А. БУГРОВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Определение показателей тепловой экономичности тепловых схем парогазовых АЭС с промежуточным газопаровым

Один из способов повышения экономичности и манёвренности энергоблоков АЭС – создание комбинированных парогазовых установок. Интеграция с ГТУ позволит привлекать их к регулированию частоты и ежесуточных колебаний мощности энергосистемы. В настоящее время известно много гибридных схем АЭС и ГТУ. Нами был рассмотрен способ комбинирования с установкой газового теплообменника для промежуточного перегрева пара

Выхлопные газы, обладающие высоким энергетическим потенциалом, направляются в газопаровой перегреватель (ГПП), в котором охлаждаются и передают тепло рабочему телу ПТУ. После ГПП газы сбрасываются в дымовую трубу. В работе было рассмотрено два варианта газового перегрева. В первом варианте промежуточный пароперегреватель отключается по греющему пару и осушенный пар после сепаратора поступает в ГПП, где нагревается до проектной температуры 250 °С и затем поступает в ЦНД. Вытесненный пар отбора направляется в ЦВД, где вырабатывает дополнительную мощность. Температура пара за ГПП зависит от количества утилизируемого в нем тепла, и, в принципе может быть увеличена сверх номинальной. В частности, в качестве предельной температуры перегрева была принята температура 350 °С.

Расчёты парогазовых тепловых схем производились для серийных энергоблоков с турбоустановками К-1000-60/3000, К-500-65/3000 и К-220-44/3000 в системе автоматизированного проектирования Mathcad,. Электрическая мощность турбины К-1000-60/3000 в базовом режиме работы составляет 1012,5 МВт, что соответствует КПД по выработке электроэнергии 33,75 %. При реализации газового перегрева по первому варианту суммарная электрическая мощность блока увеличивается до 1275 МВт ($t_{пл} = 250$ °С), а при повышении температуры перегрева до 350 °С она достигает 1539 МВт. Аналогичные результаты получены и турбоустановок других типов (табл.1). Однако газовый перегрев пара по первому варианту до температуры 350 °С требует подведения значительного количества тепла в ГПП, вызывает необходимость установки

мощных газовых турбин и требуют большой поверхности теплообмена ГПП. Реализация такой схемы требует значительных финансовых вложений, проведения большого объема проектных и строительно-монтажных работ по размещению и установке ГТУ, а также реконструкции технологических систем и электрооборудования энергоблока.

Таблица 1. Основные параметры работы ПГУ на базе турбоустановки К-1000-60/3000 для различных температур пара за ГПП

Температура пара за ГПП, °С	Мощность паровой турбины, МВт	Мощность газовой турбины, МВт	Суммарная мощность, МВт	КПД ПГУ, %	Тип газовой турбины
250	1089	186,1	1275,1	36,33	Ansaldo V94.2K
270	1104	230,7	1334,7	36,14	2x Alstom GT 11N2
290	1120	230,7	1350,7	36,58	2x Alstom GT 11N2
310	1137	304,8	1441,8	36,91	2x СилМаш ГТЭ-160
330	1154	304,8	1458,8	37,34	2x СилМаш ГТЭ-160
350	1171	368,5	1539,5	38,47	2x Alstom GT13E2

С другой стороны, увеличение температуры пара перед ЦНД до 350°С с перекрытием отбора пара на СПП позволит повысить мощность ПТУ до 1171 МВт, то есть на 158,5 МВт больше базовой выработки, а КПД ПГУ составит почти 38,5 %, что для ядерного энергоблока является очень высоким показателем.

При перегреве пара по второму варианту СПП работает в штатном режиме. Осушенный пар сначала нагревается в паровом пароперегревателе (ПП), а затем перегревается до температуры 350°С в ГПП (вариант ПП+ГПП). Такой вариант использования тепла выхлопных газов ГТУ является более экономичным, так как не приводит к дополнительным потерям тепла в конденсаторе из-за увеличения расхода пара через проточную часть турбины. Вместе с тем, увеличение теплового перепада в ЦНД позволит увеличить его мощность и снизить влажность расширяемого пара. Недостаток способа ПП+ГПП заключается в более высокой температуре за ГПП газа. Во избежание потерь тепла в окружающей среде требуется разработка мероприятий по снижению температуры отходящих газов.

При расчёте тепловой схемы ПТУ по второму варианту в режиме совместной работы с ГТУ учитывалось не только изменение расхода пара в отборах, но и повышение внутреннего относительного КПД цилиндра низкого давления.

В табл. 2 приведены основные характеристики ГТУ, предлагаемые к установке для совместной работы для рассматриваемых вариантов. Результаты расчетов парогазовых тепловых схем приведены в табл. 3. Проанализировав полученные результаты, можно сделать заключение, что ПГУ, организованные по схеме ПП+ГПП, имеют большую мощность и экономичность, чем выполненные по схеме с ГПП. Переход от базового к пиковому режиму работы в этом случае осуществляется меньшим количеством переключений в технологической схеме ПТУ, а СПП не меняет режима работы.

Таблица 2. Характеристики выбранного газотурбинного оборудования

Характеристики ГТУ	K-1000-60/3000		K-500-65/3000		K-220-44/3000	
	ГПП	ПП+ГПП	ГПП	ПП+ГПП	ГПП _{240/350} °C	ПП+ГПП
Тип и мощность ГТУ, МВт	Ansaldo V94.2K-186,1	Alstom GT26-271,6	ГТЭ-110-110	ГТЭ-160-160	ГТЭ-45-3М-56,9/ГТЭ-110	ГТЭ-45-3М-56,9
Расход на ГТ, кг/с	540,0	654	362	509	173/362	173
Температура газа перед турбиной, °C	1060	1290	1210	1075	1275/1210	1275
Температура газа за ГТУ, °C	545	616	517	537	545/517	545
КПД ГТУ, %	36,5	38,0	34,5	34,4	34,7/34,5	34,7

Таблица 3. Результаты расчёта схем ПГУ с ГПП

Паровая турбина Способ промежуточного перегрева	K-1000-60/3000		K-500-65/3000		K-220-44/3000	
	ГПП	ПП+ГПП	ГПП	ПП+ГПП	ГПП _{240/350} °C	ПП+ГПП
Температура пара за ГПП, °C	250	350	250	350	240/350	350
Температура газа за ГПП, °C	193	327	145	331	229/227	288
Мощность ПТУ, МВт	1089	1133	544,5	548,5	240,4/267,4	247,3
Мощность ПГУ, МВт	1275,1	1404,6	654,5	658,5	297,3/310,4	304,2
КПД ПГУ, %	36,33	37,81	37,52	37,75	35,48/35,74	36,30

Следует отметить, что, несмотря на высокую температуру газа за теплообменником в схемах ПП+ГПП, КПД ПГУ остаётся выше, чем в схемах без парового перегрева. Из всего вышесказанного следует, что создание ядерных парогазовых блоков с газопаровым перегревом является перспективной технологией повышения мощности, эффективности и манёвренности АЭС. Требуют дополнительного исследования такие вопросы как допустимость повышенных температур перед ЦНД паровой турбины и приемистость энергоблока в случае использования ГТУ в совокупности с газовым перегревом только в пиковом режиме.

Компьютерная верификация результатов физических экспериментов на функциональном аналитическом тренажере реактора ВВЭР-1000

Большинство важных характеристик реактора не может быть получено прямыми измерениями, для их определения используют косвенные измерения и различные методики. В их основе лежит математическая обработка результатов физических экспериментов, содержащая обычно целый ряд допущений. Результаты вносятся в альбом нейтронно-физических характеристик соответствующей топливной загрузки реактора. Вопрос о верификации полученных в итоге результатов остается открытым. Задачу такой проверки можно решать с использованием предлагаемой нами программы, базирующейся на математической модели кинетики реактора с сосредоточенными параметрами с учетом шести групп запаздывающих нейтронов и с учетом температурных обратных связей по температуре топлива и теплоносителя.

Экспериментальная часть предлагаемой программы реализована на функциональном аналитическом тренажере (ФАТ), представляющем собой электронную модель энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Численные эксперименты по расчету кинетики реактора выполнены в среде Mathcad на основе алгоритма интегрирования жестких дифференциальных уравнений «Radau».

Рассмотрим верификацию температурных коэффициентов реактивности. Суть заключается в следующем. На ФАТе реализуем переходный процесс, заключающийся в переводе реактора с одного уровня мощности на другой при помощи перемещения регулирующего органа. При этом снимаем временные зависимости нейтронной мощности реактора, его реактивности, температуры теплоносителя на входе и выходе из реактора, давления в первом контуре и т.д. Внесенную регулирующим органом реактивность следует определить по предварительно отградуированной его характеристике. Далее проводим компьютерные численные эксперименты по расчету вышеназванного переходного процесса. В числе исходных данных для расчета используем найденные ранее из опыта коэффициенты реактивности, значение которых и подлежит верификации. Сравниваем расчетные кривые с экспериментальными зависимостями. Поскольку эксперименты проводятся на блоке, а математическая модель описывает только кинетику реактора, т. е. является незамкнутой, то в качестве гипотезы замыкания вышеназванной системы уравнений используем экспериментальную зависимость температуры теплоносителя от времени на входе в реактор. Тем самым от реактора отсекается парогенератор. Сравнение результатов расчета и эксперимента осуществля-

ем по зависимостям нейтронной мощности, реактивности и температуры теплоносителя на выходе из реактора от времени. В случае расхождения результатов расчета и эксперимента варьируем температурные коэффициенты реактивности, добываясь удовлетворительного совпадения кривых, уточняя тем самым эти коэффициенты. Установлено, что различие между измеренными и уточненными коэффициентами реактивности при симуляции на ФАТе работы реактора могут составлять 10% и более.

Таким образом, предложен метод компьютерной верификации результатов измерения температурных коэффициентов реактивности реактора ВВЭР-1000, который уже апробирован на электронной модели энергоблока АЭС.

УДК 621.311

В.А. ХРУСТАЛЕВ, д.т.н., профессор,
Д.О. БАШЛЫКОВ, аспирант
(СГТУ им. Гагарина Ю.А.) г.Саратов

Анализ эффективности комбинирования АЭС с реакторами, охлаждаемыми сверхкритической водой, и ГТУ

В настоящее время наблюдается тенденция к повышению удельного веса ядерного горючего в топливном балансе. При этом намечается увеличение доли маневренных энергоустановок в общей структуре генерирующих мощностей, так как ожидается дальнейшее разуплотнение графиков электрической нагрузки.

Одним из наиболее перспективных направлений в решении проблемы повышения маневренности является комбинирование ГТУ с энергоблоками АЭС. ГТУ обладает наивысшей маневренностью на сегодняшний день, поэтому выгодно использовать ее для пиковых потреблений электроэнергии. Особенностью работы ГТУ является также зависимость ее выходной мощности от температуры наружного воздуха, что особенно важно для осенне-зимних пиков потребления электрической и тепловой мощности.[1]

Турбоустановка разрабатываемой АЭС с реактором ВВЭР-СКД имеет ряд существенных отличий по сравнению с эксплуатируемыми сейчас станциями с ВВЭР: повышенные начальные параметры пара (давление 140 бар, температура 380°C) и температура воды на входе в парогенератор (253 °C); процесс расширения начинается из области перегретого пара.[2] В связи с безнасосной циркуляцией в реакторах данного типа, а также повышенными параметрами перед ЦВД турбины, участие таких энергоблоков в регулировании графиков нагрузки более целесообразно при постоянной мощности реактора в составе энергокомплекса АЭС+ ГТУ.

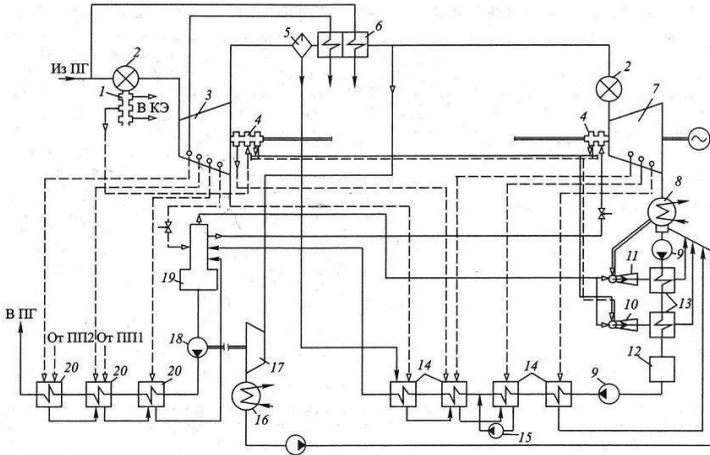


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема (ПТС) турбоустановки К-600-14,0/3000. 1- уплотнение штоков клапанов; 2- блок клапанов; 3- ЦВД; 4- уплотнение вала; 5- сепаратор; 6- две ступени промежуточного перегрева пароперегревателя; 7- ЦНД; 8- конденсатор; 9- конденсатный насос; 10- эжектор уплотнений; 11- основной эжектор; 12- блочная обессоливающая установка; 13- конденсатор пара эжекторов; ПНД; 15- дренажный насос; 16- конденсатор турбопривода; 17- турбопривод питательного насоса; 18- питательный насос; деаэрактор; 20- ПВД.

Рассмотрено три варианта комбинирования данной ПТС и ГТУ:

- 1) замещение второй ступени перегревателя и последнего ПВД (1ПП+1ПВД);
- 2) замещение второй ступени перегревателя и двух последних ПВД (1ПП+2ПВД);
- 3) замещение двух ступеней перегревателя и одного ПВД (2ПП+1ПВД). Для этого используются два вида теплообменников: газопаровой (ГПП) и газо-водяной (ГВП).

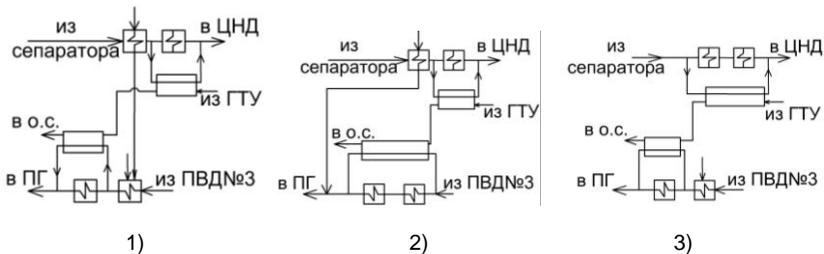


Рис. 2. Варианты комбинирования ПТС турбоустановки и ГТУ.

Из расчета схемы ГТУ (ГТ-180) и ПТС турбоустановки К-600-14,0/3000 определены параметры газа и рабочего тела (пар, вода) для расчета:

Таблица 1. Параметры рабочего тела необходимые для расчета ГПП

Наименование параметра	1ПП+1ПВД	1ПП+2ПВД	2ПП+1ПВД
Энтальпия пара на входе в ГПП, кДж/кг	2977,9	2977,7	2752,7
Энтальпия пара на выходе ГПП, кДж/кг	3188,9	3188,9	3188,9
Расход пара на входе в ГПП, кг/с	524,15	555,33	568,07

Таблица 2. Параметры газа необходимые для расчета ГПП

Наименование параметра	значение
Температура газов на выходе из газовой турбины, °С	544,7
Расход газа на выходе из газовой турбины, кг/с	617,4

Из баланса ГПП определяется температура газа на выходе из подогревателя:

$$t_{\text{вых}}^{\text{г}} = t_{\text{вх}}^{\text{г}} - \frac{D_{\text{р.т.}} \cdot (h_{\text{вых}}^{\text{р.т.}} - h_{\text{вх}}^{\text{р.т.}})}{G_{\text{г}} \cdot c_{\text{п}}^{\text{г}}} \quad (1)$$

Температура выходящих из ГПП газов, принимаем равной температуре на входе ГВП. По данным полученным из расчета ПТС и полученной температуре на входе ГВП определяем температуру газов на выходе из подогревателя при помощи формулы (1).

Таблица 3. Параметры пара необходимые для расчета ГВП

Наименование параметра	1ПП+1ПВД	1ПП+2ПВД	2ПП+1ПВД
Энтальпия воды на входе в ГПП, кДж/кг	978	857	978
Энтальпия воды на выходе ГПП, кДж/кг	1100	909	1100
Расход воды на входе в ГПП, кг/с	854,8	775,6	854,8

В случае если температуры уходящих газов оказывается недостаточно для подогрева рабочего тела паротурбинного контура, необходимо дополнительно использовать дожигательное устройство (ДУ) на выходе из ГТ и далее итеративным методом определить необходимую температуру на входе в ГПП.

Таблица 4. Результаты расчета ГПП и ГВП

Наименование параметра	1ПП+1ПВД	1ПП+2ПВД	2ПП+1ПВД
Температура газов на входе в ГПП, °С	564,7	544,7	761,7
Температура газов на выходе ГПП, °С	399,6	369,2	400,1
Температура газов на выходе ГВП, °С	236,3	307,1	236,8

Как видно из табл. 4, при вариантах 1ПП+1ПВД и 2ПП+1ПВД потребовалось установить ДУ. Для определения эффективности комбинирования необходимо определить дополнительный расход топлива подаваемого на ДУ [3]:

$$B_{\text{доп}} = \frac{G_e \cdot (c' \cdot t' - c \cdot t)}{Q_H^p - c' \cdot t'} \cdot \eta_{\text{д.у.}} \quad (2)$$

Таблица 5. **Итоговый расход топлива на ГТУ**

Наименование параметра	1ПП+1ПВД	1ПП+2ПВД	2ПП+1ПВД
Общий расход топлива на ГТУ, кг/с	15,3	14,8	20,43

Абсолютный внутренний КПД комбинированной установки определяется по формуле:

$$\eta_i^{\text{ПГУ}} = \frac{l_u^e + d \cdot l_u^n}{q_1^e + d \cdot q_1^{\text{АЭС}}} \quad (3)$$

Таблица 6. **Основные результаты расчета комбинированного цикла**

Наименование параметра	1ПП+1ПВД	1ПП+2ПВД	2ПП+1ПВД
Абсолютный внутренний КПД, %	42,6	44,2	41,9
Прирост мощности ПТУ, МВт	85,4	113,5	135

Как видно из табл. 6, схема комбинирования 1ПП+2ПВД является наиболее эффективной с точки зрения термодинамики.

Результаты анализа показывают, что с точки зрения термодинамики комбинирование АЭС и ПГУ безусловно выгодно. Однако для полной оценки необходимо учесть: стоимость предлагаемых теплообменников и их габариты, а также экономическую эффективность выработки пиковой мощности.

Литература

1. **Нуждин В.Н., Просвирнов А.А.** Союз атома и газа // Материалы инновационного форума Росатома. 2007. С. 28-33.
2. **В.А. Силин, В.М. Зорин, А.М. Тагиров, О.И. Трегубова, И.В. Белов, П.В. Поваров.** О тепловой схеме энергоблока АЭС с реактором, охлаждаемым водой сверхкритического давления // Теплоэнергетика. 2010. №12. С. 32-37.
3. **С.В. Цанов, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Учеб. Пособие – 3-е изд., стер. - М. 2009.

Исследование неравномерности паровой нагрузки пароприемного дырчатого листа парогенератора ПГВ-1000МКП

В парогенераторе ПГВ-1000мкП, разработанном окб «гидропресс» для проекта АЭС-2006, использованы основные технические решения парогенератора ПГВ-1000м, включая схему сепарации и отбора пара. отличительной особенностью является повышенная почти на 7% паропроизводительность при незначительной разнице в габаритах и площади зеркала испарения. это требует тщательного подхода к вопросам сепарации влажного пара.

Опыт исследования сепарационных характеристик на ПГ действующих АЭС показал, что парогенераторы (даже установленные на одном блоке), у которых отбор пара из парового коллектора в паропровод осуществляется со стороны "горячего" днища, имеют худшие сепарационные характеристики, чем парогенераторы, у которых отбор пара осуществляется со стороны "холодного" днища. Кроме того, жалюзийные сепараторы оказываются неэффективными в условиях повышенной удельной нагрузки зеркала испарения и на ряде действующих АЭС была произведена их замена на пароприемные дырчатые листы (ППДЛ), предназначенные для выравнивания скоростей влажного пара.

Отбор пара в паровой коллектор осуществляется через 10 патрубков, расположенных над соответствующими участками ППДЛ. Сепарация обеспечивается гравитационным осаждением капель влаги в паровом пространстве парогенератора. Осаждению капель препятствуют высокие локальные скорости пара в отдельных участках парового объема.

Предположительно, различие в сепарационных характеристиках ПГ связано с неравномерным отбором пара в паровой коллектор и с неравномерным выходом пара из рамы с погруженными дырчатыми листами (ПДЛ).

Для определения расходов пара через пароприемные дырчатые листы и паропроводящие трубы изучалась расчетная модель ОКБ «Гидропресс» (рис.1), имитирующая паровой объем, нижней границей которого являлась плоскость погруженного дырчатого листа, а верхней – плоскость, касательная верхней образующей парового коллектора. Задача решалась с помощью программного комплекса CosmosFloWorks методом конечных объемов.

Расчетная область состояла из 2114807 конечных объемов, из которых 397212 объемов принадлежали твердому телу, 849153 – текучей среде, и 864442 граничных объемов.

По нижней плоскости расчетной модели, соответствующей уровню погруженного дырчатого листа, задавался равномерный выход пара расходом 444 кг/с. На выходе из парового коллектора задавалось давление пара, равное 7 МПа с температурой, соответствующей насыщенному пару.

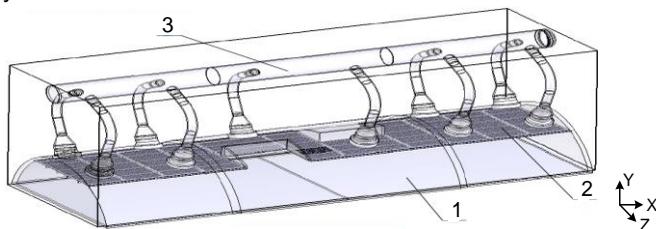


Рис. 1. Расчетная модель парового объема парогенератора ПГВ-1000МКП
1 – обечайки корпуса, 2 – погруженный дырчатый лист, 3 – паровой коллектор

Определены векторы скорости течения и давления пара, а также расходы пара через ППДЛ и паропроводящие трубы. Скорости пара в паропроводящих трубах распределяются крайне неравномерно, это обусловлено коллекторным эффектом, т.е. в трубах, ближних к выходному торцу коллектора пара, гидравлическое сопротивление меньше, чем в трубах у глухого торца коллектора, а скорости и расходы пара существенно выше. Максимальные скорости достигаются в отверстиях ППДЛ и в паропроводящих трубах, а также в областях возле выгородки коллекторов и возле листов, граничащих с корпусом ПГ.

На рис. 2 и 3 показано распределение удельного расхода пара по площади пароприемных дырчатых листов и в выходных патрубках. Черным цветом отмечены листы с расходом выше среднего; темно-серым – с расходом, близким к среднему, и светло-серым – с расходом меньше среднего.

				32,8	33,4	0			33,9	33,5
31,7	30,6	33,6	30,2	33,8	31,1	0	27,5	28,3	30	29,7
31,2	30,4	32,5	30	32,1	31,4	33,3	28	28	30,4	29,7
31,1	29,9		29,8	0	30,4	28,2	28,4	27,6	31,9	29,2
				0	34,2	28,8				33,4

Рис. 2. Удельный расход пара через дырчатые листы, кг / (с·м²)

Как видно, через дырчатые листы, примыкающие к корпусу ПГ и к выгородке коллектора теплоносителя, как правило, проходит наиболь-

ший расход пара. Это связано с тем, что поток пара, проходящий через дырчатый лист, складывается из потока, поднимающегося с зеркала испарения непосредственно под листом и потока, омывающего образующую корпуса ПГ помимо листа (либо перетекающего из-под выгородки коллектора).

Кроме того, в половине пароприемного дырчатого листа, ближнего к выходному торцу коллектора пара, значения удельных расходов пара выше, чем в половине, ближней к днищу коллектора пара. Это связано с перетоками пара из одной половины в другую. Согласно расчету без учета неравномерности выхода пара из ПДЛ, под пароприемным дырчатым листом в половину корпуса ПГ, ближнюю к выходному торцу коллектора пара, перетекает 7 кг/с пара, а над ПДЛ перетекает 27 кг/с пара. При этом максимальные скорости выхода пара из ПДЛ наблюдаются в районе "горячего" коллектора.

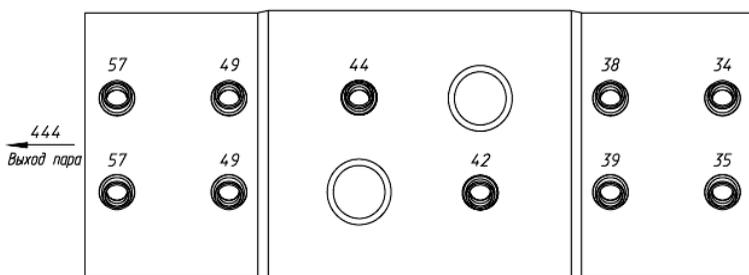


Рис. 3. Распределение расходов пара через паротводящие патрубки, кг / с

Поэтому в парогенераторе, у которого "горячий" коллектор расположен со стороны выходного торца парового коллектора, максимальные скорости выхода пара из погруженного дырчатого листа совпадают по направлению и складываются с максимальными скоростями входа пара в пароприемный дырчатый лист, еще более повышая удельный расход пара через ПДЛ и неравномерность потока пара. Наоборот, если со стороны выходного торца парового коллектора расположен "холодный" коллектор, скорости выхода пара из ПДЛ будут минимальны, повышения удельного расхода пара через ПДЛ не происходит и неравномерность потока пара не увеличивается.

Таким образом, для улучшения сепарационных характеристик парогенераторов ПГВ-1000МКП необходимо снижать неравномерность отбора пара из парового пространства, для чего рекомендуется уменьшить степень перфорации дырчатых листов, отмеченных выше черным цветом, и увеличить степень перфорации дырчатых листов, отмеченных светло-серым. После чего следует повторить расчет с учетом неравномерности выхода пара из ПДЛ.

Существенным фактором, улучшающим сепарационные характеристики ПГ, могут оказаться также компоновочные решения реакторного отделения, обеспечивающие отбор пара со всех 4-х парогенераторов в сторону днища, расположенного со стороны “холодного” коллектора теплоносителя.

Литература

1. **Лукаевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е.** Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004.
2. **Н.Б. Трунов, Б.И. Лукаевич, В.В. Сотсков, С.А. Харченко.** Прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов. 7-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам, г. Подольск, Октябрь 2006.

А.Г. ИЛЬЧЕНКО к.т.н., доцент,
Д.В. СЕДОВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Возможность применения струйных насосов-подогревателей в системе регенерации низкого давления ПТУ

В настоящее время все более широкое применение в технике находят смешивающие струйные подогреватели. Главными их достоинствами являются относительная простота конструкции, вследствие отсутствия движущихся частей, отсутствие недогрева среды, низкая требовательность к ее качеству, отсутствие потребности в электропитании. В настоящее время струйные аппараты применяются в России и за рубежом в основном во вспомогательных системах [1]. Ведутся исследования возможности применения струйных насосов в качестве насосов в системах безопасности, локализации, пожаротушения. При этом аппараты используются в качестве насоса, дополнительной функцией которого является некоторый подогрев воды. Но наиболее интересным представляется применение струйных насосов-подогревателей, работающих по принципу пароводяного инжектора (СНП) [2] в системе регенерации турбоустановки. Замена поверхностных и смешивающих подогревателей низкого давления на СНП позволит значительно упростить тепловую схему турбоустановки и сократить капитальные затраты, поскольку СНП очень компактны и обладают малой металлоемкостью. Кроме того, включение СНП в систему регенерации позволит отказаться, по крайней мере, от одной группы конденсатных насосов. Также снизятся затраты на техобслуживание и ремонт, а так же повысится надежность работы системы регенерации. При

правильном выборе параметров возможно также увеличение тепловой экономичности турбоустановки..

Струйный насос-подогреватель работает по принципу пароводяного инжектора, работающего на скачке конденсации [3]. При правильном выборе геометрических и рабочих параметров инжектора, можно получить давление на выходе из струйного аппарата значительно больше, чем давление рабочей среды. Таким образом, аппарат выполняет одновременно функции теплообменника и насоса. В настоящий момент не существует точного теоретического описания процессов, протекающих в струйных аппаратах. Особой сложностью характеризуются процессы, протекающие в камере смешения струйных аппаратов, работающих на двухфазной среде, однако проведенные опытные исследования [3, 5] позволяют рассмотреть наиболее существенные свойства потоков газа и жидкости в инжекторе и их взаимодействие. Общие методы расчета струйных аппаратов и пароводяных инжекторов в частности достаточно подробно разработаны в работах Н. М. Зингера и Е. Я. Соколова [4].

Принципиальная схема пароводяного инжектора и графики изменения давления в отдельных его элементах приведены на рис.1.

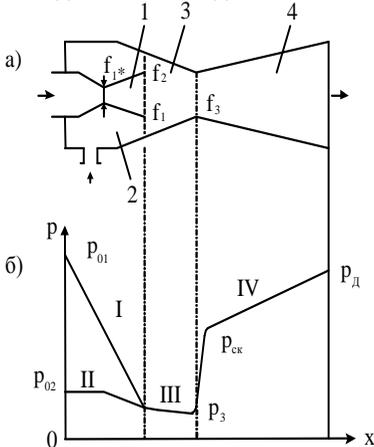


Рис. 1. Принципиальная схема пароводяного инжектора (а) и график изменения давления (б): 1–паровое сопло; 2–водяное сопло; 3–камера смешения, 4 – диффузор; I – рабочий пар; II – инжектируемая жидкость; III – двухфазная смесь; IV – однофазная жидкость

Пар, расширяясь в сопле, попадает в камеру смешения, где происходит обмен импульсом с холодной жидкостью и одновременно конденсация. Процессы в камере смешения чрезвычайно сложны. Кроме обмена импульсом и теплообмена интенсивно протекают фазовые переходы. На очень коротких длинах меняется структура потока от капельного до пузырькового, где скорость звука резко падает, и при абсолютных умеренных скоростях поток становится сверхзвуковым ($M > 1$), появляется скачок уплотнения (скачок конденсации). После скачка конденсации в камере смешения (рис. 1) движется однофазная жидкость, при этом происходит ее дальнейшее сжатие в диффузоре до давления P_d .

Для стационарных режимов работы на номинальном уровне мощности был проведен расчет тепловых схем турбоустановок К-220-44 [6] и К-1200-6,8/50 [7]. В обоих случаях сравнивалась эффективность применения СНП в системах регенерации низкого давления турбоустановок

по сравнению со стандартными схемами, использующими смешивающие и поверхностные теплообменники.

В качестве модернизации системы регенерации турбоустановки К-220-44 было предложено заменить все пять поверхностных ПНД, три сливных и один конденсатный насос тремя СНП. Проведенный расчет показал экономическую эффективность данной модернизации при незначительном снижении тепловой экономичности (мощность «нетто» снизилась на 1 МВт) вследствие значительного снижения капитальных затрат, затрат на техобслуживание и ремонт. Основной причиной снижения экономичности стал выбор только трех ступеней подогрева ввиду сложности расчетов. Очевидно, что в случае увеличения их количества тепловая экономичность вырастет.

В качестве модернизации системы регенерации турбоустановки К-1200-6,8/50 было предложено заменить два подогревателя (второй смешивающий ПНД и третий поверхностный ПНД) двумя и установить КЭН-2 не после второй, а после третьей ступени подогрева. Проведенный расчет также показал некоторое снижение мощности нетто турбоустановки (почти на 1,5 МВт), и увеличение общей экономичности вследствие снижения капитальных затрат.

Таким образом, применение струйных насосов-подогревателей в системах регенерации турбоустановок является экономически целесообразным для новых блоков и блоков, проходящих продление срока эксплуатации. Выбор количества и параметров СНП в настоящее время является оптимизационной задачей, открытой для рассмотрения. Также промышленное применение СНП в системе регенерации турбоустановки требует обоснования. Для этого необходимо провести расчет СНП в совокупности с расчетом тепловой схемы турбоустановки при переменных режимах работы.

Литература

1. **Williams M.**, Stewart P. WM 2010 CONFERENCE PAPER 10225, Phoenix, Arizona, the USA
2. **Trela M.**, Kwizdzinski R., Gutuch J., Butrymowich D. Feasibility study on application of steam injectors as feedwater heaters in supercritical Rankine cycle. Szewalcki Inst of fluid Flow Machinery. Arch. Thermodyn. 2009. 30. №4
3. **Фисенко, В.В.** Сжимаемость теплоносителя и эффективность работы контуров циркуляции ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Соколов, Е.Я.**, Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат.
5. **Циклаури, Г.В.**, Данилин В.С., Селезнев Л.И. Адиабатные двухфазные течения. – М: Атомиздат, 1973.
6. **Ильченко А.Г.**, Седов Д.В. Обоснование возможности применения струйных насосов-подогревателей в системе регенерации ПТУ //Повышение эффективности энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 9. – М.: Энергоатомиздат, 2009

Исследование влияния распределения среднего диаметра по проточной части на экономичность турбины

Заключительным этапом при изучении дисциплины «Турбомашины АЭС» является выполнение курсового проекта на тему «Эскизное проектирование паровой турбины».

Тепловой расчет турбины выполняется в два этапа: предварительный (ориентировочный) расчет и подробный (детальный) расчет.

Методика ориентировочного расчета регулирующей ступени, определения размеров первой и последней ступени, изложенная в [1,2], не вызывает трудностей, так как представляет собой алгоритм.

Распределение среднего диаметра по проточной части – важный этап ориентировочного расчета турбины. Оно влияет на распределение общего теплоперепада турбины по ступеням, на число ступеней. Кроме того определяет совершенство исполнения проточной части и экономичность турбины, как в целом, так и по ступеням.

В [1,2] построение линии среднего диаметра предполагает задавать значения диаметра промежуточных ступеней вручную. При этом рекомендации к построению не трактуются единственным образом, и характер изменения плавности проточной части определяет тот, кто строит.

Способ построения линии среднего диаметра в соответствии с изменением объемного расхода (GV), изложенный в [2] также не является совершенным и универсальным.

В работе предложен более совершенный подход к формированию распределения среднего диаметра и вспомогательных параметров путем введения коэффициента формы проточной части k_ϕ .

Функцию, пропорционально которой строится линия средних диаметров от d^1 до d^z , можно представить в виде:

$$f_i = Gv_i \cdot (1 - k_\phi) + k_\phi \cdot (Gv_0 + \frac{(Gv_n - Gv_0)}{n} \cdot i),$$

где: n - число участков, на которое разбита проточная часть; i - номер участка; Gv_i – объемный расход на данном участке проточной части.

При $k_\phi = 0$ линия средних диаметров будет строиться пропорционально изменению объемного пропуска пара. k_ϕ , близкий к 0 рекомендуется принимать при проектировании цилиндра низкого давления.

При $k_\phi = 1$ линия средних диаметров будет изменяться по линейному закону. k_ϕ , близкий к 1 рекомендуется принимать при проектировании

цилиндра с высокими параметрами пара.

В соответствии с вышеизложенным, проведен ряд ориентировочных и детальных расчетов одноцилиндровой конденсационной турбины с фиксированными начальными и конечными параметрами пара и постоянным расходом по проточной части.

Расчеты выполнены с использованием программного обеспечения по курсу «Турбомашины АЭС». Детальный расчет проводился для всех комбинаций следующих параметров проточной части:

- Варианты к-та формы, $k_{\phi} = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$;
- Варианты первой ступени, $L_1 = 15, 20, 23, 25, 30$ мм;
- Варианты последней ступени, $\theta^{\pm} = 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5$;

Оценить, насколько приемлем проведенный ориентировочный расчет можно лишь по результатам детального расчета. При этом для детального расчета необходимо задать широкий ряд параметров, часть из которых не является результатом ориентировочного расчета, а относится к конструктивному исполнению ступеней. При ручном способе формирования данных число рассматриваемых вариантов ограничено в силу трудоемкости.

Исследуемое в работе множество вариантов распределения среднего диаметра показало, что для каждой совокупности вариантов первой и последней ступени можно подобрать такое построение проточной части, при котором получившаяся турбина будет иметь максимальный КПД, а, следовательно, и мощность при заданном расходе (рис. 1).

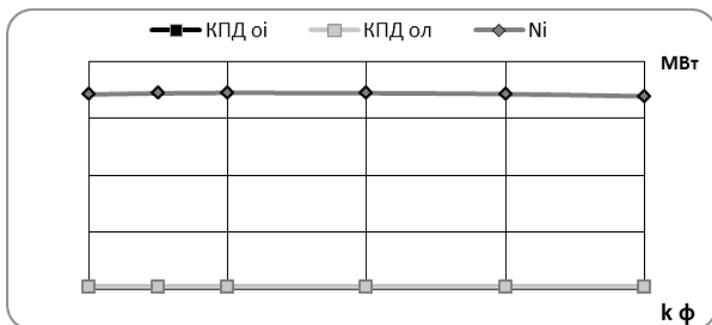


Рис. 1 Влияние коэффициента формы на экономичность турбины

Данные, полученные из детального расчета, позволяют анализировать не только КПД и мощность проектируемой турбины, но и плавность радиального очертания ее проточной части и распределение значения углов выхода потока по проточной части.

Так, для оптимального варианта расчета по заданным высотам лопаток, изменение угла $\alpha_{1э\phi}$ по проточной части имеет отклонения от рекомендуемого распределения, хотя они не превышают 2° (рис.2).

Поэтому, заключительным этапом детального расчета является корректировка распределения $\alpha_{1эф}$ вручную и окончательный расчет варианта по заданным углам выхода потока.

При этом, внутренний относительный КПД изменился незначительно (прирост относительно детального расчета по заданным высотам составил от 0,01 до 0,04%).

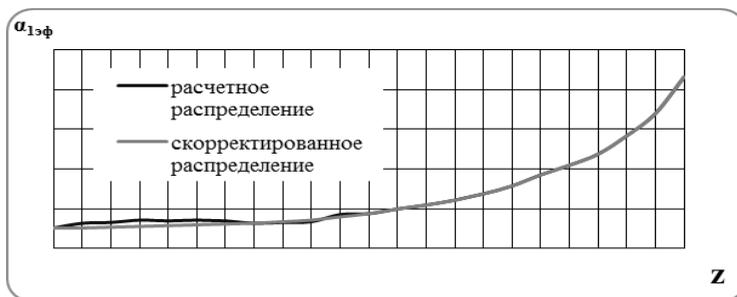


Рис. 2. Распределение угла потока за сопловой решеткой

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный способ построения линии среднего диаметра позволяет найти такое распределение, при котором внутренний относительный КПД получившейся турбины будет максимальным. Данный подход рекомендуется для учебного проектирования турбомашин.

2. Ориентировочный расчет турбины не имеет смысла без дальнейшего детального расчета.

3. Программное обеспечение для учебного проектирования турбомашин должно представлять собой единый комплекс программ, чтобы не исключалась возможность корректировки параметров любого этапа расчета без потери результатов других этапов, как предшествующих корректировке, так и следующих за ней.

Литература

1. Капелович Б.Э. Тепловой расчет паровых турбин: учебное пособие / Б.Э. Капелович. – Иваново: ИГЭУ, 1985 – 80 с.
2. Рабенко В.С. Предварительный расчет паровых турбин: учебное пособие. – Иваново: ИГЭУ, 1987 – 97с.

Математические модели определения остаточного ресурса энергетического оборудования стареющих электрических станций

Энергетическое оборудование многих стареющих электрических станций, работающее в тяжелых условиях резкопеременных нагрузок, приближается к исчерпанию своего ресурса. В сложившейся ситуации для исключения катастрофических последствий, связанных с выходом из строя указанных аппаратов, требуется решить две взаимосвязанные задачи. С одной стороны, необходима организация постоянного многопараметрического контроля состояния оборудования. С другой стороны, на основе поступающей информации об оборудовании необходимо прогнозировать его состояние на будущее. Причем, у оператора, в данный момент управляющего объектом, должен быть под руками электронный паспорт прогноза состояния объекта по одному или двум главным параметрам, выход за пределы которых может привести к повреждению объекта. При этом оператор должен держать руку на "пульсе" объекта, т.е. функция прогноза должна в режиме реального времени оперативно обновляться и верифицироваться на основе вновь поступающей информации об объекте. Таким образом, разработка математических моделей прогнозирования состояния энергетического оборудования является одним из важных этапов организации ремонта оборудования по его состоянию.

Для решения поставленной задачи необходимо сформулировать физико-математическую модель роста дефектов в оборудовании и верифицировать ее на основе данных мониторинга объекта. В соответствии с этим все дефекты, возникающие в оборудовании, разделим на крупные и мелкие. Крупные (внезапные) повреждения оборудования являются событиями чрезвычайно редкими и плохо предсказуемыми. Накопление мелких дефектов определяет процесс старения оборудования и, стало быть, его ресурс. Задача прогноза ресурса оборудования, обусловленного его старением, должна заключаться в определении времени достижения числом дефектов некоторого критического значения, превышение которого не допустимо. До наступления названного момента времени устройство должно либо сниматься с эксплуатации, либо подвергаться капитальному ремонту. Старение оборудования вызвано действием многих механизмов: тепловым и динамическим режимом работы, физико-химическими процессами на поверхности металла, обуславливающими коррозию и растрескивание, изменением структуры металла под действием нагрузок и пр. При взаимодействии

таких перекрестных механизмов деградации установить точно динамический закон, учитывающий все эти факторы, вряд ли возможно, поэтому в математической модели можно претендовать лишь на отражение наиболее существенных черт этого закона.

Математические модели могут быть детерминированными и стохастическими. Детерминированный уровень описания основывается на динамическом законе, позволяющем прогнозировать рост дефектов точно без учета их флуктуаций. Стохастический способ описания основывается на том факте, что рассматриваемый процесс старения объекта является случайным и подчиняется вероятностному закону. Этот способ описания является наиболее полным, т.к. наряду со средними величинами дефектов позволяет прогнозировать дисперсию числа дефектов. Детерминированный способ описания эквивалентен прогнозированию средних величин при вероятностном подходе, т.е. в сущности является составной частью стохастического описания.

Существующие стохастические математические модели прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования электрических станций можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, касающиеся среднестатистических показателей каждого типа оборудования. Это модели, основанные на анализе зависимости отказов оборудования от времени, это методы механики линейного суммирования повреждений, методы параметрического прогнозирования, модели "нагрузка-несущая способность", модели на основе механики разрушений, а также различные вероятностные модели. В моделях этого типа исследуются характеристики группы идентичных единиц оборудования, работающих в одинаковых условиях. Эти модели позволяют оценить ресурс некоего среднестатистического объекта, и не пригодны для прогнозирования состояния каждой конкретной единицы оборудования. Они весьма важны на стадии проектирования оборудования и на начальной стадии эксплуатации, когда аппаратура далека от исчерпания своего ресурса.

Ко второй группе относятся методы индивидуального прогнозирования. При этом используются как чисто динамические, так и стохастические модели: метод линейной фильтрации, метод нейронных сетей, метод фильтров, а также авторегрессия с обучением. Решающее значение для всех моделей, определяющих достоверность индивидуального прогнозирования, имеет выбор функции прогноза. Этот выбор обычно делается непосредственно на основе математической обработки результатов обследования объекта с использованием различных распределений (экспоненциального распределения, распределения Пуассона, Вейбулла и пр.).

Анализ математических моделей прогнозирования и результаты обследования состояния оборудования электрических станций показали, что прогноз должен проводиться индивидуально на стохастическом уровне описания. На наш взгляд для постановки теории прогноза на твердую научную основу функция прогноза должна определяться не

произвольным подбором подходящей функции распределения вероятностей, а на основе выявления физического закона роста дефектов в элементах оборудования. Этот закон, определяемый комплексом выше-названных условий в каждом конкретном случае, в силу той или иной комбинации этих условий, будет принимать разные формы, сохраняя при этом свои главные общие черты. В силу изменчивости этих условий прогноз должен верифицироваться на основе постоянно поступающих сведений об объекте исследования и результатом должна быть разработка программы электронного паспорта прогноза и его верификации в ходе эксплуатации. Этот паспорт должен находиться у оперативного персонала, эксплуатирующего объект.

В соответствии с теорией стохастических процессов переход от детерминированного способа описания к стохастическому может быть осуществлен двумя различными способами. Один из них может быть основан на стохастическом уравнении Ланжевена. Он заключается в следующем. В динамическое уравнение, определяющее рост числа дефектов N в системе на детерминированном уровне $Q(N,t)$, в правую часть уравнения добавляется случайная составляющая для потока дефектов $q(N,t)$

$$\frac{dN}{dt} = Q(N,t) + q(N,t). \quad (1)$$

Таким образом, скорость роста дефектов определяется детерминированным и случайным потоками. Уравнение (1), содержащее случайный поток, относится к классу стохастических дифференциальных уравнений. При этом предполагается, что случайный поток $q(N,t)$ удовлетворяет следующим условиям:

$$\begin{aligned} \langle q(N,t) \rangle &= 0, \quad \langle \frac{\partial q}{\partial N} \rangle = 0, \\ \langle q(N,t) \cdot \frac{\partial q}{\partial N} \rangle &= C(N,N) \delta(t-t'). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь знак угловых скобок означает усреднение по всему спектру реализаций случайной функции $q(N,t)$, а $\delta(t-t') - \delta$ – функция Дирака от указанного аргумента. Второе выражение в (2) представляет собой автокорреляционную функцию.

Второй способ описания основывается на формулировании уравнения не для самой случайной величины, а для вероятности того, что эта величина принимает то или иное значение. Здесь можно использовать как уравнение Колмогорова, так и уравнение Фоккера-Планка. Как показывает проведенный нами анализ, для марковских процессов оба подхода приводят к одинаковым результатам, т.е. они равноправны. Таким образом, задачей прогнозирования является предсказание зависимости среднего числа дефектов от времени и дисперсии их распределения. По этим предсказаниям будет определен промежуток времени, в течение которого объект достигнет своего предельного состояния.

УДК 61:001.8

Н.А. РАЗОРЕНОВА, вед. программист,
С.И. БОРОДУЛИНА, дир. библиотеки,
О.Г. ТРУХИНА, нач. патентно-лицензионного отдела,
(ИГЭУ), г. Иваново

Применение наукометрических показателей публикационной активности для оценки научно-исследовательской деятельности

Количественными критериями отбора заявок, представляемых на конкурс на получение грантов Минобразования Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования являются:

- количество статей ведущего ученого в научной периодике, индексируемой иностранными и российскими организациями (WebofScience, Scopus, Российский индекс научного цитирования);

- индекс Хирша ведущего ученого;

- индекс цитирования 10-ти лучших публикаций ведущего ученого;

- совокупный импакт-фактор статей ученого за последние 5 лет

- совокупный импакт-фактор статей вуза по направлению исследований за 2008-2010 годы за последние 3 года.

Следует отметить, что для многих кандидатов и докторов наук эти критерии явились полной неожиданностью, а их определение было связано с большими трудностями.

В докладе даются краткие формулировки наукометрических показателей, возможности их определения, приводится анализ публикационной активности Ивановских вузов по базе РИНЦ и предложения для повышения индексов цитирования и индекса Хирша.

Сегодня в наукометрии для оценки результативности научно-исследовательской деятельности используется три главных показателя: индекс цитируемости, индекс Хирша, импакт-фактор.

ИНДЕКС ЦИТИРОВАНИЯ

Материал из Википедии – свободной энциклопедии

Индекс цитирования научных статей (ИЦ) – реферативная база данных научных публикаций, индексирующая ссылки, указанные в приставных списках этих публикаций и предоставляющая количественные показатели этих ссылок (такие как суммарный объем цитирования, индекс Хирша и др.). Первый индекс цитирования был связан с юридическими ссылками и датируется 1873 г. (Shepard's Citations). В 1960 году Институт научной информации (ISI), основанный Юджином Гарфилдом, ввел первый индекс цитирования для статей, опубликованных в научных журналах, положив начало такому ИЦ, как «Science Citation Index (SCI) (англ.)», и затем включив в него индексы цитирования по обще-

ственным наукам («SocialSciencesCitationIndex», SSCI) и искусствам («ArtsandHumanitiesCitationIndex», AHCI). Начиная с 2006 г. появились и другие источники подобных данных, например GoogleScholar. Данный ИЦ выпускается в ограниченном варианте на CD, а полностью представлен в онлайн-проекте WebofScience.

ИМПАКТ-ФАКТОР

Материал из Википедии – свободной энциклопедии

Импакт-фактор (ИФ, или IF) – численный показатель важности научного журнала. С 1960-х годов он ежегодно рассчитывается Институтом научной информации (англ. Institute for Scientific Information, ISI), который в 1992 году был приобретен корпорацией Thomson и ныне называется Thomson Scientific и публикуется в журнале «Journal Citation Report».

ИНДЕКС ХИРША

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

h-индекс, или индекс Хирша — наукометрический показатель, предложенный в 2005 американским физиком Хорхе Хиршем из университета Сан-Диего, Калифорния. Индекс Хирша является количественной характеристикой продуктивности ученого, основанной на количестве его публикаций и количестве цитирований этих публикаций. Индекс вычисляется на основе распределения цитирований работ данного исследователя. Хирш пишет: Ученый имеет индекс h, если h из его Np статей цитируются как минимум h раз каждая, в то время как оставшиеся (Np — h) статей цитируются не более, чем h раз каждая.

Вопрос получения информации из зарубежных систем научного цитирования можно решить с помощью Web of Science (компания Thomson Reuters) Scopus (Elsevier)/ Web of Science (Thomson Reuters).

В России подсчет основных наукометрических показателей осуществляется в информационно-аналитической системе «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ) (проект стартовал в 2005 году: <http://elibrary.ru>) [1].

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) - это национальная информационно-аналитическая система, аккумулирующая более 2,3 миллионов публикаций российских авторов, а также информацию о цитировании этих публикаций из более 3500 российских журналов. Она предназначена не только для оперативного обеспечения научных исследований актуальной справочно-библиографической информацией, но является также и мощным инструментом, позволяющим осуществлять оценку результативности и эффективности деятельности научно-исследовательских организаций, ученых, уровень научных журналов и т.д.

В основе системы лежит библиографическая реферативная база данных, в которой индексируются статьи в российских научных журналах. В последние годы в РИНЦ стали включаться также и другие типы научных публикаций: доклады на конференциях, монографии, учебные пособия, патенты, диссертации. База содержит сведения о выходных данных, авто-

рах публикаций, местах их работы, ключевых словах и предметных областях, а также аннотации и пристатейные списки литературы.

Таблица 1. Данные публикационной активности Ивановских вузов по базе РИНЦ на 27.02.2013 г.

Общие показатели	ИГЭУ	ИГХТУ	ИГУ	ИГАСИ
Общее число публикаций в РИНЦ	1337	5106	2692	379
Суммарное число цитирования публикаций	530	7695	1859	147
Число авторов	196	697	410	53
Индекс Хирша	7	25	16	5
Позиция в рейтинге российских научно-исследовательских организаций	484	75	293	1117

Можно критически относиться к рейтингам, можно сомневаться в объективности применения наукометрических показателей для оценки научно-исследовательской деятельности вузов и преподавателей, однако в настоящее время Минобрнауки РФ работает над новым проектом «Карта науки России». По словам зам. министра И.Федюкина планируется свести на новой IT-платформе базы данных WebofScience, Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), базы патентов, а затем и другие базы данных. Таким образом, главными индикаторами научной деятельности уже в ближайшее время станут публикации в научных журналах, цитируемость статей и число патентов. Первая бета-версия «Карты» должна появиться в конце марта – начале апреля 2013 года. Игорь Федюкин выразил надежду, что этот инструмент научной политики будет готов к концу 2013 года. Представители Министерства, отвечая на вопросы журналистов, также отметили, что участие ученых в работе над «Картой российской науки» будет сугубо добровольным. Из их ответов можно было понять, что будет использована политика мягкого принуждения, когда для получения гранта или другой финансовой или организационной помощи от государства, организации и ученые сами будут заинтересованы в том, что их научная работа была полно и точно отражена в новой базе данных со всеми наукометрическими показателями публикационной активности.

Литература

1. Википедия. Свободная энциклопедия (Электронный ресурс). Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Цитата>
2. Научная электронная библиотека eLibrary.ru [Электронный ресурс]. –URL: <http://elibrary.ru>. – (дата обращения 26.02.2013г.).
3. . **Муравьёва Марина**. На карте науки отметят лидеров http://www.stf.ru/material.aspx?d_no=50789&CatalogId=221&print=1 (дата обращения 28/02/2013)
4. Минобрнауки оценит работу российских ученых. Ю.Медведев <http://www.rg.ru/2012/12/13/karta-site.html>

Подсекция «ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ
И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ»

УДК 621.187

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор,
Е.А. КАРПЫЧЕВ, аспирант
(ИГЭУ), г. Иваново

**Определение содержания гуминовых веществ
в природной воде**

Органические вещества поступают в открытые водоёмы в результате:

- вымывания их из почв и торфяников;
- жизнедеятельности, отмирания и разложения водных организмов;
- смывания веществ, применяемых для удобрения почвы и борьбы с вредителями сельского хозяйства;
- поступления неочищенных или недостаточно очищенных бытовых или производственных сточных вод.

Нежелательными загрязнениями, вносимыми этими стоками, являются, в частности, моющие синтетические средства – детергенты, вызывающие пенообразование в осветлителях, затрудняющие очистку воды и применение флокулянта.

Состав органических веществ весьма разнообразен, изменчив во времени и различен для разных водоемов.

Вещества, вымываемые из почв, называют гумусовыми. Они разделяются на гуминовые и фульвокислоты и их соли. Особенно загрязнены ими реки, имеющие сток из болот. Гуминовые кислоты находятся в водоёмах в основном в коллоидно-дисперсном состоянии, растворяются при увеличении рН, при подкислении образуют тёмный хлопьевидный осадок. Относительная молекулярная масса гуминовых кислот от 1200 до 1400, примерная формула $C_{80}H_{52}O_{24}(COOH)_4$. Они содержат по массе от 52 до 58 % углерода, от 3,3 до 4,8 % водорода, от 34 до 39 % кислорода. Водород карбоксильных групп кислот способен замещаться катионами, в результате чего образуются соли, называемые гуматами. Гуматы кальция, железа и алюминия малорастворимы, гуматы натрия растворимы. Гуминовые кислоты могут образовывать с гидроокисями железа и алюминия коллоидно-дисперсные комплексные соединения.

Фульвокислоты (креновые и апокреновые кислоты) содержат в среднем по массе от 45 до 48 % углерода, от 5,2 до 6 % водорода, от 43 до 48 % кислорода. Они образуют с натрием, калием, аммонием, кальцием и двухвалентным железом растворимые соли, а с трёхвалентным железом и алюминием – малорастворимые соли. Наиболее окрашенные соединения – гуминовые кислоты, наименее - фульвокислоты [1,2,3].

Для количественной характеристики содержания органического вещества используют косвенные методы. Таких методов существует

довольно много. По Б. А. Скопинцеву, они подразделяются на следующие группы: 1) химические методы, основанные на: а) вычислении вещества через отдельные элементы и их группы, входящие в органическое вещество (С, N, P, альбуминоидный азот), б) характеристике по количеству кислорода, расходуемого окислителями [KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Cl}(\text{SO}_4)_2$ и др.]; 2) физические и физико-химические методы, основанные на характеристике по цветности воды, спектру поглощения, показателю преломления и пр.; 3) биохимические и биологические методы (биохимическое потребление кислорода – БПК, бактериологическое и гидробиологическое исследование).

Наиболее распространенными являются методы характеристики содержания органического вещества по количеству кислорода, расходуемого на его окисление. Это – так называемая величина окисляемости воды. Наиболее полно окисляется органическое вещество при бихроматном методе (ХПК) 90-95%, менее – при перманганатном методе около 40-45 % [4].

Для вычисления углерода, содержащегося в органическом веществе $C_{\text{углерода}}$, надо величину бихроматной окисляемости ХПК в $\text{мгО}/\text{дм}^3$ умножить на коэффициент 0,375 (то есть 12/32), для перманганатной окисляемости O_k этот коэффициент близок к единице (1). Принимая, что углерод составляет около 50 % от массы органического вещества, для вычисления примерного содержания органического вещества $C_{\text{орг.в.в.}}$ надо найденное количество углерода удвоить [4]. Получается следующая формула расчета концентрации органических веществ в воде (2).

$$C_{\text{углерода}} \approx 0,375 \cdot \text{ХПК} \approx O_k \quad (1)$$

$$C_{\text{орг.в.в.}} \approx 0,75 \cdot \text{ХПК} \approx 2,0 \cdot O_k \quad (2)$$

В рамках вышесказанного, с учетом процента окисления органических веществ, диапазон значений отношения окисляемости воды при перманганатном методе к бихроматному методу составит 0,44-0,47, или среднее значение 0,455. Получается более точная формула расчета содержания органического вещества в воде, через определение перманганатной окисляемости (3).

$$C_{\text{орг.в.в.}} \approx 0,75 \cdot \text{ХПК} \approx 1,65 \cdot O_k \quad (3)$$

С другой стороны с учетом того, что большая часть органических веществ в воде находится в виде гуминовых веществ, то полученная формула несколько изменится.

По литературным данным [5] по отношению к действию кислот гуминовые вещества разделяют на гуминовые кислоты, осаждаемые при $\text{pH}_{25}=1$, и на фульвокислоты, остающиеся при этом значении pH_{25} в растворе. Последние в свою очередь делят на коллоидно-дисперсные и истинно-растворённые фульвокислоты. Первые осаждаются с гидроксидом алюминия, вторые не выделяются из раствора этим способом.

Метод, по которому проводился расчет формулы определения содержания гуминовых веществ предназначается для анализа природных вод, не загрязнённых (или очень мало загрязнённых) промышленными

стоками, то есть таких вод, в которых содержание гуминовых веществ значительно превосходит содержание всех других органических веществ [6,7].

Метод состоит в разделении указанных трех видов гуминовых веществ и определении их бихроматной окисляемости (ХПК). Результаты определения выражают в мгО/дм³. По полученным результатам, так же как и в предыдущем методе, примерно рассчитывают содержание углерода в этих веществах (1), умножая результаты определения на 0,375, и еще менее точно найти содержание самих гуминовых веществ, умножая содержание углерода на коэффициент 1,7 (для гуминовых кислот) и 2,2 (для фульвокислот).

С учетом того, что в природной воде содержание фульвокислот превышает содержание гуминовых кислот более чем в 10 раз (около 10%), коэффициент для расчета содержания гуминовых веществ $C_{\text{гумин.в.в.}}$ составит примерно $1,7 \cdot 0,1 + 2,2 \cdot 0,9 \approx 2,15$ (4).

$$C_{\text{гумин.в.в.}} \approx 0,806 \cdot \text{ХПК} \approx 2,15 \cdot \text{Ок} \quad (4)$$

Полученные формулы могут быть использованы для оценки сорбционных характеристик шлама, образующегося при коагуляции природных вод.

Литература

1. Некрасов Б. В. Курс общей химии. Госхимиздат, 1962.
2. Клячко В. А., Апельсин И. Е. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения. Стройиздат, 1962.
3. Мартынова О. И. Коагуляция при водоподготовке. Госэнергоиздат, 1951.
4. О. А. Алёкин. Основы гидрохимии. Гидрометеорологическое издание. Ленинград, 1953 г. 295 с.
5. Унифицированные методы анализа вод. Издание второе исправленное. Под ред. Ю. Ю. Лурье. Изд-во «Химия». М. 1973 г.
6. Воронков П. П., Соколова О. К., Труды Государственного гидрологического института, 33, 87 (1951).
7. Тюрин И. В., Органическое вещество почв, М., 1937.

УДК 621.187.11

А.Б. ЛАРИН, к.т.н., доцент;
А.В. КОЛЕГОВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Водный режим и химконтроль блока ПГУ (ГТЭС «Терешково»)

В соответствии с требованиями к качеству питательной и добавочной воды качество питательной воды котлов-утилизаторов ПГУ отвечает качеству питательной воды барабанных энергетических котлов с давлением 13,8 МПа. При использовании гидразин-аммиачного водно-

химического режима (ГАВР) контроль качества ионных примесей питательной воды может строиться на основе измерений χ , χ_n , pH подобно тому, как разработано для питательной воды котлов с $p_6=13,8$ МПа.

Расчет концентраций ионных примесей котловой воды контуров низкого (КНД) и высокого (КВД) давления энергоблока ПГУ может строиться на базе математической модели ионных равновесий котловой воды барабанных котлов СВД ($p_6 = 13,8$ МПа). В данном случае – для энергоблока ГТЭС «Терешково» - математическая модель была видоизменена с учетом неполноты выноса аммиака в пар и отсутствия фосфатов, однако, с добавлением в котловую воду NaOH. В условиях измерения в питательной воде значений χ , χ_n , pH можно считать известными концентрации $[\text{NH}_3]_{\text{пв}}$, $[\text{Cl}^-]_{\text{пв}}$, $[\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}}$ в питательной воде.

В связи с периодическим превышением рекомендуемых норм по отдельным показателям, в октябре – декабре 2012 года сотрудниками кафедры ХХТЭ ИГЭУ проведено обследование энергоблока ПГУ ГТЭС «Терешково» (г. Москва). Анализ состояния химического контроля и водно-химического режима энергоблока ГТЭС «Терешково» с использованием расчетных методик выявил ряд нарушений.

Сравнение результатов измерений pH питательной воды энергоблока ГТЭС «Терешково», выполненных pH-метрами с проточной потенциометрической ячейкой и Deltoson pH, показывает завышение значений pH по измерениям Deltoson pH. Данный факт связан с присутствием угольной кислоты в концентрациях существенно больших (более чем в 10 раз) по сравнению с концентрацией NaCl в анализируемой пробе, что выводит анализатор Deltoson pH за допустимые пределы использования, а в питательном тракте вызывает повышенную коррозию.

УДК 621.187

Е.В. КОЗЮЛИНА, к.т.н., доцент
А.Б. ЛАРИН, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Достоверность косвенного определения ионогенных примесей водного теплоносителя барабанных котлов по результатам измерения удельной электропроводности и pH

Учитывая возможные нарушения в работе приборов химконтроля [1], следует перед поиском причины нарушений ВХР проверить результаты измерений на *приемлемость*. Термин приемлемости вводится в ГОСТ 5725-6-2002 [2] и рекомендуется для химконтроля теплоносителя АЭС.

Данные АХК, не получившие обобщенного признака приемлемости,

не заносятся в базу данных и требуют дополнительной проверки и устранения причин, вызвавших это явление.

Можно выделить несколько методов проверки приемлемости результатов измерений и установления окончательного результата лабораторного химического контроля и автоматического химконтроля в зависимости от того, является или нет измерение дорогостоящим, причем термин «дорогостоящее» должен истолковываться не только с финансовой точки зрения, но и, исходя из того, является ли измерение сложным, затруднительным или трудоемким. С учетом квалификации операторов и степени рутинности выполняемых на ТЭС и АЭС анализов предусматривается применять методы проверки с минимальным количеством дополнительных анализов (один – для дорогостоящих методов анализа, два – для не дорогостоящих) и использовать следующие критерии отбраковки результатов лабораторного и автоматического химконтроля [3]:

- по превышению расхождения результатов двух измерений;
- по превышению диапазона результатов первичных и дополнительных измерений значения критического диапазона.

Так же следует отметить, что при принятии решения о причине нарушения необходимо опираться не только на изменение показаний какого-либо одного прибора (т.е. на изменение только удельной электропроводности или рН пробы), а на изменение показаний и кондуктометра (изменение удельной электропроводности χ и χ_n) и рН-метра (изменение рН).

Наряду с *надежностью* важным показателем для обработки информации в СХТМ является *точность* измерений.

Точность измерения электропроводности и рН, являющихся измерительной базой расчетной методики, определяется классом точности приборов АХК. Погрешность измерений составляет 1,5-2,0 % для кондуктометра и 0,05 ед. рН – для рН-метра при условии калибровки и поверки согласно требований паспорта прибора. Однако, при измерениях в бесконечно разбавленных растворах, какими является турбинный конденсат и питательная вода энергетических котлов, калибровка приборов по стандартным растворам становится не представительной. Правильность полученных результатов прямых и косвенных измерений в этом случае может быть поставлена под сомнение.

Выбор метода обработки результатов определяется задачами дальнейшего использования результатов.

В данном случае экспериментальные исследования (измерения) и анализ результатов проводились с целью метрологической оценки разработанного расчетного алгоритма косвенного определения нормируемого показателя, например концентрации фосфатов, по измерению удельной электропроводности (χ и χ_n) и рН охлажденной пробы водного теплоносителя энергоблока. В ходе промышленного эксперимента на ИвТЭЦ - 3 проводились измерения в потоке охлажденной пробы водно-

го теплоносителя анализатором «АПК - 051» значений X_n , рН и температуры. По измеренным и приведенным к 25 °С значениям контролируемых параметров рассчитывались концентрации фосфатов в чистом и солевом отсеках. Параллельно проводился химический анализ проб воды на фосфаты.

В соответствии с ГОСТ 8.207-76 (переиздание 1991 г.) «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений» была проведена статистическая обработка результатов эксперимента – прямых измерений удельной электропроводности исходной и Н-катионированной пробы и рН котловой воды солевого отсека барабанного котла (ст. №3) Ивановской ТЭЦ-3.

Таким образом:

1. Предложена методика расчетного (косвенного) определения концентраций ионных примесей и показателей качества котловой воды барабанных котлов с давлением 13,8 Мпа, основанная на измерении удельной электропроводности охлажденных прямо и Н-катионированной проб, а так же рН питательной и котловой воды.

2. Проведенные в 2012 году испытания новой автоматической системы химконтроля за водно-химическим режимом барабанного котла ($p_6 = 13,8$ МПа) показывают хорошую сходимость с ручным оперативным химконтролем по концентрациям аммиака в питательной воде и фосфатов в котловой воде солевого и чистого отсеков.

3. Проведена метрологическая оценка результатов расчетного (косвенного) определения концентрации фосфатов по значениям электропроводности (χ , χ_n) и рН. а также результатов прямых измерений.

4. Установлена зависимость между прямыми и косвенными данными, что отражает адекватность математической модели.

5. Данные автоматического химконтроля могут использоваться для оперативной оценки состояния ВХР барабанного котла, в частности, по диаграмме состояния фосфатного ВХР.

Литература

1. **Ларин, Б.М.** Повышение информативности мониторинга водного режима конденсатно-питательного тракта энергоблоков Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Е.В. Козюлина // Теплоэнергетика. 2003. №7. с. 2-9.
2. **ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002.** Точность (правильность и приемлемость) методов и результатов измерений. М. 2002. Часть 6.
3. **Гашенко В.А.** Разработка системы контроля и управления водно-химическими режимами 1 и 2 контуров АЭС с ВВЭР-1000. / В.А. Гашенко, А.Р. Преловский, А.В. Ульянов и др. // Материалы Межд. науч.-техн. совещания «Водно-химический режим АЭС» М. ВНИИАЭС. 2003.

УДК 621.187

М.М. БАШАРОВ, к.т.н.,
А.И. ФАРАХОВА, аспирант
(КГЭУ), г. Казань

Повышение эффективности удаления нефтепродуктов из сточных вод ТЭС

Отстаивание – наиболее простой и распространенный способ выделения из жидкостей примесей, которые под действием гравитационной силы оседают на дне отстойника или всплывают вверх.

При разделении тонкодисперсных эмульсий (<100 мкм) в отстойниках эффективность процесса можно повысить путем установки на месте ввода смеси коагулятора (рис. 1). Назначение коагулятора – укрупнение мелких капель для дальнейшего более интенсивного их всплытия или осаждения (в зависимости от разности плотностей сплошной и дисперсной фазы). В качестве коагулятора можно использовать канал с засыпкой мелкими насадочными элементами. Если поверхность насадки хорошо смачивается дисперсной фазой и плохо сплошной, то коагуляция мелких капель будет происходить на поверхности элементов с постепенным полным смачиванием поверхности по мере движения. На выходе из коагулятора размеры капель будут примерно равны среднему устойчивому размеру для данной двухфазной среды.

В качестве примера технологической схемы очистки сточных вод от нефтепродуктов на ТЭС рассмотрена система очистных сооружений Казанской ТЭЦ-1. Существующая технологическая схема очистки сточных вод от нефтепродуктов на Казанской ТЭЦ-1 состоит в следующем (рис. 2).

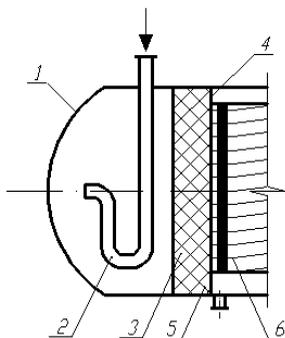


Рис. 1. Схема установки коагулятора в тонкослойном отстойнике:
1 – корпус отстойника, 2 – трубопровод подачи эмульсии, 3 – коагулятор,
4 – каркас, 5 – мелкая нерегулярная насадка,
6 – наклонные пластины разделительного устройства [1].

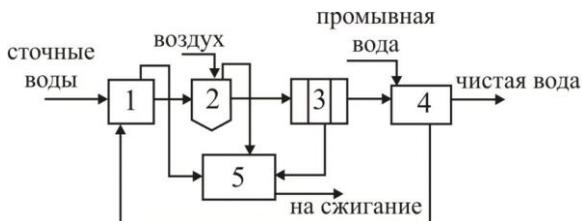


Рис. 2. Существующая схема очистки сточных вод от нефтепродуктов на Казанской ТЭЦ-1:

1 – приемный буферный бак, 2– флотатор, 3 - 3-х ступенчатый электронейтрализатор, 4– механический фильтр, загруженный антрацитом, 5– мазутоприемник

Все замазученные, замасленные стоки, образованные от охлаждения подшипников механизмов котло-турбинного цеха (КТЦ), ливневые стоки мазутного хозяйства, ливневые стоки станции собираются в буферных баках. Для снижения вязкости нефтепродуктов в буферных емкостях предусмотрен подогрев стоков паром. Из баков сточные воды насосами перекачки подаются на флотатор. Осветленная вода из флотатора поступает последовательно на три ступени очистки в электронейтрализаторы. С электронейтрализаторов очищенная вода поступает в бак чистой воды. Из бака чистой воды насосами очищенные стоки перекачиваются на механические фильтры, с которых стоки поступают в сбросной канал циркуляционной системы.

Использование всех трех ступеней электронейтрализатора эффективно для очистки сточной воды от нефтепродуктов до предельно допустимых норм, но большие затраты электроэнергии и чисто технические трудности обслуживания установок, работающих под напряжением, заставляют искать более рациональные технические и экономические решения.

Более того, при нормальной работе механических фильтров промывка должна осуществляться согласно режимной карте один раз в неделю. При неудовлетворительном качестве очищенной воды промывка фильтра производится вне графика.

На сегодняшний день наиболее целесообразным решением этой задачи является применение тонкослойного отстойника с коагулятором (см. рис. 1), позволяющего удалить нефтепродукты до любых заданных значений, вплоть до следовых.

Предложенная технологическая схема позволяет с минимальными затратами на существующем типовом оборудовании глубоко очистить сточные воды ТЭС от нефтепродуктов, снизить стоимость очистки благодаря исключению из технологической схемы механических фильтров и соответственно отпадает необходимость очистки промывных вод при регенерации этих фильтров.

Литература

1. Патент на полезную модель. Заявка № 2012147087/05(075710) Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И. Горизонтальный цилиндрический тонкослойный отстойник. Дата подачи заявки 06.11.2012.

УДК 621.321

Б.Е. ПАРШИН,
генеральный директор
ОАО «Камчатскэнерго»

Повышение эрозионно-коррозионной стойкости оборудования геотермальных электростанций

Эксплуатация геотермальных электростанций сопровождается эрозионно-коррозионными повреждениями, которые негативно отражаются на надежности и эффективности их работы.

Анализ повреждаемости Мутновских ГеоЭС позволил определить роль отдельных механизмов воздействия рабочей среды в разрушении элементов трубопроводов и оборудования технологического контура. Результаты эрозионно-коррозионных испытаний позволили определить некоторые закономерности эрозионно-коррозионного поведения конструкционных сталей в одно- и двухфазном геотермальном теплоносителе Верхне-Мутновской ГеоЭС и оптимизировать выбор эрозионно-коррозионноустойчивых металлов [1, 2].

Одной из перспективных технологий направленной на предупреждение эрозии-коррозии является корректировка водно-химического режима геотермального теплоносителя присадками поверхностно-активных веществ (ПАВ), которая позволяет управлять физико-химическими свойствами геотермального теплоносителя. Такой технологии на Мутновских ГеоЭС можно ожидать реализацию позитивных эффектов:

1. Предупреждение образования и удаление отложений в прочной части образования и трубопроводов;
2. Предупреждение общей коррозии (ОК) металла в рабочем контуре ГеоЭС;
3. Предупреждение эрозии-коррозии металла элементов трубопроводов и оборудования ГеоЭС;
4. Предупреждение коррозионного растрескивания под напряжением металла дисков и роторов турбин;
5. Предупреждение кавитационной эрозии элементов насосов, сужающих устройств и запорно-регулирующей арматуры;
6. Предупреждение каплеударной эрозии лопаток турбины.

В настоящее время подготовлена программа внедрения технологии предупреждения эрозии-коррозии металла Мутновских ГеоЭС на основе использования ПАВ.

Литература

1. **Томаров Г.В., Никольский А.И., Семенов В.Н., Шипков А.А., Паршин Б.Е.** Развитие геотермальной энергетики в России и зарубежом // Новое в российской электроэнергетике. № 10. 2011 г., с. 18-32.
2. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Эрозия-коррозия металлов в многокомпонентных геотермальных потоках // Теплоэнергетика, № 3, 2006 г.

УДК 621.311

В.Г. ТОМИЛОВ, д.т.н., профессор,
Е.Н. ЯГАНОВ, аспирант
(НГТУ) г. Новосибирск

Исследование влияния качества топлива на эффективность котельных агрегатов в условиях задачи изменения топливного баланса ТЭС

На сегодняшний день в рамках угольного сектора страны происходит исчерпание запасов ряда углей по отдельным месторождениям, либо происходит изменение теплотехнических характеристик в пределах одного месторождения при выработке пластов. Актуальным для энергетики является вопрос изменения топливного режима пылеугольных ТЭС в контексте коммерческого развития генерирующих компаний.

Существует три причины изменения топливного баланса пылеугольных ТЭС:

- возможность использования более дешевого угля;
- нестабильность поставок и качества проектного топлива;
- выработка угольных месторождений.

При изменении качества угля для сжигания изменяются термодинамические параметры пара за котлом, составляющие тепловых потерь, что в свою очередь отражается на эффективности установки в целом.

В рамках работы предлагается основную схему технологии сжигания твердого топлива рассматривать в виде функциональной блок-схемы, представленной на рис. 1.

Влияние теплоты сгорания топлива

Изменение теплоты сгорания топлива тесно сопряжено с изменениями показателей, как влажности, так и зольности.

Наибольшее влияние оказывает на блок-связь «Топка-КШ» (рисунок 1). Здесь при уменьшении теплоты сгорания увеличивается количество топлива, подаваемого в топку. Влажность готовой пыли при этом увеличивается [1]. Очевидно, что на срезе горелок ухудшает-

ся воспламенение пыли ввиду увеличенной влаги пыли. Факел «вытягивается» по высоте топки, значения теплотенности по сечениям выше ядра увеличиваются, стремясь к эквивалентности между собой. Температура перегретого пара при этом растет, зачастую превышая расчетные значения. Эффективность уменьшается.

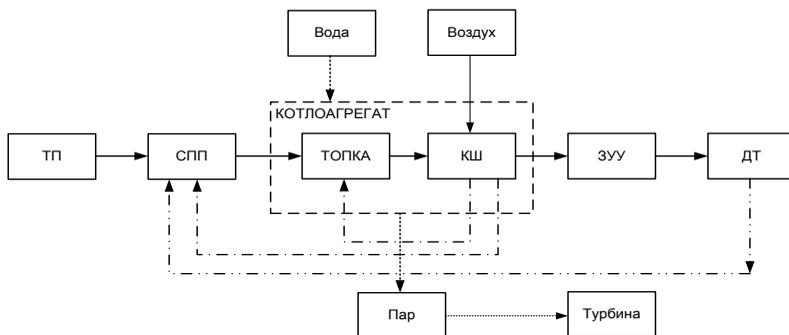


Рис. 1. Функциональная блок-схема котла: ТП-топливоподача; СПП - система пылеприготовления; КШ-конвективная шахта; ЗУУ-золоулавливающая установка; ДТ-дымовая труба

Анализ промышленных опытов, проводимых на котлоагрегатах паропроизводительностью 230 т/ч и 420 т/ч, показал, что наибольшие значения КПД достигаются при больших значениях теплотворной способности топлива [1,2]. Соответствующие зависимости приведены на рисунках 2 и 3. Эффективность в каждом опыте рассчитывалась с помощью зависимостей [3,4]. Значения КПД определены при оптимальных избытках воздуха за котлом.

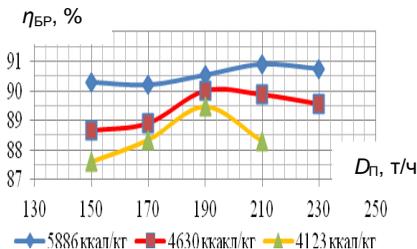


Рис. 3. Зависимость КПД Е-230-100 от паровой нагрузки

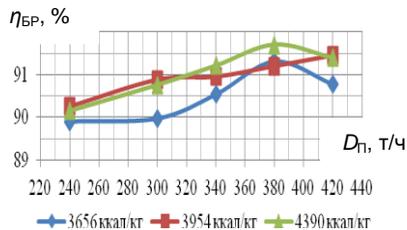


Рис. 4. Зависимость КПД Е-420-140 от паровой нагрузки

Таким образом, можно заключить, что:

– при увеличении теплотворной способности топлива очевидна явная тенденция увеличения общей эффективности котла;

– существенные различия в КПД котла возникают при изменении теплоты сгорания более чем на 15 % от теплоты сгорания, соответствующей наибольшим значениям КПД.

Влияние рабочей влажности.

Существенное влияние данный показатель оказывает на функциональные блоки «СПП» и «Топка» (рисунок 1). Для блока «Топка» изменение показателя влажности описано выше.

Рассматривая блок «СПП», необходимо отметить, в первую очередь, влияние влажности топлива на сушилную производительность пылесистемы [1,5]. Причем сушилная производительность явно определена типом сушки топлива, поэтому глубокое варьирование данного показателя при смене марки топлива невозможно без соответствующего объема реконструктивных работ.

В рамках проведенных исследований при сжигании углей различной влажности на котельном острове с котлоагрегатом паропроизводительностью 230 т/ч, системой пылеприготовления с двумя шаробарабанными мельницами, промбункером и горячим воздухом в качестве сушильного агента определен ряд совокупных закономерностей [1,6]. А именно, увеличение рабочей влажности топлива на величину менее 30 % от исходной компенсируется режимными параметрами. Ограничения производительности мельницы при этом не возникает. При увеличении влажности сырого угля на величину менее 50 % от исходной, неизбежно увеличение аналитической влаги готовой пыли, уменьшение температуры аэросмеси и соответствующее снижение сушилной производительности пылесистемы. При увеличении рабочей влаги угля более чем на 50 % от исходной проявляется явное сокращение производительности мельниц и, как следствие ограничение паровой нагрузки на котле.

Выводы

1. В условиях исчерпания запасов, нестабильности поставок непроектных углей, а также меняющейся конкурентной политики ценообразования на них для генерирующих компаний остро стоит вопрос изменения топливных режимов своих ТЭС.
2. Допустимые значения качества топлива на отдельных этапах технологического цикла ТЭС, в значительной мере, определяются резервами производительности и гибкостью используемого основного и вспомогательного оборудования.
3. Обладая аналитическими данными и экспертными оценками о возможности сжигания конкретной марки угля возможно сократить время поиска альтернативных вариантов взаимозаменяемых углей, исключить затраты на проведение работ по опытному сжиганию с отрицательными результатами.

Литература

1. **Яганов, Е.Н.** Проведение опытного сжигания непроектного угля марки ДР разреза «Виноградовский» на котле ТП-230 ст. №6 ОАО «ТГК-11»: технический отчет. - ОАО «Сибтехэнерго» инв. № 1194, г. Новосибирск. 2011.-130 с.

2. **Яганов Е.Н.** Проведение опытного сжигания непроектного угля – марки КСН разреза «Екибастузский» ТОО «Ангренсор» на котле БКЗ-420-140 ст. №1 ОАО «ТГК-11»: технический отчет.- ОАО «Сибтехэнерго» инв. № 1268, г. Новосибирск, 2012.- 126 с.
3. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Изд 3-е, перераб./НПО ЦКТИ, СПб, 1998. 256с. с ил.
4. **Пеккер, Я. Л.** Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива (обобщенные методы). М., «Энергия», 1977.
5. **Мальцева, А.В.** Проведение опытного сжигания углей Южного Кузбасса на котле ПК-10 ст. №6 ОАО «Южно-Кузбасской ГРЭС» // Технический отчет ОАО «Сибтехэнерго» инв. № 937, г. Новосибирск, 2009, 81 с.
6. **Гребеньков, П.Ю.** Опытное сжигание непроектного Хакасского каменного угля в котле типа ТП-230-2 Томской ГРЭС-2 // Технический отчет ООО «Инженерная компания», инв. № 01-2010, г. Красноярск, 2010, 133с.

УДК 621.311

М.Г. ЗИГАНШИН, к.т.н., профессор
(КГЭУ), г. Казань

Аппараты с фонтанирующим слоем для систем топливоподготовки ТЭС

Широко распространенным способом использования забалластированных углей на ТЭС является сжигание угольной пыли в потоке. Однако при этом возникает ряд технологических и экологических проблем, не имевших места при использовании природного газа и пыли высококалорийных углей. Это заметные температурные перекосы в топках парогенераторов, отрывы и погасание факела пылеугольной горелки при спонтанном увеличении доли балласта, выброс значительной массы золы-уноса. Рассматриваемые в работе устройства с фонтанирующим полидисперсным материалом могут использоваться на стадии подготовки угля при его сушке и газификации, а также при сжигании угля в топке парогенератора со связывающими серу присадками. Это помогает исключить или значительно сгладить отмеченные проблемы

Для топливных углей основным преимуществом фонтанирования перед другими способами организации подвижного режима зернистого материала является возможность стабильной работы в широком диапазоне размеров, от пыли с диаметром в несколько десятков микрометров до кусков класса сортировки ОМСШ (0-50). Между тем распространение фонтанирующего режима в технике еще имеет значительный резерв. Одна из причин, сдерживающих развитие такой технологии – недостаточная прозрачность и надежность расчетных методов определения параметров фонтанирования полидисперсного материала.

Фонтанирование возникает при центральной подаче потока газа под слой материала, засыпанного в коническую или цилиндрическую емкость [1]. Существующие теоретические и эмпирические зависимости для вычисления характерных параметров стадий фонтанирования получены, как правило, для слоев монофракционного материала.

Между тем опытно измеренные параметры полидисперсной фонтанирующей системы показывают расхождение с расчетом в 2...3 раза. Различия в реализации стадий фонтанирования моно- и полидисперсных частиц носят качественный характер. В неоднородной хаотически упакованной полидисперсной системе внешние силы распределяются неравномерно, сообразно с неравноценностью множества связей между частицами, и равновесие нарушится при разрыве слабейшей связи. Это не позволяет получить реальные характеристики ее фонтанирования простой подстановкой среднего размера частиц в эмпирические выражения для однородной засыпки.

Размеры частиц, адекватно определяющих параметры режимов фонтанирования сыпучего материала определенного вещества, найдены из условия нарушения равновесия между внешней силой и силой, создаваемой в неподвижной системе тяжестью и поверхностным взаимодействием ее элементов. В реальных производственных условиях при обработке влажных материалов всегда будет существенным вклад в поверхностное взаимодействие и капиллярных сил. Энергия E_{vdw} вандерваальсовых взаимодействий для условий рассматриваемой задачи конкретизировано в виде:

$$1 E_{vdw} = 4r^2 F_{vdw} / R = 8r^2 \hbar \omega (2 - \sqrt{2}) / R \sqrt{b^2 - 4ac}, \quad (1)$$

где r – расстояние между центрами взаимодействующих молекул как колеблющихся мультиполей, m ; $\hbar \omega$ – постоянная Липшица – Ван-дер-Ваальса, значение которой зависит от вида взаимодействующих веществ, Дж; n , C – показатель степени и коэффициент, значения которых подбираются эмпирически по виду взаимодействия.

Далее с учетом силы капиллярного взаимодействия частиц $F_\sigma = 8\sigma R$, удерживающей частицы вследствие поверхностного натяжения σ , Н/м, составлен баланс сил в слое. Условие нарушения равновесия полидисперсной системы в энергетическом представлении имеет вид:

$$2 \frac{4}{3} \pi R_i^4 \rho_p g (\varphi^3 - 1) - 8\sigma R_i^2 - \frac{\hbar \omega (2 - \sqrt{2})}{32} > 0. \quad (2)$$

В (2) через φ обозначено отношение R_{i+1}/R_i и для частиц из одного материала принято $\rho_i = \rho_{i+1} = \rho_p$.

По условию потери устойчивости найдено соотношение определяющих размеров частиц минимальной и последующей фракций R_i и R_{i+1} . Если преимущественно капиллярное взаимодействие, то

$$3 R_i > \pm 0,441 \sqrt{\sigma / [\rho_p (\varphi^3 - 1)]}, \quad (3)$$

а при преимущественно вандерваальсовом взаимодействии

$$4 R_i > \pm 0,145 \left\{ \hbar \omega / \left[\rho_p (\varphi^3 - 1) \right] \right\}^{0,25} . \quad (4)$$

С целью уточнения теоретических разработок проведены опытные исследования процесса фонтанирования монофракционного и полидисперсного материала в контактном аппарате с цилиндроконической геометрией (рис. 1).

Опытные исследования параметров фонтанирования полидисперсного материала выполнялись для ряда фракционных составов, отличающихся медианными диаметрами и дисперсиями.

По опытным данным на основе выражения (4) определен размер частиц, лимитирующий потерю устойчивости слоя. С учетом доли взаимодействующих элементов на поверхностях частиц от их размера и функциональной зависимости постоянной Липшица – Ван-дер-Ваальса $\hbar \omega_p = f(R)$ в [2] получено ее оценочное значение для количества вещества M_p , кмоль, содержащегося в частице лимитирующего размера R_i :

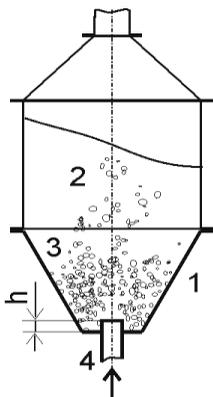


Рис. 1. Контактный аппарат. 1, 2 – коническая и цилиндрическая части аппарата, 3 – фонтанирующий слой материала, 4 – сопло диаметром 25 мм

Расчеты по выражению (4), соответствующему условиям эксперимента, а именно – продувке слоя сухой шамотной крошки сухим воздухом при температуре выше точки росы, дали следующий результат: $R_i = 222,5 \cdot 10^{-6}$ м и $D_i = 445 \cdot 10^{-6}$ м [2].

При обработке дробленого твердого топлива могут быть существенны капиллярные силы. Рассмотрены особенности расчета лимитирующего диаметра в случае паритетного действия массовых, межмолекулярных и капиллярных сил по балансовому уравнению (2). При этом ввиду отсутствия количественной информации по ослаблению поверхностного натяжения между взаимодействующими частицами с негладкими поверхностями коэффициент ослабления для капиллярных сил принят того же порядка, как для межмолекулярных. Это позволяет избежать нарушения паритета действующих между частицами сил при математическом

описании продувки влажного слоя дробленого угля. Для этого случая получено: $R_i = 464 \cdot 10^{-6}$ м и $D_i = 928 \cdot 10^{-6}$ м.

Выполнен также расчет R_i по выражению (4) без учета коэффициента ослабления капиллярных сил, что может соответствовать обработке топлива в условиях, характеризующихся повышенной влажностью, например, в начальной стадии продувки слоя сырого и/или холодного угля с температурой ниже точки росы. Для этого случая $R_i = 2490 \cdot 10^{-6}$ м

Сравнение результатов расчетов показывает, что размер частиц с наиболее слабой связью в слое при действии капиллярных сил примерно на порядок превышает аналогичный размер при действии только межмолекулярных сил.

Предложенная методика позволяет рассчитывать процессы его обработки измельченного твердого топлива при проектировании аппаратов с фонтанирующим режимом для систем топливоподготовки. Перевод полидисперсных систем в фонтанирующий режим требует меньших затрат энергии, чем в другие режимы псевдооживления, а работа в нем более стабильна. Следовательно, использование таких аппаратов в схемах топливоподготовки ТЭС позволяет повысить энергетическую эффективность и надежность систем топливоподготовки.

Литература

1. **Романков, П.Г.** Сушка во взвешенном состоянии /П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.
2. **Зиганшин, М.Г.** Режимные параметры аппаратов с фонтанирующим слоем полидисперсного материала: часть 1, часть 2 // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета / М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин, А.В. Дмитриев. - 2009. - № 2(12). - С. 179-189.

УДК 621.311.22

А.Т.ЗАМАЛИЕВА¹, инженер,
М.Г.ЗИГАНШИН², к.т.н., профессор
(ООО «Газпром трансгаз Казань»¹, КГЭУ²), г. Казань

Натуральные и численные исследования эффективности циклонного фильтра для очистки выбросов ТЭС

Большинством ТЭС европейской части РФ используется природный газ, имеющий экологические преимущества перед другими ископаемыми топливами вследствие отсутствия выброса золы и меньшего выброса парниковых газов. Вместе с тем ввиду необходимости оптимизации структуры топливного баланса по ряду причин экономического характера, в энергетической стратегии России предусмотрено значительное увеличение доли твердого, в т.ч. забалластированного, топлива при генерации электрической и тепловой энергии. Перевод ТЭС на сжигание углей предполагает использование инновационных технологий, сочетающих энергоэффективность и экологическую чистоту. В данной работе рассматривается эффективность инновационного средства для обработки выбросов тепловых электростанций – циклонный фильтр [1].

Опытный образец элемента циклонного фильтрующего аппарата испытан по схеме, представленной на рис.1 .

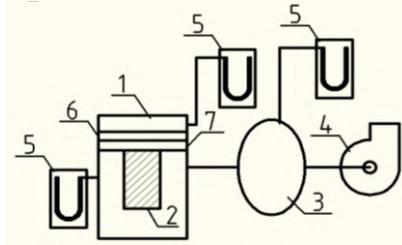


Рис. 1. Стенд для испытания фильтрующего циклонного сепаратора:
 1 - циклон; 2 - тканевый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 - нагнетатель;
 5- U-образные манометры; 6 –патрон с сеткой; 7- ткань Петрянова

Масса контейнера с пылью определялась на аналитических весах в начале и конце серий экспериментов с одинаковым расходом. Нагнетателем 4 воздух подавался в контейнер с пылью 3 (тальк с медианным диаметром частиц 10 мкм и дисперсией 3,5). Запыленный поток из контейнера поступал тангенциально в циклонный элемент 1. На фильтре 2 и стенках циклона происходило инерционное осаждение пыли. Затем поток попадал в выходную трубу циклона, где проходил через патрон с тканью Петрянова 7 и металлической сеткой 6, после чего удалялся из системы. Фильтры 2, 7 и сетка 6 взвешивались в начале и конце испытания. Стендовые испытания опытного образца показали, что на входной фильтрующей вставке улавливается около 75% пыли, на стенках оседает 20%, и остатки задерживаются выходным фильтром из ткани Петрянова. Эффективность осаждения на фильтрующей вставке устанавливалась по счетной концентрации уловленных частиц после изучения образцов под микроскопом с 25-кратным увеличением.

Получены также расчетные выражения для оценки эффективности осаждения частиц в вихревых потоках, с использованием уравнений движения Навье – Стокса для потока и первого закона Ньютона для частиц. В теоретических исследованиях принималось, что силы гравитации пренебрежимо малы по сравнению с инерционными, а концентрация взвеси не сказывается на плотности потока. Получен параметр a_c , Па·с, позволяющий оценивать энергетическое совершенство конструкции циклонного сепаратора возвратно-поточного типа:

$$a_c = f_R / u_o = \rho_G u_o (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / 4 \quad (1)$$

где u_o, f_R – начальные скорость, м/с, и градиент силы, Па·м, во входном сечении; ρ_G – плотность потока, кг/м³; R_1, R_2 – радиусы корпуса и выхлопного патрубка циклонного сепаратора.

Отношение a_c к вязкости потока η , Па·с, дает безразмерный комплекс Re_c со структурой критерия Рейнольдса:

$$Re_c = a_c / \eta = \rho_G u_o (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / (4\eta) \quad (2)$$

В него входят основные характеристики потока и циклона, т. е. это

число Рейнольдса для потока в циклоне, и одновременно – безразмерная характеристика энергетического совершенства конкретного аппарата как завихрителя. Для сопоставления с Re_c найдена соответствующая характеристика взвешенной частицы (форма частицы принята сферической, а радиальный градиент действующей на нее центростремительной силы F_1 – постоянным).

Энергетический параметр вовлеченной в поток частицы a_p , Па·с:

$$a_p = 3\pi \cdot \eta \cdot (u_0 \cdot \tau_w / R_2)^2 \quad (3)$$

где τ_w – время релаксации, с.

Отношение a_p к η можно представить как квадрат безразмерной характеристики Re_p^{in} со структурой критерия Рейнольдса:

$$a_p / \eta = 3\pi (u_0 \cdot \tau_w / R_2)^2 = (Re_p^{in})^2. \quad (4)$$

Параметр, полученный путем сопоставления его с Re_c , показывает возможность сепарации частицы вследствие того, что во вращающемся потоке с радиусом закружения R_2 она не может следовать за линией тока и продолжит движение по касательной к ней:

$$(Re_p^{in})^2 / Re_c = Re_r \quad (5)$$

Комплекс Re_r также имеет структуру критерия Рейнольдса и составлен посредством комбинации безразмерных параметров, выражающих соотношение энергий и действий частицы и вращающегося потока. Поэтому численные значения критерия Re_r коррелируют со степенью осаждения частиц в вихревых потоках и могут использоваться для ее оценки в сходственных условиях.

Совершенствовать конструкцию и ускорить в дальнейшем экспериментальную доводку циклонного фильтра позволяет исследование аэродинамики потоков воздуха в установке посредством численного моделирования методами CFD. Проведен анализ используемых в последнее время методов моделирования вращающихся двухфазных потоков в циклонах. Для прикладных задач по-прежнему остаются актуальными модели RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation), основанные на рейнольдсовом осреднении параметров турбулентности и уравнениях Навье-Стокса [2]. Их основное достоинство заключается в доступности вычислительного ресурса для реальных задач. Построена модель циклона и выполнены тестовые расчеты, результаты которых находятся в соответствии с результатами теоретических и натуральных исследований. На их основании могут быть найдены фракционные коэффициенты очистки примеси, если известны параметры потока и конструктивные размеры аппарата, определяющие средний радиус его кривизны.

Разработанное инновационное средство позволит повысить степень очистки выбросов и будет способствовать повышению экологичности работы ТЭС на твердом топливе.

- 3.М.Г. Зиганшин, И.С. Алещенко, Л.В. Павлов, А.М. Зиганшин. Циклон-фильтр. Патент РФ на изобретение №2361678, Бюл. № 20. опубл.: 20.07.2009
- 4.Hoffmann, A. and Stein, L., Gas Cyclones and Swirl Tubes, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg, N.Y., 2002-422 p.

УДК 502.34

Н.А. ЕРЕМИНА, к.т.н., доцент.
(ИГЭУ) г. Иваново

К вопросу обеспечения экологической безопасности на ТЭС и образовательной деятельности ИГЭУ

Экологическая безопасность – это состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий (ФЗ «Об охране окружающей среды», 2002 г.). Кроме того, категория «экологическая безопасность» закреплена Конституцией РФ (ст. 72), Законом «О безопасности» (ст. 13) и др. нормативными актами.

В 2009 году распоряжением Правительства Ивановской области №175 «О мерах по обеспечению экологической безопасности на территории Ивановской области» был утвержден трехлетний региональный план действий по охране окружающей среды (РПДООС) Ивановской области[1].

Среди экологических проблем первое место традиционно занимают загрязнение воздуха, поверхностных вод и образование отходов производства и потребления и связанное с ним загрязнение почв и подземных вод. Наибольший вклад в загрязнение вносят предприятия большой и малой энергетики.

Среди 25 основных предприятий-загрязнителей атмосферного воздуха первое место занимает Ивановский филиал ОАО «ТГК-6», а именно ИвТЭЦ-2 и ИвТЭЦ-3, выброс вредных веществ от которых составляет 10580 т/год.

Из 10 основных предприятий-загрязнителей поверхностных вод на первом месте находится УМП «Водоканал», сбрасывающий более 75 млн м³ в год, на втором – Ивановский филиал ОАО «ТГК-6» - более 63 млн м³.

Золоотвалы ИвТЭЦ-2 приравнены к экологически опасным объектам Ивановской области, в настоящий момент они переполнены, накоплено более 600 тыс м³ золы. Вопрос утилизации золы до сих пор не решен, идет постоянное загрязнение реки Уводь взвешенными веществами.

В РГДООС предложен ряд совокупных методов по снижению вредного воздействия различных источников и улучшению экологической обстановки в Ивановской области. Среди них немаловажная роль отводится правовым и информационным методам, в частности экологизации мировоззрения населения, совершенствованию системы экологического образования, воспитания и просвещения. В перечне мероприятий предусматриваются организация и проведение экологических обучающих семинаров и курсов по повышению квалификации руководителей и специалистов предприятий.

В ИГЭУ уделяется много внимания экологическому образованию студентов. Помимо обязательной для всех технических специальностей дисциплины «Экология» студенты теплоэнергетического факультета получают углубленные знания по природоохранным технологиям на ТЭС. Специалисты-выпускники кафедры ХХТЭ имеют специализацию «Природоохранные технологии в теплоэнергетике», а это – будущие работники экологических служб на энергетических предприятиях. С 2011 года открыт прием бакалавров на направление «Техносферная безопасность» по профилю «Инженерная защита окружающей среды», будущая профессиональная деятельность которых будет связана с обеспечением экологической безопасности, в том числе на ТЭС.

В 2012 году на теплоэнергетическом факультете проведена студенческая олимпиада по экологии энергетики, на которой студенты показали высокий уровень знаний как по общим экологическим вопросам, так и по инженерной экологии. В будущем планируется повысить статус олимпиады до региональной межвузовской.

На базе ИГЭУ в Институте повышения квалификации и подготовки кадров (ИПК и ПК) с 2011 года открыто направление «Экологическая безопасность» для энергетической отрасли. Повышение квалификации и подготовка к аттестации ведется по трем программам:

- «Обеспечение экологической безопасности руководителями и специалистами общехозяйственных систем управления»;
- «Обеспечение экологической безопасности руководителями и специалистами экологических служб и систем экологического контроля»;
- «Обеспечение экологической безопасности при работах в области обращения с опасными отходами».

В конце 2011 года было проведено повышение квалификации по первой (основной) программе для руководителей и специалистов энергетической отрасли из Ивановской, Владимирской и Вологодской областей.

Таким образом, образовательная деятельность ИГЭУ напрямую способствует реализации программы РГДООС и вносит вклад в обеспечение экологической безопасности как Ивановской области, так и других регионов России, где работают квалифицированные энергетики из ИГЭУ.

Литература

1. <http://www.regionz.ru/index.php?ds=291407>

Разработка инструментального средства по расчету схем обессоливания воды на ТЭС

На первом этапе проектирования установок водоподготовки на ТЭС, для получения добавочной воды подпитки энергетических котлов и теплосети, ставится задача выбора наиболее оптимальной схемы водообработки для конкретных условий (показателей качества исходной воды, требуемой производительности) проектируемого объекта. Существование множества возможных вариантов схемных решений позволяющих получить воду одинакового качества, размытие границ применимости основных технологий обессоливания приводит к необходимости оперативного проведения технологических расчетов приемлемых схем водообработки и выбора из них наиболее оптимальной. Известные программы по расчету водоподготовительной установки (ВПУ) («ROSA», «CADIX» и др.) предназначены для технологического расчета только одной схемы обессоливания или даже лишь одной стадии обработки.

На кафедре ХХТЭ ИГЭУ разрабатывается программный продукт (ПП) «ПРОЕКТ ВПУ» позволяющий смоделировать большое количество схем ВПУ из ее отдельных элементов и провести их технологический расчет. Укрупненная блок-схема ПП «ПРОЕКТ ВПУ» приведена на рис. 1.

ПП создан на основе разработанных математических моделей (ММ) расчета основных схем обработки воды на ТЭС [1]. Подход основанный не сборке ММ схемы ВПУ из моделей отдельных элементов потребовал и создание особой методики их расчета.

Наличие периодически работающего водоподготовительного оборудования, приводит к необходимости составления формальных схем ВПУ с указанием всех водных потоков участвующих в эксплуатации этого оборудования, причем некоторые из них не совпадают по времени.

Выделены два типа возмущения для расчета элемента схемы: по "воде" и расходу. Вид расчета элемента проводится в зависимости от того какое возмущение или их сочетание поступило на определенных вход или выход ММ. Например, когда данные по качеству обрабатываемой воды поступают на ММ ступени Na-катионитных фильтров, проводится расчет качества воды на стадии обработки и рассчитанное качество воды передается следующему в схеме элементу. Когда на ММ этой ступени поступают данные по расходу умягченной воды и по качеству регенерационного раствора соли производится для нее технологический расчет, определяются характеристики потоков сточных воды и данные по расходам передаются связанным с ним элементам.

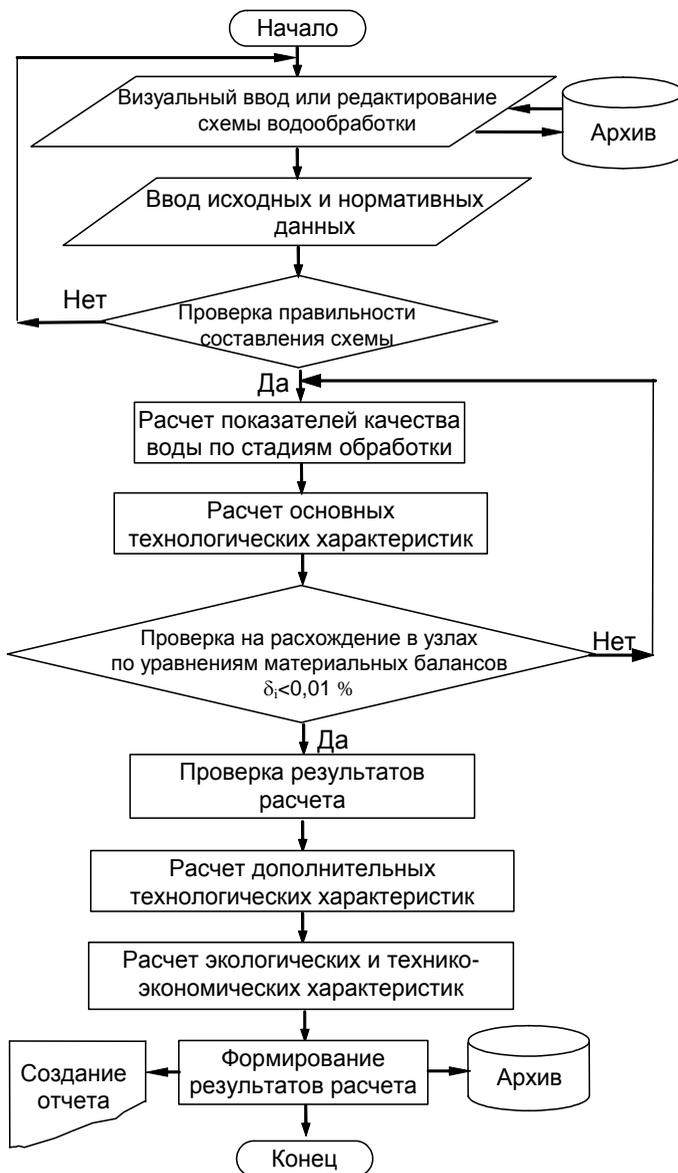


Рис. 1. Укрупненная блок-схема ПП «ПРОЕКТ ВПУ»

Наличие в формальных схемах элемента «разветвитель водного потока» часто приводит к итерационным расчетам. Поэтому в ММ этого элемента закладывается механизм «затухания» расчета и прекращение передачи данных другим элементам, критерием этого является относительное расхождение в балансовых уравнениях по расходу и количеству вещества.

Следует отметить, что, используя такой подход расчета, не всякая схема водоподготовки может быть корректно рассчитана, поэтому предусматривается подсистема предварительной оценки возможности проведения расчета и подсистема оценки правильности выполнения расчета.

В начале расчета производится изменение (возмущение) потока исходной воды по «воде» – задаются показатели качества исходной воды, что заставляет рассчитать изменение показателей качества воды по стадиям обработки. После окончания расчетов по «воде» вводится возмущение по расходу обессоленной воды, это заставляет проводить расчеты схемы с «хвоста» схемы по производительности.

Представленная методика расчета схем водообработки основанная на ММ отдельных элементов и общем механизме взаимодействия между элементами через возмущения по расходу и «воде» является универсальной, вне зависимости от вида рассчитываемой схемы. Эта методика дает возможность рассчитать практически любую по сложности схему водоподготовки, позволяет вводить новые ММ элементов водообработки, увеличить точность расчета, отказаться от ряда упрощений которые используются при традиционных расчетах.

ПП «ПРОЕКТ ВПУ» позволяет в рамках одного проекта (объединение схем) проводить полный технологический расчет для различных схем обессоливания и разных исходных данных. В связи с тем, что для конкретных исходных данных редко можно предложить оптимальную схему по всем критериям (экологическим, технологическим и технико-экономическим), в программе рассчитываются все эти показатели, а выбор оптимального варианта остается за пользователем.

ПП может находиться в четырех состояниях:

- ввод изображения схемы водообработки;
- ввод необходимых данных для расчета;
- расчет схемы водообработки;
- представление результатов расчета.

На первом этапе пользователь komponует на экране монитора с помощью специального встроенного графического редактора расчетную схему водообработки из элементов различных типов (осветлителя, Натрионитных фильтров, испарителя и т.д.) и визуально определяет связи между ними.

После создания схемы программа переходит в режим ввода данных, на этом этапе для элементов схемы (оборудования) вводятся необходимые для расчета исходные данные.

После ввода всех требуемых данных приступают к расчету схемы водообработки путем выбора иконки «расчет». На первом этапе расчета проводится проверка на наличие обязательных элементов («источник воды», «потребитель воды») в схеме, а также проверка на корректность созданных связей между элементами схемы, которая определяется достаточностью данных для расчета. При обнаружении ошибок в окне сообщений указывается на неправильное соединение.

После проведения расчета программа переходит в режим представления результатов расчета, в ходе которого можно получить результаты проведенного расчета для любого отдельного элемента, а также общий отчет для схемы в целом. Результаты расчета могут быть распечатаны или записаны в текстовый файл формата ttf.

Применение ПП в процессе обучения студентов позволит использовать современный уровень проведения технологических расчетов, комплексный подход по характеристике технологий водоподготовки и дает возможность сосредоточиться на принятии технологических решений.

Литература

1. **Ларин, Б.М.** Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев. –М.: Издательский дом МЭИ, 2009. –310 с.

УДК 621.187.12

А.В. ЖАДАН, соискатель,
Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н, доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Исследование влияния различных факторов на условия работы установки ультрафильтрации

Традиционная схема подготовки добавочной воды энергетических барабанных котлов СВД ($p > 10$ МПа) предполагает две ступени обработки исходной воды:

- предочистка, реализуемая по методу коагуляции в осветлителе и фильтрация на механических фильтрах;
- деминерализация, реализуемая по методу химического или термического обессоливания.

В настоящее время вместо традиционных технологий обессоливания воды все чаще предусматриваются мембранные технологии подготовки добавочной воды. Однако, специфика природных вод центра и севера России состоит в невысокой минерализации и повышенном содержании железоорганических примесей, поэтому традиционная схема предочистки (–О–МФ–) оказывается недостаточной для подго-

товки питательной воды установок обратного осмоса (УОО) [1]. В качестве решения проблемы западными фирмами-производителями, а вслед за ними и отечественными адаптерами предлагаются предвключенные установки ультрафильтрации, представляющие собой мембранные фильтрующие элементы с увеличенными по сравнению с УОО порами. Такое решение не отменяет, как правило и традиционной предочистки, требует дополнительных исследований на типичных природных водах в реальных отечественных промышленных установках.

Имеющийся опыт эксплуатации УОО свидетельствует о том, что основным фактором, от которого зависит работа мембран, является соблюдение норм качества воды, подаваемой на обработку. Анализ требований производителей показывает, что нет ограничений на концентрации солей, содержащихся в поверхностных водоисточниках, возможна работа в широком диапазоне показателя рН. Ограничивается лишь содержание тех веществ, которые могут привести к отравлению или забиванию мембран. Фирмы-производители обратноосмотических элементов оценивают качество обрабатываемой воды, прежде всего показателем SDI. Предельно допустимое SDI – 5, а при значениях SDI от 3 до 5 производители относят такие воды к проблемным, устойчивая работа обратноосмотического элемента гарантируется при SDI < 3.

На ТЭЦ-20 Мосэнерго были проведены лабораторные испытания установки ультрафильтрации (УУФ), как предвключенной перед установкой обратного осмоса. В качестве исходной воды для установки использовалась вода из циркуляционного водовода, прошедшая Na-катионитные фильтры. Некоторые результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты лабораторных исследований УУФ

№ п/п	Водный поток	рН	Щ _о , мг-экв/л	С _{Fe} , мкг/л	Ок, мгО/л	С _{Al} , мкг/л	SDI
1.	Исходная вода	8,70	3,15	269	6,08	8	–
2.	Фильтрат УУФ (без коагуляции)	8,49	3,05	236	6,24	7	>6,6
3.	Фильтрат УУФ (D _к =7 мгAl/л; τ=15 мин)	7,26	2,60	73	4,48	48	2,2
4.	Фильтрат УУФ (D _к =8 мгAl/л; τ=5 мин)	7,75	2,50	84	4,32	152	–

Из табл. 1 видно, что без использования коагулянта (проба №2) снижение растворённой органики и железа не велико, получаемый фильтрат не соответствует требованиям к поступающей воде на УОО.

Для эффективного использования УУФ в схемах водоподготовки на ТЭС, для получения гарантированного качества воды перед УОО необходима предварительная коагуляция исходной воды. Время контакта коагулянта с водой после введения и перемешивания должно состав-

лять не менее 10 мин до подачи на установку ультрафильтрации. Исследования показали, что первичное хлорирование с дозой 0,5–1,0 мг/л по активному хлору существенно улучшает процесс и коагуляция возможна при меньших дозах.

Проведенные на Среднеуральской ГРЭС исследования показали, что применение технологии напорной ультрафильтрации с предварительной коагуляцией для очистки природной воды обеспечивает стабильное снижение окисляемости (рис. 2) и цветности исходной воды, получение воды питьевого качества удовлетворяющая требованиям СанПиН 2.1.4.1071-01 и требованиям к качеству питательной воды УОО. В качестве коагулянта возможно использование сульфата алюминия и полиоксихлорида алюминия или их смеси. Использование органических катионных флокулянтов позволяет уменьшить дозу коагулянта в 1,5 раза.

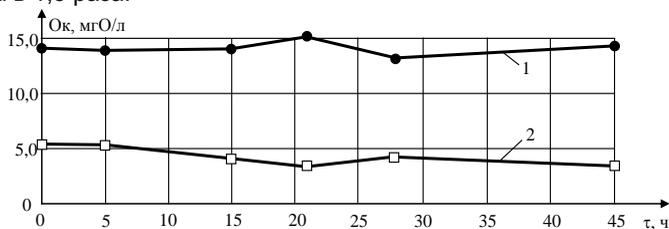


Рис. 2. Изменение показателей качества исходной воды (1) и фильтрата УУФ (2) в ходе экспериментов

Были проведены исследования влияния температуры воды на эффективность очистки на УУФ. Испытания проводились на подогретой воде, при температуре 28–30 °С, а также на холодной воде, при температуре 8–11 °С. В качестве коагулянта использовался сульфат алюминия. Проведенные опыты показали, что хотя процесс коагуляции на холодной воде протекает хуже, чем на подогретой, очистка методом ультрафильтрации остается стабильной при небольшом росте дозы коагулянта. Это связано с увеличением задерживающей способности мембраны при возрастании вязкости воды, что выгодно отличает метод ультрафильтрации от традиционных методов предочистки, где снижение температуры воды ведет к росту дозы реагентов и проскоку алюминия в фильтрат.

Существенное влияние на эффективность процесса оказывает полнота смешения реагентов с обрабатываемой водой, а также время контакта. В ряде случаев применение перемешивания воздухом существенно улучшает процесс коагуляции. Опыты показали, что оптимальным времени контакта на холодной воде является 15–20 мин. При уменьшении времени контакта менее 5 мин. происходит контактная коагуляция на мембране или внутри мембраны. Возможен проскок алюминия в фильтрат.

Следующим этапом работы проведено сравнение основных технологических характеристик мембранных элементов: Hydracap 60 (фирма

HYDRONAUTIC), SXL225FSCC (фирма NORIT) и SFX-2660 (фирма DOW CEMICAL, Китай) при обработке воды Исетского озера (Среднеуральская ГРЭС). Изменение проницаемости рассмотренных мембранных элементов в процессе промышленного исследования показано на рис. 3.

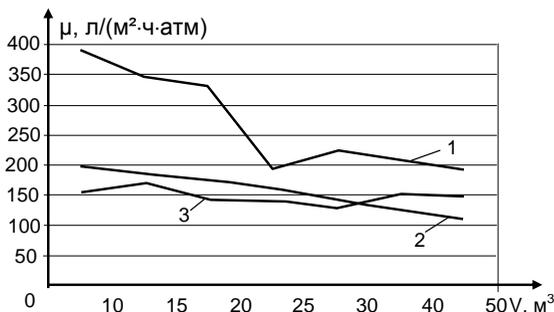


Рис. 3. Изменение проницаемости различных типов мембранных элементов в зависимости от количества пропущенного фильтрата: 1 – NORIT; 2 – SFX-2660; 3 – HYDRONAUTIC

Из изученных мембранных элементов УУФ на водах Исетского озера (Среднеуральская ГРЭС) наилучшими рабочими характеристиками обладают элементы SXL225FSCC фирмы NORIT, показавшие высокую проницаемость мембран (выше 200 л/(м²·ч·атм)) при устойчиво небольшом трансмембранном давлении в пределах 0,28–0,40 атм и расходе воды на обратную промывку 330 л/(м²·ч).

Литература

1. Бушуев Е.Н., Еремина Н.А., Жадан А.В. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС // Вестник ИГЭУ, 2013. Вып. 1. С. 8–14.

УДК 621.646.7

Т.М.ФАРАХОВ, к.т.н.,
О.Г.ДУДАРОВСКАЯ, аспирант
(ООО ИВЦ «Инжехим», КГЭУ), г. Казань

Применение статических смесителей для подготовки мазута с присадками

Для эффективного проведения процесса смешения топлива с присадками традиционно используют аппараты с мешалками, дисковые, шнековые и другие виды смесителей, которые имеют ряд недостатков, а именно: сложность конструктивного оформления, большие затраты мощности, трудность регулирования и создания одинаковых условий

смешения. Поэтому возникает необходимость в исключении данных недостатков и разработке наиболее эффективного оборудования для смешения.

Наиболее перспективными среди используемых оборудований являются статические смесители, в которых перемешивание происходит без участия подвижных механических устройств.

Существует большое количество конструкций статических смесителей: с винтовыми элементами, с промежуточными камерами, пластинчатыми и гофрированными элементами и т.п. Для увеличения поверхности раздела между компонентами смеси, достигаемое за счет сдвигового течения и за счет хаотичной переориентации потоков жидкости используются проточные насадочные смесители с нерегулярными насадками.

В промышленных аппаратах и энергетических установках движение газов (паров) и жидкостей практически всегда происходит при турбулентном режиме. Поэтому для поиска путей совершенствования технологического и энергетического оборудования важное значение имеет достоверный расчет турбулентных течений.

В данном докладе рассмотрен подход определения эффективности насадочных смесителей на основе использования моделей пограничного слоя, теории турбулентной миграции частиц и моделей структуры потоков.

На основе полученных выражений выполнен расчет определения эффективности статических смесителей с нерегулярными насадками "Инжехим" и кольцами Рашига [1,2].

На рис. 1-2 представлены расчетные зависимости коэффициента полезного действия (η) от числа Re для насадок "Инжехим" и керамических колец Рашига различного диаметра (для мазута).

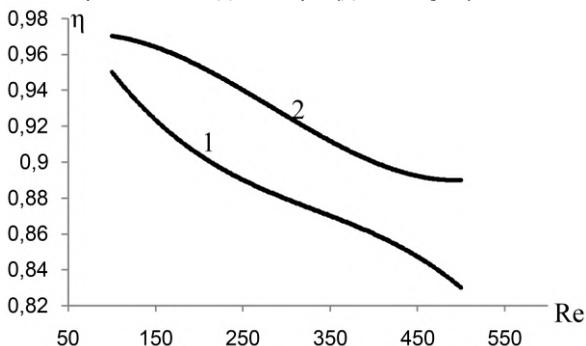


Рис. 1. Зависимость коэффициента полезного действия (η) от числа Re для насадок "Инжехим-2003 М" и керамических колец Рашига при $H=1$ м: 1-кольца Рашига 10Ч10Ч1,5; 2- Инжехим-2003 М разм. 8Ч7 (для мазута)

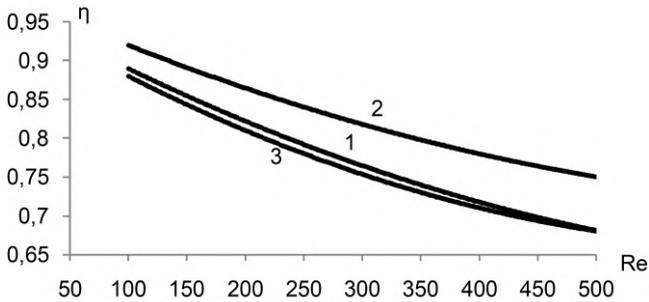


Рис. 2. Зависимость коэффициента полезного действия (η) от числа Re для насадок “Инжехим-2002” и керамических колец Рашига при $H=1$ м: 1-кольца Рашига 50Ч50Ч5; 2- Инжехим-2002 разм. 50Ч40; 3-Инжехим-2000 разм. 50Ч50

Из полученных результатов, представленных на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод о том, что насадки Инжехим-2003 М обеспечивают эффективность смешения больше колец Рашига на 2-18 %.

Работа статических смесителей с насадками “Инжехим” характеризуется высокой эффективностью и удовлетворяет техническим заданиям предприятий.

Литература

1. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Эффективность турбулентного смешения сред в насадочных проточных смесителях / А.Г. Лаптев, Т.М. Фарахов, О.Г. Дударовская // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №4. – С. 387-408.
2. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизации теплообменных установок в нефтехимии. – Казань: Казан.гос.энерг.ун-т, 2010. – 574 с.

Подсекция «**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**»

УДК 621.182.13

А.М. ДЕМИН, к.т.н., доцент,
В.Д. ТАЛАНОВ, к.т.н., профессор,
С.Б. ПЛЕТНИКОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Способы расчета параметров настройки регуляторов питания барабанных паровых котлов

На барабанных котлах ТЭС широко применяют трехимпульсные регуляторы питания (рис. 1). Методические указания по их наладке первоначально разработаны для типового набора датчиков и регулирующих устройств, выпускаемых заводами СССР для тепловой энергетики. При переходе на средства измерения и регулирования с унифицированными сигналами методические указания были модифицированы [1]. При этом базовые положения методики расчета полностью соответствуют задаче оценки постоянных альтернативных параметров настройки регулирующего устройства для тех диапазонов работы, в которых выполнена оценка свойств объекта, датчиков, исполнительного механизма и регулирующего питательного клапана (РПК). Внесенные изменения поясняют параметры настройки новых средств автоматизации. Однако можно отметить следующее.

1. За прошедшие десятилетия изменилась номенклатура средств измерения и регулирования, в т.ч. широко применяется микропроцессорная техника, которая позволяет совершенствовать известные решения при структурно-параметрическом синтезе регуляторов.

2. Параметры настройки электронных регуляторов и микропроцессорных средств регулирования устанавливаются в нормированном виде – в процентах по отношению к подключаемым к ним сигналам.

3. В электронных регуляторах имеется ограничение на изменение положений ручек чувствительности: масштабные коэффициенты меньше 1, т.к. электрические схемы масштабирования входных сигналов не позволяют их усилить.

4. В методике отдельно описаны расчеты параметров статической и динамической настройки регулятора и не указан порядок, который должен комбинироваться при расчетах внутреннего и внешнего контуров в зависимости от свойств объекта и информационных каналов.

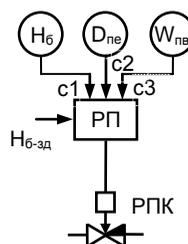


Рис. 1. Регулятор питания барабанного котла

5. В методике предлагается определить параметры настройки регулятора «по кривой разгона по расходу питательной воды», что возможно только при регистрации сигнала рассогласования и отключении от регулятора остальных датчиков, иначе не учитываются изменения статических и динамических свойств сигнала при его масштабировании и демпфировании во внутреннем контуре регулятора (инерционные свойства вводимого фильтра могут существенно исказить динамику внутреннего малоинерционного контура по расходу воды).

6. Применение рекомендаций по расчету статических параметров настройки регулятора с «естественным сигналом» в измерительных каналах предполагает знание или идентификацию свойств элементов этих каналов и их обработку.

Вариативность применяемых средств автоматизации, их ограничения и другие отмеченные признаки требуют применения четких, простых и надежных способов расчета параметров настройки регулятора, исключающих громоздкие и не всегда точно определяемые исходными данными расчеты элементов системы. Способы расчета основаны на следующих положениях.

1. Получают экспериментальные кривые разгона и по ним передаточные функции при возмущении РПК: $W_{SH}(s)$ – изменение уровня воды в барабане, мм/(т/ч) и $\%_H/\%_{РПК}$; $W_{SW}(s)$ – изменение расхода питательной воды, (т/ч)/(т/ч) и $\%_W/\%_{РПК}$, а также производную от них $W_{WH}(s) = W_{SH}(s) / W_{SW}(s)$, мм/(т/ч) и $\%_H/\%_W$.

2. Определяют время исполнительного механизма и по расходной характеристике в диапазоне работы путевых выключателей МЭО линеаризованный статический коэффициент РПК $K_{РПК}$, $\%_W/\%_{РПК}$.

3. Поскольку для электронных средств регулирования с помощью ручек чувствительности нельзя выставить коэффициенты больше 1, то применяют тот из способов расчета, который снимает это ограничение.

4. Расчет статических параметров настройки регулятора (чувствительностей s_1 , s_2 и s_3) из соотношения сигналов в полных диапазонах, на которые рассчитаны датчики, дает менее точный результат по сравнению с линеаризацией характеристик каналов измерения в реальных диапазонах изменения сигналов. В них оценивают масштабные коэффициенты информационных каналов по уровню m_H , $\%_H/\text{мм}$, расходу пара m_D , $\%_D/(т/ч)$ и расходу воды m_W , $\%_W/(т/ч)$.

5. Чувствительность по уровню нужна не только для расчета величины зоны нечувствительности по уровню, но и определяет параметр настройки эквивалентного П-регулятора внешнего контура.

6. Расчет параметров настройки регулятора должен учитывать статическое и динамическое преобразование сигналов в информационных каналах, в т.ч. в регуляторе – масштабаторами и средствами групповой, индивидуальной или индивидуально-групповой фильтрации.

Порядок расчета параметров настройки трехимпульсного регулятора питания при *прямом* способе следующий [2].

1. Задаться чувствительностью по уровню воды в барабане $c1 = 1$.

2. С учетом $c1 = 1$ и фильтра в информационном канале по уровню по $W_{WH}(s) \cdot c1 \cdot W_{\Phi 1}(s)$, мм/(т/ч) или $\%_H/\%_W$, определить коэффициент передачи $K_{п-э}$, (т/ч)/мм, или $K_{п-э}^{норм}$, $\%_W/\%_H$, эквивалентного П-регулятора для астатического объекта (по формулам ВТИ, номограммам Сибтехэнерго и т.д.).

3. Из условия компенсации статической неравномерности по уровню и расходу воды определить чувствительность по расходу воды $c3$

$$c3 = c1 \frac{m_H}{m_W K_{п-э}} \quad \text{или} \quad c3 = c1 \frac{1}{K_{п-э}^{норм}}$$

4. С учетом расчетного $c3$ и фильтра в информационном канале по воде по $W_{SW}(s) \cdot c3 \cdot W_{\Phi 3}(s)$, $\%_W/\%_{РПК}$, определить параметры K_n и T_i ПИ-регулятора (K_n , T_i и T_d ПИД-регулятора) для статического объекта (по формулам ВТИ, номограммам Сибтехэнерго и т.д.).

5. Из условия компенсации расходов воды и пара определить чувствительность по расходу пара $c2$

$$c2 = -c3 \frac{m_W}{m_D} \quad (1)$$

6. С учетом $c1$ определить зону нечувствительности

$$X_{зон} \leq (0,01...0,02) \cdot (H_1 + H_2) \cdot m_H / c1, \quad \%_H, \quad (2)$$

где H_1 и H_2 – уставки срабатывания защит на аварийный слив воды из барабана и на включение аварийного питательного насоса, мм.

Если при прямом способе чувствительности $c2$ и (или) $c3$ больше 1, то при невозможности их установки в электронных средствах регулирования необходимо уменьшить $c1$ и повторить расчет, либо применить *обратный способ* расчета параметров настройки трехимпульсного регулятора питания [2].

1. Задаться чувствительностью по расходу воды $c3 = 1$.

2. С учетом $c3 = 1$ и фильтра по воде $W_{\Phi 3}(s)$ по $W_{SW}(s) \cdot c3 \cdot W_{\Phi 3}(s)$, $\%_W/\%_{РПК}$, определить параметры K_n и T_i ПИ-регулятора (K_n , T_i и T_d ПИД-регулятора) для статического объекта.

3. Из условия компенсации расходов воды и пара по формуле (1) определить чувствительность по расходу пара $c2$.

4. Для $c1 = 1$ и фильтра по уровню по $W_{WH}(s) \cdot c1 \cdot W_{\Phi 1}(s)$, мм/(т/ч) или $\%_H/\%_W$, определить коэффициент передачи $K_{п-э}$ или $K_{п-э}^{норм}$ эквивалентного П-регулятора для астатического объекта.

5. Из условия компенсации статической неравномерности по уровню и расходу воды определить чувствительность по уровню

$$c1 = c3 \frac{m_W}{m_H} K_{п-э} \quad \text{или} \quad c1 = c3 \cdot K_{п-э}^{норм}$$

6. С учетом $c1$ по формуле (2) определить зону нечувствительности.

Для регуляторов с переменными параметрами настройки применим только прямой способ расчета.

Литература

1. **Методические** указания по наладке регуляторов питания барабанных паровых котлов: МУ 34-70-135-85 / СО 34.26.726. – Введ. 1986-10-01. – М.: Союзтехэнерго, 1987. – 56 с.
2. **Демин, Александр Матвеевич.** Наладка системы автоматического регулирования питания барабанного котла. Регулирующий прибор ПРОТАР: метод. указания / Демин А.М., Таланов В.Д., Плетников С.Б. / ФГБОУВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 72 с.

УДК 621.182.13

А.М. ДЕМИН, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Регулятор питания барабанного котла с переменными параметрами настройки

Структурный синтез автоматической системы регулирования (АСР) обеспечивает формирование требуемых статических свойств и условий для формирования требуемых динамических свойств технологического объекта управления (ТОУ) при работе системы в автоматическом режиме. На выбор структуры регулятора питания энергетического котла и качество его работы влияют различные конструктивно-технологические признаки оборудования, технологического процесса и свойств элементов системы. Для барабанных котлов (БК) ТЭС основным определяющим фактором качественной работы всех регуляторов котла является стабилизация количества воды в циркуляционной системе, показателем которого является уровень воды в барабане. Поэтому БК являются объектами стабилизации уровня в требуемом диапазоне нагрузок. АСР питания должна обеспечивать инвариантность статической характеристики ТОУ по заданному уровню $H_{б\text{зд}}$ от всех влияющих факторов, основным из которых является паропроизводительность $D_{пе}$ (рис. 1). Стабилизация уровня путем приведения в соответствие расхода подаваемой питательной воды расходу производимого перегретого пара превращает астатический, неустой-

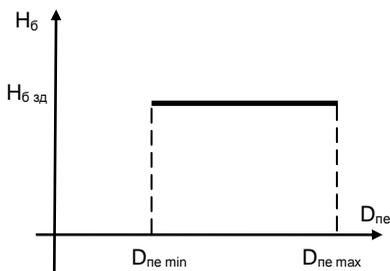


Рис. 1. Требуемая статическая характеристика АСР питания БК

чивый объект без самовыравнивания в объект устойчивый с самовыравниванием. Это позволяет вести согласованное с работой водопарового тракта управление топливом и газоздушным трактом.

Качественная работа внутрибаранных устройств зависит от статической и динамической точности стабилизации уровня. На точность работы АСР питания оказывают влияние компоновка ТЭС, вид сжигаемого топлива, действующие внешние и внутренние возмущения, нелинейные свойства объекта, статические, динамические и спектральные свойства измеряемых параметров, места их отбора и способы обработки, количество барабанов и регулирующих питательных клапанов, переход с впрыска в пароохладители собственного конденсата на питательную воду и т.д. Применение трехимпульсного регулятора питания с датчиками уровня воды в барабане, расходов перегретого пара и питательной воды во многих случаях не обеспечивает предъявляемых сегодня высоких требований к работе регулятора питания. Завышенная зона нечувствительности подчинена регулированию соотношения трех сигналов. Поэтому для обеспечения статической точности стабилизации уровня в АСР дополнительно вводят корректирующий регулятор по сигналу от датчика уровня. Однако альтернативные параметры настройки не позволяют обеспечить инвариантность динамических свойств АСР к изменению условий работы ТКУ.

Применение системы регулирования с поисковым алгоритмом адаптации параметров настройки для объекта без самовыравнивания при ограничениях на перемещение РПК может нарушить устойчивость работы ТКУ. Разделение вычислительных функций формирования законов регулирования в полевых контроллерах управления исполнительными механизмами и алгоритмов адаптации станциями верхнего уровня требует отработки перехода на альтернативные параметры в случаях отказов взаимодействия элементов такой распределенной системы. Поэтому обоснованным можно считать изменение параметров настройки регулятора по сигналу задания или его эквиваленту.

Характерным эквивалентным признаком для большинства совместных влияющих режимных факторов является изменение нагрузки в рабочем диапазоне. Для улучшения динамической точности работы регулятора питания БК предлагается ввести коррекцию параметров настройки K_n и T_i регулятора питания (РП) по этому сигналу через нелинейные элементы (НЭ) (рис. 2) [1].

Дополнительно при нарушении балансового соотношения между расходами воды и пара при периодической продувке может быть использован исчезающий сигнал по положению клапана $S_{кпп}$, подключенный через дифференциатор. Управление динамической точностью РП предлагается вести согласованно с управлением его статической точностью путем изменения зоны нечувствительности $X_{зон}$ по сигналам расходов перегретого пара и питательной воды (например, по высокочастотным составляющим этих сигналов). При этом статическая точ-

ность работы системы в целом задается постоянной величиной зоны нечувствительности корректирующего регулятора уровня.

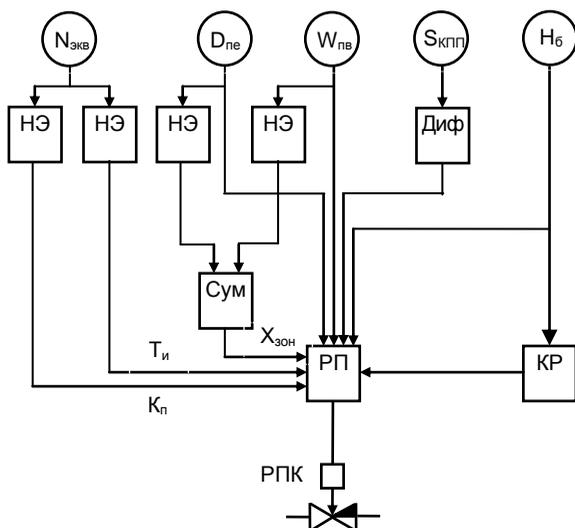


Рис. 2. Автоматическая система регулирования питания БК: РПК – регулирующий питательный клапан; $H_б$ – датчик уровня; $W_{пв}$ – датчик расхода питательной воды; $D_{пе}$ – датчик расхода пара; РП – регулятор питания; КР – корректирующий регулятор; $S_{кпп}$ – датчик положения клапана периодической продувки; Диф – дифференциатор; $N_{эжв}$ – датчик нагрузки энергоустановки; НЭ – нелинейные элементы; Сум – сумматор

В зависимости от особенностей ТОО и свойств информационных сигналов НЭ могут выполнять разные функции. Способ определения статических преобразований с помощью НЭ известен. Эти зависимости можно найти путем расчета или экспериментально [2].

Для управления скоростью изменения параметров целесообразно ввести в состав НЭ специальную функцию. Например, при использовании микропроцессорных средств это могут быть фильтр скользящего среднего (СКС) или фильтр дискретного среднего. Эти фильтры позволяют согласовать спектральные свойства объекта управления и информационных сигналов. Возможно применение одного фильтра для нескольких параметров настройки (рис. 3) и формирования переменного интервала усреднения $T_{иу}$ в зависимости от величины нагрузки (штриховая линия).

КР обеспечивает инвариантность статических свойств АСП по уровню,

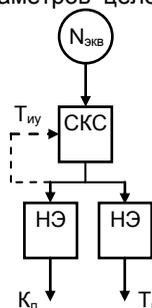


Рис. 3. Структура динамического и статического преобразования сигнала в канале ввода переменных параметров настройки регулятора

РП – динамических по условиям работы. Предлагаемая структура АСР питания БК позволяет вести параметрический синтез, перейдя от постоянных альтернативных параметров настройки к динамически и статически управляемым в зависимости от нагрузки котла в целях обеспечения требуемой статической и динамической точности стабилизации уровня воды в барабане.

Литература

1. **Демин, Александр Матвеевич.** Система регулирования питания водой барабанного парогенератора // Патент № 2426943 от 20.08.2011. – Бюллетень ФИПС, 2011, № 23.
2. **Клюев, Анатолий Степанович.** Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справ. пособие / А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев, А.Г. Товарнов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

УДК 681.5

И.В. ТЕТЕРЕВКОВ, ст. преподаватель
(ИГЭУ) г. Иваново

Проблемы реализации нетиповых алгоритмов управления с помощью современных программно-технических комплексов

Для современного этапа развития теории автоматического управления характерны постановка и решение задач, учитывающих неточность наших знаний об объектах управления и действующих на них возмущениях. На практике это означает, что управление технологическим процессом или объектом с использованием классических управляющих устройств в виде типовых регуляторов с фиксированными настройками не позволяет гарантировано обеспечить требуемое качество функционирования.

Кроме того, задача повышения общей экономической эффективности работы всего оборудования в целом требует изменения самой логики действий: критерии качества управления объектом могут меняться в зависимости от режимов его эксплуатации. Так, при поддержании номинальной мощности агрегата на первый план может выйти задача минимизация дисперсий технологических параметров, а при переходе на новый режим работы главным может стать критерий максимального быстрогодействия.

Наличие микропроцессорной составляющей в современных программно-технических комплексах (ПТК) позволяет решать задачи построения систем управления, не связанных с применением стандартного жесткого ПИД-закона регулирования и его модификаций. Среди

наиболее перспективных классов современных систем стоит выделить следующие [1, 2].

1. Адаптивные системы за счет самоподстройки собственных коэффициентов или изменения своей структуры самостоятельно приспосабливаются к изменившимся условиям функционирования объекта. В результате улучшается качество управления и не происходит потери устойчивости как при координатных, так и при параметрических возмущениях в объекте.

2. Системы на базе нечеткой логики позволяют использовать для управления некий набор экспертных знаний, сформулированных не в четких числовых понятиях, а в "нечетком", то есть не в количественном, а в качественном виде. Это придает подходу к управлению необходимую гибкость и позволяет справиться с различными ситуациями, возникающими в ходе эксплуатации объекта.

3. Оптимальные системы ориентированы на достижение некоторого критерия оптимальности, который может быть связан с разными факторами. Например, может минимизироваться функционал [2], учитывающий как задачу снижения дисперсии регулируемого параметра, так и минимизацию затрат на управление. В качестве отдельных типов таких систем можно выделить системы, оптимальные по быстродействию, и экстремальные системы, направленные на достижение максимума статической характеристики объекта [3].

В процессе реализации подобных нетиповых алгоритмов управления возникает несколько проблем, которые необходимо учитывать в процессе создания систем. Рассмотрим основные группы вопросов, требующих своего решения при проектировании.

1. В первую очередь необходимо выбрать тот уровень технической структуры ПТК, на котором будет реализовываться выбранный алгоритм. При этом нужно учитывать, что на нижнем уровне (то есть с помощью микропроцессорного контроллера) можно использовать только ограниченный набор функциональных операций, прописанных в программном обеспечении контроллера. Верхний же уровень (то есть операторская или расчетная станция) позволяет решать задачи практически любой сложности с использованием для этого возможностей языков программирования высокого уровня, включая параллельную сетевую обработку информации.

Ограниченность возможностей контроллеров тем не менее не является препятствием для реализации большинства видов адаптивных и нечетких систем, а также для оптимальных по быстродействию и экстремальных систем. Реализация оптимальных систем, минимизирующих заданные функционалы, требует достаточно сложных вычислительных операций, связанных, например, с инвертированием матриц и численным решением матричных уравнений Риккати. Подобные вычислительные действия на уровне контроллера выполнить или невозможно, или, как минимум, нецелесообразно. Та же ситуация возникает при

построении нейро-нечетких систем. Большое количество нейронов в слоях нейронной сети требует значительного количества вычислительных операций, для чего необходимо или выделять отдельный контроллер, или поручать задачу имитации нейронной сети элементам верхнего уровня ПТК.

2. Проблема разрядности микропроцессора возникает в случае повышенной чувствительности вычислительного алгоритма к точности представления данных. Например, для многих адаптивных алгоритмов минимально воспроизводимое во многих контроллерах число в 0,01% является явно недостаточным для их корректной работы. Проблемы создает и метод численного интегрирования, реализованный в конкретном контроллере. Все это может привести к неустойчивости вычислительного процесса, для преодоления которой приходится применять специальные методы "огрубления", например, схемы с искусственным введением зоны нечувствительности, схемы с дополнительной обратной связи по вычисляемому параметру или схемы расширения сигнала ошибки (например, схемы Нарендры, Валавани, Фойера и др. [2]).

Здесь же стоит упомянуть и влияние шага квантования. Для некоторых вычислительных алгоритмов малый шаг квантования контроллера является избыточно малым или приводящим к слишком частому "дерганию" объекта. При этом необходимо или применять алгоритмы фиксации, "пропускающие" при расчете несколько контроллерных тактов, или переносить расчет на верхний уровень ПТК – на операторскую или расчетную станции. Такая специфика особенно характерна для управления теплотехническими объектами, обладающими значительной инерционностью.

3. Наконец, последняя проблема при практической реализации рассматриваемых нетиповых алгоритмов связана с вопросами осуществления управляющих воздействий на объект. Применение стандартных исполнительных механизмов с импульсным управлением часто ограничивает возможность алгоритмов. Не слишком критичным это обстоятельство является для нечетких, экстремальных и большинства типов оптимальных систем. Для адаптивных и оптимальных по быстродействию систем предпочтительнее использовать частотное управление регулирующими органами.

В заключение отметим, что учет указанных аспектов создания нетиповых систем управления позволяет улучшить качество принятия решений в процессе их создания и, тем самым, повысить эффективность управления технологическими объектами с их помощью.

Литература

1. **Ким Д.П.** Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
2. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
3. **Либерзон Л.М.** Системы экстремального регулирования. – М.: Энергия. 1985.

УДК 621.311

А.В. САФРОНОВ аспирант,
П.А. ЩИННИКОВ д.т.н., профессор
(НГТУ), г. Новосибирск

Повышение эффективности энергоблока за счет применения информационно-измерительных систем

Эффективность принятия управленческих решений при техническом обслуживании энергоблоков тепловых электрических станций (ТЭС) существенно зависит от объема и качества информации о состоянии оборудования. Источниками этой информации являются автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) ТЭС, система отчетных форм технико-экономических показателей, данные результатов регулярных испытаний элементов оборудования и другие [1].

Оснащение энергопредприятий вычислительной техникой позволяет разработчикам предложить ряд информационных систем для поддержки принятия управленческих решений. В последние годы особенно часто создаются системы для автоматизированного расчета технико-экономических показателей (ТЭП)[2] [3].

Однако само определение ТЭП работы ТЭС возможно лишь с определенной точностью. Эта точность зависит от специфических методических погрешностей алгоритма расчета, погрешностей измерительной техники и методики измерений. Рациональный алгоритм расчета ТЭП позволяет значительно снизить влияние первой группы погрешностей на точность конечного результата. Но даже при полном исключении погрешности этой группы фактическая погрешность вычисления ТЭП в рабочем диапазоне изменения параметров при использовании серийно выпускаемых приборов находится в пределах 0,3-0,6% для КПД парогенератора, 2,3-3,0% для показателей турбины и энергоблока в целом[4].

Поскольку экономическая эффективность от применения АСУ ТП на ТЭС лежит в пределах вероятностного значения ТЭП, то повышение точности исходной информации для информационно-вычислительных систем (ИВС) актуальна. Как показывают расчеты, повышение на 1% эксплуатационного КПД энергоблока за счет оперативного контроля ТЭП при использовании ИВС является эффективным [5].

При реализации автоматического расчета технико-экономических показателей возникает так же ряд специфических методических погрешностей, обусловленных:

- дискретным интегрированием при первичной обработке информации, поступающей от объекта;
- вычислением нелинейных показателей по средним значениям параметров;

- применение аппроксимирующих уравнений для расчета термодинамических функций;
- динамическими связями входных и выходных энергетических потоков;
- использованием при расчете ТЭП ряда констант вместо не измеряемых в ИВС величин.

Инструментальные погрешности вычисляемых показателей складываются из ошибок, обусловленных:

- погрешностями измерения технологических параметров;
- машинной обработкой информации (ограничение разрядности ИВС, округлением, заменой ряда математических операций их приближенными аналогами).

Анализ показывает, что эти погрешности путем усложнения алгоритма и реализующей его программы можно снизить до некоторого заданного уровня, при котором их влияние на полную погрешность показателей будет незначительным.

Погрешность расчетов ТЭП при использовании ИВС может быть снижена в результате индивидуальной градуировки элементов каналов измерений, стабилизации внешних условий, применение оптимальных измерительных средств и приборов повышенной точности. В комплексе указанные мероприятия могут снизить погрешности ТЭП до 1,1% для блока в целом [6] [7].

Эффективным мероприятием для повышения точности является градуировка отдельных элементов или всего измерительного канала с помощью более высокоточной контрольной аппаратуры. Выявленные в процессе градуировки систематические погрешности могут быть затем уменьшены, либо учтены при вычислении показателей. С помощью индивидуальной градуировки можно снизить погрешность канала измерения мощности генератора более чем на 40%, а расход пара вследствие относительно высокой погрешности сужающих устройств лишь на 15-20%. Полная погрешность показателей турбины и блока снижается при этом на 25%.

Снижение дополнительных погрешностей, которые в совокупности могут даже превышать основную погрешность прибора. Основными мероприятиями, способствующими снижению дополнительных погрешностей является установка приборов в помещениях с постоянной температурой и влажностью, стабилизация источников питания, тщательная подгонка сопротивления входной и выходной цепи, устранение вибраций, влияния магнитных полей и другие мероприятия, а так же подбор для измерений основных технологических параметров приборов, имеющих наименьшие дополнительные погрешности. В результате стабилизации внешних влияющих факторов полная погрешность показателей может быть уменьшена на 20%.

Литература

1. **Аронсон К.Э., Брезгин В.И.,** Бродов Ю.М., Акифьева Н.Н., Руденко А.С., Брезгин Д.В. Система информационной поддержки принятия решений при техническом обслуживании оборудовании ТЭС // Теплоэнергетика. - 2006. - №10. - С.55-61.
2. **Сенягин Ю.В., Щербич В.И.,** Чижонко В.И., Шамаков Ю.А. Опыт создания информационно вычислительных систем при модернизации традиционных информационных систем котло- и турбоагрегатов ТЭС // Электрические станции. – 2003. - №10. – С.34-39.
3. **Галашов Н.Н., Метнев С.В.** Автоматизированный расчет нормативных и фактических показателей ТЭЦ // Электрические станции. – 2008. - №11. – С.45-50.
4. **Цейтлин Р.А., Степанов В.И., Шестов Э.Д.** К вопросу о точности автоматизированного вычисления технико-экономических показателей энергоблока // Теплоэнергетика. - 1975. - №1. -С.8-13.
5. **Овчинников Ю.В., Ноздренко Г.В., Тимашев В.И.** Повышение точности исходной информации в ИВС путем применения методики согласования балансов // Управление режимами и развитием электроэнергетических систем в условиях АСУ - межвузовский сборник трудов под редакцией В.К. Щербакова. Новосибирск, 1977. С.166-174.
6. **Овчинников Ю.В., Г.В. Ноздренко, И.М. Алтухов.** Применение методики согласования балансов для уточнения исходной информации применительно к ТЭС // Управление режимами и развитием электроэнергетических систем в условиях АСУ - межвузовский сборник трудов под редакцией В.К. Щербакова. Новосибирск, 1980. С.45-53.
7. **Аракелян Э.К., Панько М.А., Асланян А.Ш.** Методические положения оценки технико – экономической эффективности модернизации АСУ ТП электростанций //Теплоэнергетика. - 2010. - №10. - С.45-49.

УДК 681.515

А.В. КОНДРАШИН, к.т.н, профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

Современная теория управления: возможности и реалии

Динамичное развитие технических средств управления техническими объектами, обусловленное бурным внедрением современных программно-технических комплексов, позволяет существенно повысить эффективности управления, прежде всего, за счёт:

- 1) обеспечения экономически обоснованного уровня надёжности системы управления;
- 2) постановки новых задач управления, не реализуемых старых типах технических средств;
- 3) внедрения принципиально новых и более совершенных алгоритмов управления;

- 4) возможности использования результатов оперативного наблюдения за процессами для целей упреждающей диагностики;
- 5) высвобождения оператора от рутинной работы и вовлечения его в задачи принятия решений, обеспечивающих наиболее благоприятное ведение технологического режима;
- 6) возможности в режиме реального времени оценивать текущие технико-экономические параметры режима и их отличие от оптимальных (эталонных, нормативных) значений.

Не претендуя в рамках данного доклада на развёрнутый анализ всех возможных направлений повышения эффективности, ограничимся аспектами, так или иначе выходящими на теорию управления техническими системами (ТУТС). Подчеркнём, что именно эту теорию имеет ввиду автор, а не теорию автоматического управления (ТАУ). Такое замечание имеет существенное значение, т.к. в корне изменяет взгляд на современную АСУ ТП.

Посмотрим на господствующую в наше время практику разработки и внедрения АСУ ТП. В лучшем случае фирмы, участвующие в процессах проектирования, ориентируются на государственные и отраслевые стандарты, регламентирующие объём функций и задач управления. Но обратим внимание, что действующий в теплоэнергетике норматив [1] лишь закрепляет традиционные возможности в реализации функций управления. В частности, п.Г.2.1.1 гласит:

«Программно-технические комплексы реализуют следующие функции управления энергетическим оборудованием:

- дистанционное управление;
- автоматическое регулирование и программное управление;
- автоматическое логическое управление и технологические блокировки;
- технологические защиты и защитные блокировки».

А в пункте Г.2.3.1 прямо записано, что «Автоматическое регулирование должно осуществляться, как правило, по стандартным законам регулирования (П, ПИ, ПИД) с необходимыми преобразованиями входной и выходной информации».

А вот здесь можно обратиться к современной ТУТС и оценить к какой же исторической эпохе в развитии этой теории относятся перечисленные выше функции управления.

Обращает на себя внимание продолжающееся на практике размежевание функций автоматического регулирования и логического управления, nasledующее уходящие в небытие возможности старой аппаратуры и методов её параметрической настройки. Современная теория управления уже давно [2] предлагает смотреть на задачу управления, как логико-динамическую задачу. Актуальную трактовку этой теории можно найти в трудах отечественной научной школы, руководимой А.С. Бортакoвским[3].

Возможность изменения параметров системы с середины 70-х годов XX-го века «застряла» на уровне внедрения методов автоподстройки и автонастройки, предложенных В.Я. Ротачем и В.Ф. Кузициным [4] и реализованных в аппаратных промышленных регуляторах типа «Протар». Перспектива внедрения современных адаптивных систем уже отражалась в работе автора [5]. За два года, прошедших после этой публикации никаких изменений не произошло.

С большим трудом при личном участии В.А. Биленко (ВТИ, ЗАО «Интеравтоматика») пробиваются в жизнь системы, реализующие концепцию многосвязного управления [6], своим появлением обязанного практической потребности управления турбинами с регулируемыми отборами пара [7].

Казавшаяся понятной задержка с внедрением в практику управления теория, основанная на моделях в пространстве состояний объекта [8] и требовавшая для своей реализации хорошего «вычислителя», в наше время, практически снявшее ограничение на скорость обработки информации в микропроцессорных системах, до сих пор не находит применения. Возможность перехода в сугубо алгебраическую область вычислений, использования тонкого (чувствительного к запросам технологии) обобщённого критерия эффективности управления, а так же принципиальная возможность извлечения из результатов оперативных наблюдений математическими способами дополнительной информации о значениях технологических параметров – всё это, увы, не востребовано в век компьютерного бума.

Только два направления повышения эффективности управления, выделенных выше под номерами 4 и 6, нашли своё достойное место в упомянутом РД [1] (пункты Г.1.10 – Г.1.12). Однако и здесь возможности внедрения современных способов управления не реализованы в полной мере. Теория управления сложными техническими системами уже давно предлагает способы оперативного управления, основанные на теории и методах искусственного интеллекта; [10,11]. В отличие от баз данных (БД) базы знаний (БЗ) не являются общепринятым компонентом современных АСУ ТП в энергетике. Перспективы их внедрения вполне очевидны, т.к. позволяют;

- разгрузить оперативный персонал от сложных операций в типовых режимах работы оборудования, которым соответствуют правила логического вывода, основанные на чёткой логике;
- решать оперативные задачи в условиях неполной информации за счёт алгоритмов обработки ситуационной информации с помощью алгоритмов с нечёткой логикой;
- своевременно диагностировать развитие оперативных ситуаций по нештатному сценарию и предлагать решения, направленные на предотвращение нештатных ситуаций или насущного уменьшения размера последствий в случае необратимости процессов.

Обилие работ (см., например, [12,13]), отражающих усилия учёных в поисках решения задач на основе теории нейронных сетей, свидетельствует об их актуальности и перспективности.

Что же препятствует прогрессу в развитии систем управления? Не претендуя на всесторонний анализ, замечу, что всё это во власти людей, ответственных за принятие соответствующих решений в процессах размещения заказа на АСУ ТП и разработки технических заданий. Насколько осведомлены эти лица, принимающие решения, в вопросах, затронутых в этом материале? Ответ можно найти, понимая где, как и когда получали профессиональное образование эти специалисты.

Образовательные стандарты и типовые рабочие программы профессиональной подготовки по своей сути современны и в целом отвечают текущему уровню развития информационных технологий. Студенты имеют возможность получать информацию и изучать современные ПТК, SCADA-системы, но по-прежнему учатся реализовывать в них замшелые алгоритмы управления.

В качестве примера сошлюсь на два учебника по теории автоматического управления, предназначенных для студентов, обучающихся по автоматизации технологических процессов в энергетике [14,15]. Они отличаются годами издания. Попробуйте найти существенное отличие. Оно есть, но не в содержании, не в методах и способах управления, не в классах задач. По-прежнему излагается классическая теория систем автоматического регулирования применительно к стационарным режимам работы оборудования.

Вывод может показаться несколько неожиданным: система образования в этой предметной области отстала от времени, не нацелена на перспективу.

Уделяя этой проблеме в последнее время заметное внимание и общаясь с профессионалами из НИИ и различных фирм, имеющих отношение к созданию и внедрению АСУ ТП на основе современных ПТК, прихожу к пониманию того, что и это сообщество профессионалов действует разрозненно, адресуя свою озабоченность ситуацией прежде всего заказчикам систем. На мой взгляд, было бы очень полезно на базе одной из ведущих организаций (например, на базе института проблем управления РАН) организовать постоянно действующую площадку, на которой специалисты в области АСУ ТП имели бы возможность продемонстрировать потенциальным заказчикам достижимый уровень технического совершенства систем управления. Пока этому мешает коммерческая разрозненность фирм, производителей ПТК, отсутствие большого желания сравнивать свои разработки. Поэтому активность иностранных фирм, предлагающих свои современные системы на отечественном рынке, будет доминировать и будет тормозить развитие отечественной промышленности. А значит и отечественная наука останется невостребованной.

Литература

1. **РД 153-34.1-35.127-2002.** Общие технические требования к программно-техническим комплексам для АСУ ТП тепловых электростанций.- М.: Москва, РАО ЕЭС, 2002,
2. **Семенов В.В.** Динамическое программирование в синтезе логико-динамических систем // Приборостроение. – 1984, №2. – с.3-24.
3. **Бортаковский А.С.** Субоптимальное управление логико-динамическими системами в условиях параметрической неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2007. - №11. -С.105-121.
4. **Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Ключев А.С..** Автоматизация настройки систем управления, Москва, Энергоатомиздат, 1984.
5. **Кондрашин А.В.** Возможности повышения маневренности оборудования ТЭС при внедрении современных АСУ ТП// Сб. научных трудов XVI международной НТК «Бенардосовские чтения».- 2011.-т.2.-Иваново, ИГЭУ - С.139-141.
6. **Биленко В.А., Белькинд Л.А.** Применение методов оптимального управления для построения многосвязных систем регулирования энергоблоков // Энергохозяйство за рубежом. 1985. №4. С. 14-20.
7. **Вознесенский Л.Н.** О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров// Автоматика и телемеханика-1938.- С.4-5.
8. **Калман Р., Фалб П., Арбиб М.** Очерки по математической теории систем.- М.:Мир, 1971.-400 с. .
9. **Красовский А.А.** Исторический очерк развития и современные проблемы самоорганизующегося регулятора // Устойчивость и колебания нелинейных систем: тез.докл. V Междунар. семинара. – М.: ИГУ, 1998.
10. **Поспелов Д.А.** Логико-лингвистические модели в системах управления.-М.: Энергоиздат, 1981.- 232 с.
11. **Люгер Д.** Искусственный интеллект. - М.: Мир, 2003. - 690 с.
12. **Галушкин А.И.** Теория нейронных сетей. Кн. 1: Учеб.пособие для вузов / Общая ред. А.И Галушкина. - М.: ИПРЖР, 2000. - 416 с.: ил.
13. **Хайкин Саймон.** Нейронные сети: полный курс, М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
14. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
15. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления.-М: Издательской дом МЭИ, 2008. – 396 с.

УДК 518.5

Е.Л. АРХАНГЕЛЬСКАЯ,
ст. преподаватель
(ИГЭУ) г. Иваново

Проблемы выбора ПТК

В последние годы потребителям стала доступна практически вся гамма продукции средств автоматизации, выпускаемых как отечественными, так и зарубежными производителями. Это приводит к заметной растерянности потенциальных заказчиков, оказавшихся перед огромным числом различных предложений.

Поэтому выбор рационального для каждой конкретной задачи комплекса является важным для любого заказчика. В то же время определение наилучшего ПТК из всей их совокупности, имеющейся на рынке, является далеко не однозначной и не простой задачей, поскольку оно должно учитывать все свойства автоматизируемого объекта, удовлетворять поставленным требованиям к системе контроля и управления, находить некий рациональный компромисс между различными противоречивыми критериями. Надо еще учитывать и то, что рынок средств автоматизации является подвижным и динамичным: продукция быстро стареет, часто появляются новые фирмы и новые типы средств.

Ввиду этого представляется важным рассмотреть те свойства ПТК, которые отличают их с точки зрения использования, позволяют потенциальным пользователям лучше понять разницу между отдельными комплексами, связать определенные свойства объекта и требования к системе его автоматизации с характеристиками и параметрами конкретных ПТК.

Структура ПТК определяется средствами и характеристиками взаимосвязи отдельных компонентов комплекса (контроллеров, пультов оператора, модулей УСО), т.е. его сетевыми возможностями. Гибкость и разнообразие возможных структур ПТК зависит от числа имеющихся сетевых уровней, возможных типов связи на каждом уровне сети (шина, звезда, кольцо), максимального числа узлов (компонентов комплекса), подключаемых к каждой сети, скорости передачи информации при разных типах кабеля, методе доступа компонентов к сети.

Свойства и параметры основного компонента ПТК - контроллера - существенно различаются у разных производителей. Такие показатели как: рабочая частота, наличие и объем различных видов памяти, операционная система контроллера, максимальное число различных входов и выходов (аналоговых, дискретных, импульсных), которые можно подключить к контроллеру. В блоках ввода/вывода важно их имеющееся разнообразие в части числа сигналов, опрашиваемых одним блоком, и параметров коммутируемых ими сигналов. Для объектов пожаро- и взрывоопасных необходимо наличие искробезопасных блоков; в зависимости от особенностей заземления датчиков, от наличия электромагнитных помех может потребоваться тот или иной тип гальванической развязки. Предпочтительно иметь дело с ПТК, у которого существует ряд модификаций пультов оператора или в их качестве могут использоваться различные модификации персональных ЭВМ. Возможность выбора варианта пульта оператора обеспечивает его экономичное согласование с требуемыми параметрами, а наличие вариантов по числу мониторов на пульт и размеру их экранов, типу клавиатур (типовая, функциональная, сенсорная и т.д.), аудио сигнализации, и т.п. - влияет на удобство и комфортность работы операторов. Важными для многих применений являются динамические параметры ПТК: минимальный цикл опроса датчиков и минимальное время реакции на аварийные сигналы при их обработке в цепях

аварийной защиты, минимальный цикл смены динамических данных в кадре на пульте оператора и смены самих кадров, а также минимальное время реакции на команду оператора с пульта, минимальное время перезапуска всей системы. Поскольку использование резервирования и его полнота напрямую связаны со стоимостью системы, важно правильно оценить необходимость и желательный вид резервирования разных частей ПТК в разрабатываемой системе автоматизации: частей для аварийных контуров, для блокировочных зависимостей, для контуров регулирования, для цепей контроля. Частью ПТК является его прикладное программное обеспечение, которое подразделяется на следующие части: программное обеспечение контроллеров, программное обеспечение пультов операторов (характеристики SCADA-программы), включаемые в ПТК по желанию пользователей пакеты прикладных программ, прилагаемые к ПТК программы САПР. Полнота, простота, удобство использования имеющихся инструментов создания прикладного программного обеспечения; возможность их применения технологическим персоналом, не являющимся программистами; наличие в прилагаемых программах совершенных алгоритмов управления и разнообразных пакетов обработки информации - все это определяет важнейшие показатели проектирования и эксплуатации системы автоматизации: время разработки системы и необходимую квалификацию разработчиков, эффективность эксплуатации системы и комфортность работы с ней операторов и обслуживающего персонала, возможности и легкость расширения и модернизации системы.

Для всего этого необходимо иметь достаточно подробную объективную информацию о текущем состоянии рынка автоматизации. Однако такая информация доступна только обладателями этой продукции, поскольку на сайтах производителя представлена только реклама, т.е. поверхностная информация, которой крайне недостаточно. Поэтому потенциальные покупатели имеют сведения, основанные на журнальных статьях, неполных описаниях отдельных систем, их показах на выставках и, конечно же, интернет источники, на которые нельзя полностью полагаться.

Число производителей ПТК достаточно велико и концепции, реализуемые ими, существенно различаются. В условиях многовариантности необходима разработка критериев и методик выбора ПТК. Для этой цели очень хорошо подходит метод классификации основанный на кластерном анализе. В нем используется так называемый политетический подход. Все группировочные признаки одновременно участвуют в группировке, т.е. они учитываются все сразу при отнесении наблюдения в ту или иную группу. При этом, как правило, не указаны четкие границы каждой группы, а также неизвестно заранее, сколько же групп целесообразно выделить в исследуемой совокупности.

Особенности применения систем питания и подачи теплоносителя потребителю на учебном стенде в целях экономии сжигаемого топлива

В двухтрубных тепловых сетях с нагрузками отопления и горячего водоснабжения в период высоких температур наружного воздуха происходит повышение температуры внутри отапливаемых помещений, что ведет к перерасходу сжигаемого топлива. Экономия топлива в этот период возможна за счет организации подмеса обратной сетевой воды в подающую и подающей сетевой воды в обратную, образуя два узла смешения. Основным техническим требованием является обеспечение равных коэффициентов смешения в узлах, так как это позволяет сохранить расчетные расходы сетевой воды по участкам тепловой сети.

На кафедре АТП ИГЭУ был создан и апробирован учебный стенд для контроля и регулирования коэффициента смешения. Коэффициент смешения в узле смешения является отношением расхода теплоносителя, подаваемого тепловому потребителю, к расходу отработавшей сетевой воды.

Экспериментальный стенд состоит из теплогидравлической модели тепловой сети и пульта системы автоматического контроля и регулирования.

Теплогидравлическая схема установки (рис. 1) состоит из двух контуров: горячего теплоснабжения и холодного. В пластинчатом теплообменнике (3), выполняющим роль потребителя осуществляется передача теплоты от горячего теплоносителя к холодному. Нагрев воды горячего контура осуществляется последовательно в емкостном (1) и скоростном (2) водонагревателях, представляющие собой модель ТЭЦ. Сетевой циркуляционный насос (4) оснащен частотно-регулируемым приводом (ЧРП) и служит для регулирования коэффициента смешения в узле, образованном подмесом подаваемой «потребителю» сетевой воды в отработавший теплоноситель. Насос смешения (5), также оснащенный ЧРП, совместно с рециркуляционным насосом (6) с ЧРП и регулируемым клапаном (7) регулирует коэффициент смешения во втором узле, образованном добавлением отработавшего теплоносителя в подаваемую потребителю сетевую воду.

Регулирование первого контура, созданного первым узлом смешения, можно сравнить с регулированием системы питания, так как сетевая вода на выходе из этого узла подается на водонагреватели; регулирование второго контура, основанного на втором узле смешения – с системой подачи теплоносителя потребителю.

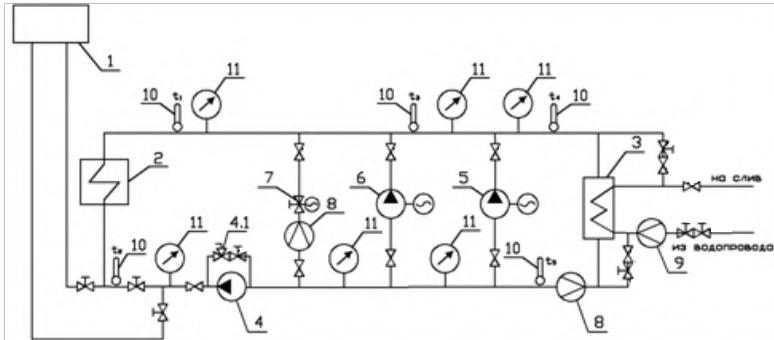


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для исследования функционирования насосного узла смешения с ЧРП и устройства по устранению перерасхода топлива с ЧРП и регулируемым клапаном:

1 – ёмкостной подогреватель; 2 – скоростной подогреватель; 3 – пластинчатый теплообменник; 4 – сетевой циркуляционный насос; 4.1 – воздухоотделитель; 5 – насос смешения с ЧРП; 6 – рециркуляционный насос с ЧРП; 7 – регулируемый клапан; 8 – ультразвуковые расходомеры горячей и холодной воды; 9 – счётчик водопроводной воды; 10 – термометр; 11 – манометр

В состав пульта управления входят: датчики температуры, давления и расхода, контроллер Segnetics SMH2Gi.

В результате проведенной опытно-экспериментальной работы на учебном стенде была составлена система автоматического контроля и регулирования коэффициентов смешения и доказана функциональность и эффективность организации подмеса подаваемого потребителю теплоносителя в обратную сетевую воду.

Литература

1. В. О. Веремьев, И. А. Зименков, В.М. Пушков Контроллер для регулирования коэффициентов смешения в тепловой сети // Материалы рег. науч.-техн. конф. «Энергия 2012» – Иваново, 2012. – №7. –С. 30-31.

Сравнительная метрологическая оценка алгоритмов вычисления количества тепловой энергии

В настоящее время к средствам коммерческого учета количества тепловой энергии (КТЭ) служащих для финансовых расчетов между поставщиком и потребителем, предъявляются повышенные метрологические требования. Повышение точности вычисления КТЭ является актуальной задачей.

Повышение точности вычисления КТЭ может быть достигнуто как за счет применения более совершенных приборов учета (снижение инструментальной составляющей погрешности), так и за счет использования более совершенных алгоритмов вычисления (снижение методической составляющей погрешности).

Для сравнительного исследования различных алгоритмов вычисления КТЭ использовалась компьютерная модель тепловой сети, созданная в среде LabView компании National Instruments.

Модель включает в себя модели источника и потребителя тепловой энергии и позволяет:

- контролировать температуру, давление и расход теплоносителя в прямом (подающем) и обратном трубопроводах;
- изменять температуру и расход теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах;
- измерять фактическое количество тепловой энергии, отпущенной поставщиком потребителю.

На основании сравнения фактического расхода КТЭ со значениями, рассчитанными с использованием различных алгоритмов, можно сделать выводы

- о величине погрешности конкретного метода вычисления;
- о зависимости погрешности алгоритма от режима работы тепловой сети (т.е. от скорости и величины изменения параметров теплоносителя).

Сравнительная метрологическая оценка методов вычисления КТЭ с использованием модели тепловой сети позволила сделать вывод о возможности повышения точности существующих алгоритмов за счет корректного учета динамических характеристик первичных преобразователей температуры.

Литература

1. **Цапенко М.П.** Измерительные информационные системы.– М.: Энергоатомиздат, 1985 г.
2. **Легков В.И., Рябинкин В.Н.** О методической погрешности учета по средним значениям параметров энергопотребления. / Промышленная энергетика, 1993 г., № 9.

Повышение надежности эксплуатации турбины ПТ-60-130

Паровые турбины являются неотъемлемым элементом современной тепловой электростанции. Повышение уровня их надежности, безопасности и экономичности является одной из основных задач, стоящих перед энергетиками.

Одной из приоритетных является задача увеличения срока эксплуатации оборудования. Для этого необходимо проводить обновление и реконструкцию действующего оборудования, внедрять мероприятия по повышению его ресурса и надежности.

Реконструкция турбин должна быть комплексной и обеспечивать не только увеличение ресурса оборудования, но и повышение его технико-экономических показателей.

Данные мероприятия были реализованы на Казанской ТЭЦ-3 в период проведения ремонтов турбин ПТ-60-130 и Т-100-130.

Турбина ПТ-60-130 до ремонта имела постоянное пропаривание разъема ЦВД. По рекомендации ВТИ на разъеме верхней половины корпуса ЦВД выполнена фрезеровка под уплотняющие шпонки шириной 12 мм, глубиной 10 мм и длиной 1,2 мм с каждой стороны корпуса. Эти фрезеровки только усугубляли положение и не позволили уплотнить разъем даже с помощью контролируемой затяжки шпильки. В результате чего было принято решение о заварке шпоночного паза. Заварка фрезеровок производилась в соответствии с технологической инструкцией (далее по тексту ТИ), разработанной ОАО «НПО ЦКТИ».

Перед заваркой фрезеровки были разделаны под сварку механическим способом. Выборки были проконтролированы визуально-измерительным контролем и травлением, капиллярной дефектоскопией. Проведенный контроль качества до сварки показал отсутствие недопустимых дефектов. В соответствии с инструкцией заварка выборок производилась с предварительным и сопутствующим подогревом и после сварочным термоотдыхом.

Для повышения плотности горизонтальных фланцевых соединений цилиндров турбин, работающих на паре с температурой 560 °С, обычно увеличивают усилие затяжки в пределах допустимых напряжений в шпильке. Однако, температура шпилек этих турбин при эксплуатации достигает 510-520 °С и выше. При таких температурах материал шпилек имеет достаточно высокие деформации ползучести. Вследствие этого при усиленной затяжке со временем происходит релак-

сация напряжений в шпильке, и, соответственно, снижение плотности разъема.

Даже небольшое снижение температуры шпильки приводит к резкому снижению скорости ползучести и, соответственно, релаксации шпилек, обеспечивая длительную плотность разъема. Автором для повышения надежности работы было предложено внедрение данной системы в период ремонта турбины с целью обеспечения плотности разъема в течение всего межремонтного периода.

Созданная и внедренная в эксплуатацию система охлаждения шпилек турбины ст. №1 типа ПТ-60-130, установленной на Казанской ТЭЦ-3, позволила улучшить технико-экономические показатели работы турбоустановки. Прирост КПД турбины после ремонта ЦВД составил 5,38%, до ремонта КПД ЦВД турбины составлял 73%. Вследствие ремонта увеличение мощности турбины составило 2141,59 кВт. Экономия топлива за счет ремонта и сокращения утечек пара через разъем ЦВД составила 919,54 т.у.т.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

УДК 677.0:621.6

Е.Г. АВДЮНИН, д.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново**Энергосбережение при заключительной отделке
текстильных материалов**

Процессы пропитки и сушки относятся к сорбционным массообменным процессам. Их можно рассматривать, как прямой – сорбция (пропитка) и обратный - десорбция (сушка). Согласно теории расчет и определение методов интенсификации сорбционных процессов базируется на основном уравнении массопередачи (ОУМ) и анализе изотерм сорбции-десорбции, которые при совместном рассмотрении с уравнением Томпсона-Кельвина определяют основные показатели пористой структуры материала, ответственные за диффузионное сопротивление, а, следовательно, скорость процесса пропитки.

Комплексное исследование свойств тканей из натурального и синтетического волокна показало, что все они претерпевают резкие изменения при определенных значениях влажности, которая соответствует границе перехода между связанной и свободной влагой (критическая влажность). Зависимости $\alpha = f(U)$ и $\lambda = f(U)$ имеют вид S-образных кривых. Такой характер зависимости может быть объяснен наличием различных форм связи влаги с материалом. Анализ экспериментальных данных показал, что сингулярные точки на кривых теплофизических характеристик всегда соответствуют границам перехода от одной формы связи влаги с материалом к другой [1,2].

Анализ кривых сорбции позволил установить, что при критической влажности все структурные элементы волокна насыщены влагой и имеют максимальные размеры, при этом достигаются максимальные значения коэффициентов переноса. При увеличении влажности выше критической в тканях появляется свободная влага. Перемещение ее к поверхности волокон в процессе сушки вызывает миграцию водорастворимых реагентов, что снижает качество готовой продукции. Кроме того, снижение влажности материала перед сушкой приводит к сокращению энергетических затрат первичного теплоносителя и электроэнергии.

Автором был разработан и исследован новый метод регулирования остаточной влажности ткани при пропитке гладкими горизонтально расположенными валами. Метод заключается в снятии избытка раствора с дозирующего вала воздушным потоком. Он прост и надежен в конструктивном исполнении, позволяет регулировать в широких пределах количество передаваемого на текстильный материал раствора,

обеспечивает равномерное увлажнение как по ширине, так и по длине полотна [2,3].

На стадии пропитки материала, происходит принудительное перемещение раствора из ванны в материал, где лишь в незначительной степени начинается заторможенная адсорбцией диффузия аппарата в порах волокна, при этом перенос осуществляется путем фильтрации через волокнистую структуру текстильного материала.

Для обеспечения минимальной влажности текстильного материала при установленном напоре воздуха при прочих равных условиях, выбрано расстояние от среза сопла до поверхности наносящего вала - 5-10 мм. Рациональный угол установки сопла по отношению к поверхности вала составляет 10-30°.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, который представляет собой разомкнутый аэродинамический контур, состоящий из соплового аппарата и вентилятора. Он оборудован регулирующим шибром и измерительной аппаратурой (микроманометры и термоанемометр с постоянной температурой нити датчика фирмы TSI).

О структуре выходящего из сопла потока воздуха судили по величине и направлению векторов скорости, измеренных на срезе сопла и других сечениях струи через определенные промежутки по длине щели при фиксированном статическом напоре. Замеры проводились на коллекторах различной конструкции в широком диапазоне изменения статического напора от 0 до 2000 Па.

Анализ расчетных и экспериментальных данных позволил установить, что сопловой аппарат без выравнивающей насадки не обеспечивает равномерность истечения струи по длине. Испытания сопла с выравнивающей насадкой показали, что в этом случае начальный участок практически отсутствует.

Распределения векторов скорости вдоль щели сопла расположены практически перпендикулярно срезу сопла, при этом угол отклонения не превышает 5°. Величина вектора скорости постоянна как на срезе сопла, так и на расстоянии $h=10$ мм. На начальном участке наблюдается незначительное снижение скорости, которое не превышает 5%.

Проведенная оценка равномерности истечения теплоносителя из сопла при выбранных геометрических размерах коллектора [2] показала, что максимальное отклонение от равномерного распределения составляет: при $P=200$ Па - 2.8%; $P=400$ Па - 3.1%; $P=600$ Па - 3.4%.

Влияние стадии прожима в хлопчатобумажных и полиэфирных тканях исследовалось на растворе карбомола с концентрацией 120 г/л, в который добавлялся активный краситель 5СХ красный (1 г/л). Количество раствора определялось методом фотометрирования. Анализ результатов показал, что раствор равномерно распределяется по сечению волокнистого материала, разница коэффициентов отражения света от лицевой и изнаночной стороны не превышает 10-15%.

Для выбора рационального режима работы установки была проведена серия опытов для определения остаточной влажности образцов от линейной скорости валов. Исследования проводились на широком ассортименте тканей с линейными скоростями 20,30,40 и 50 м/мин. (Установлено, что предельное значение скорости валов соответствует 30 м/мин). В промышленных условиях при снижении остаточной влажности в 2-3 раза появляется возможность повысить производительность работы линий в 1.5-2 раза.

Одновременно с прожимом начинается процесс молекулярной диффузии молекул раствора, для описания которого использована методика обобщенного уравнения массопереноса (ОУМ). Кинетика пропитки интегрально учитывает все возможные этапы процессов переноса в материале [2].

На основе обобщения опытных данных по кинетики пропитки определены основные параметры уравнения: β , A и B [2]. Под начальной равновесной концентрацией раствора A подразумевается концентрация, в начальный момент времени. Под конечной равновесной концентрацией B - предельное значение средней по толщине ткани концентрации раствора. При этом принято допущение, что в начальный момент времени $\tau = 0$ концентрация раствора скачкообразно меняется от C_n до A , т.е. предполагается, что кинетика процесса полностью определяется диффузией сорбированного в начальный момент времени раствора вглубь материала.

Кинетика процесса изучалась на модельной системе, представляющей из себя многослойный пакет (мембрану), состоящий из исследуемых образцов. В качестве сорбируемой жидкости использовался раствор карбомола с концентрацией 120 г/л. Проведенные исследования позволили определить значения эффективных коэффициентов диффузии для хлопчатобумажных и полиэфирных волокон [2].

На основании выбранных конструктивных и технологических параметров были проведены технологические исследования по пропитке тканей растворами аппретов. Эффективность пропитки методом поверхностного нанесения оценивалась по качественным показателям отделки, которые определялись по стандартным методикам по ГОСТ 28253-89 и установленным отраслевым нормам.

Литература

1. **Сажин Б.С., Реутский В.А.** Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов, – М.: Легпромбытиздат, 1990, 234 с.
2. **Авдюнин Е.Г.** Разработка энергосберегающей технологии и оборудования для отделочных производств текстильной промышленности с применением АГР – М., 1996, 279 с. – (научн. конс. проф. Сажин Б.С.).
3. **Сажин Б.С., Авдюнин Е.Г., Кутумова Е.В.** Исследование и оптимизация аэродинамических характеристик сопловых аппаратов. Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности, 1995, №4.

Основные соображения по конструкции гидротурбины для малой ГЭС

Гидрологические параметры для характерного гидроузла Ивановской области (гидроузел на р. Шача) в летний период времени следующие: величина располагаемого напора H_p ограничивается 3...4 метрами, естественный расход (дебит) рек Q_e составляет в среднем 0,62...0,65 м³/с.

Эксплуатация ГЭС малой мощности в зимний период при неравномерном графике суточной нагрузки, практически, невозможна. Причина этого – намораживание толстого слоя льда в нижнем бьефе гидроузла при условии $Q_{\text{турб}} \neq Q_e$, где $Q_{\text{турб}}$ – расход воды на турбину, диктуемый графиком нагрузки.

Поэтому, необходимо рассматривать только летние расходы (дебиты) рек. При данном расходе и КПД установки $\eta_y = 0,7$, мощность на зажимах генератора, кВт, составляет

$$N_r = \frac{\rho \cdot g H_p \cdot Q_e \cdot \eta_y}{1000},$$

тогда
$$N_r = \frac{998 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 0,65 \cdot 0,7}{1000} = 13,364 \text{ кВт.}$$

При КПД генератора $\eta_r = 0,95$ мощность на валу турбины составит (без учета потерь в передаче)

$$N_t = \frac{N_r}{\eta_e},$$

$$N_t = \frac{13,364}{0,95} = 14,067 \text{ кВт.}$$

КПД турбины при номинальной мощности будет

$$\eta_t = \frac{\eta_y}{\eta_e},$$

$$\eta_t = \frac{0,7}{0,95} = 0,74.$$

Частоту вращения вала радиально-осевой турбины принимаем $n_t = 250$ об/мин, тогда коэффициент быстроходности определяется так

$$n = \frac{1,167 \cdot n_t \sqrt{N_t}}{H_p \sqrt[4]{H_p}},$$

$$n = \frac{1,167 \cdot 250 \sqrt{14,067}}{3 \sqrt[4]{3}} = 277.$$

Этой быстроходности соответствует турбина Френсиса нормальной быстроходности $n_s = 300$.

Необходимый наружный диаметр рабочего колеса определяется по формуле

$$D_1 = \sqrt{\frac{N_T}{g \cdot Q'_1 \cdot \eta_T \cdot H_p \sqrt{H_p}}},$$

где Q'_1 – приведенный расход воды через рабочее колесо, м³/с.

Принимаем $D_1 \approx 0,5$ м и при $H_p = 3$ м, $Q = 0,65$ м³/с

$$Q'_1 = \frac{Q_e}{D_1^2 \sqrt{H_p}},$$

$$Q'_1 = \frac{0,65}{0,5^2 \cdot \sqrt{3}} = 1,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Уточняем диаметр рабочего колеса

$$D_1 = \sqrt{\frac{14,067}{9,81 \cdot 1,5 \cdot 0,74 \cdot 3 \sqrt{3}}} = 0,5 \text{ м}.$$

Определяем высоту лопасти на входе в рабочее колесо в₁

$$v_1 = 0,4 \cdot D_1 = 0,4 \cdot 0,5 = 0,2 \text{ м (200 мм)}.$$

Радиально-осевые турбины на параметры $Q = 0,65$ м³/с и $H_p = 3$ м, необходимые для характерного гидроузла региона не выпускаются.

При единичном изготовлении применение литых деталей из чугуна и стали, оказывается чрезмерно дорогим, оправдываемым лишь при серийном производстве.

Поэтому, при проектировании подходящей для гидроузла турбины следует ориентироваться на создание простейшей конструкции, доступной для изготовления на местных заводах. Гидротурбина должна быть сварной конструкции, выполненная из обычного стального проката.

Опасность кавитационно-коррозионного разрушения для радиально-осевых турбин практически отсутствует и срок службы стальной конструкции безусловно превысит срок окупаемости и составит по опытным данным не менее 12 лет.

Наиболее кавитационно уязвимую часть конструкции представляют выходные кромки рабочих лопастей в зоне схода потока из колеса в отсасывающую трубу. Эти разрушения легко устраняются сваркой.

Упрощение проточной полости турбин, против серийно выпускаемых специализированными заводами, приводит к понижению КПД турбины при номинальном режиме до 0,72. Для экспериментальной энергетической установки это вполне приемливо.

Характеристика гидроузлов на малых реках Ивановской области

В плане перспективного энергетического использования гидроузлов на малых реках Ивановской области необходимо иметь четкое представление о их характеристиках.

По природоохранным и экономическим соображениям величина располагаемого напора на гидроузлах ограничена $H_p = 3..4$ м. Целесообразность такого ограничения подтверждается историческим опытом строительства водяных мельниц с верхненаливными колесами диаметром не более 3 м.

Достижение $H_p > 4$ м, в большинстве случаев, требует затопления естественных, ценных сельскохозяйственных угодий, что недопустимо с экономической и природоохранной сторон. Существенное подтопление обрабатываемых земель связано с изменением структуры и понижением плодородного почвенного слоя.

По этим соображениям, гидроузлы региона являются сооружениями руслового типа с напором до 4 метров без расхода воды на пойменные участки.

Типичной малой рекой Ивановской области является р. Шача, пересекающая территории Фурмановского и Приволжского районов, впадающая в р. Волгу близ с. Сидоровского Костромской области. В дореволюционное время на р. Шача действовали несколько гидроузлов сельскохозяйственного назначения, предназначенных для привода мельниц и маслобоек, которые позднее были разрушены.

В последние десятилетия XX века при выполнении плановых мелиоративных работ на р. Шача были сооружены два поливных низконапорных гидроузла, из которых характерным является водохранилище в с. Толпыгино Приволжского района, оборудованное бетонной монолитной плотиной.

Идея комплексного использования гидроузлов на малых реках: полив сельскохозяйственных культур, рыборазведение, разведение водоплавающей птицы, восстановление полноводности и чистоты рек, а также введение в комплекс гидроузлов энергетических установок, реализованы в ряде развитых стран. Актуальность такого подхода к водному хозяйству для региона да и в масштабах страны постоянно растет.

Естественный расход (дебит) р. Шача составляет в среднем $0,62..0,65$ м³/с, энергетический потенциал реки равняется 412957 кВт·ч

в год. В Ивановской области протекает порядка 130 малых рек, их энергетический потенциал составляет 28 млн. кВт·ч в год или 10 тыс. т. у. т.

Для напоров до 10 м, в зависимости от расхода и оборотности при проектировании энергетических установок, рекомендуется применение радиально-осевых и осевых турбин с вертикальным валом в открытой камере. На кафедре ПТЭ ИГЭУ проведена предпроектная разработка экспериментальной энергетической установки для гидроузла на р. Шача.

Существующая на реке плотина является плотиной водосливного типа с электрофицированным плоским двойным затвором, она выполнена из сборного железобетона. Энергетический блок состоит из двух массивных цельнолитых устоев, один из которых является левобережным. Свободный пролет между устоями шириной 2 м является подводным каналом турбинной камеры, расположенной над нижним бьефом гидроузла. Такое решение обусловлено необходимостью пропуска через плотину гидроузла автодорожного полотна.

Машинное отделение с верхней опорой, генератором, передаточным устройством и электротехническими устройствами должно располагаться над турбинной камерой на отметке 5 м от уровня нижнего бьефа.

На входном участке подводного канала турбинной камеры должна быть установлена наклонная сороудерживающая решетка с ручным обслуживанием и плоский вертикальный затвор с винтовым ручным подъемником.

В перекрытии турбинной камеры предусматривается круглый проём для прохода отсасывающей трубы при монтаже и установке корпуса турбины.

Предполагаемый вариант конструкции комплексного гидроузла прост при строительстве и будет удобен в процессе его эксплуатации.

Система индукционного подогрева задвижек для расплавления замерзшего конденсата

При транспортировке по трубопроводам вязких нефтепродуктов в зимнее время возникает опасность образования льда из конденсата воды. Образовавшийся слой льда в нижней части задвижки не дает возможности электроприводу справиться с возросшей нагрузкой. Для решения этой проблемы используются мобильные парогенераторы, разогревающие корпус задвижки и расплавляющие лед. Режим работы такой системы предполагает экстренный выезд бригады. Для ускорения процесса отпирания задвижек разрабатываются стационарные индукционные системы, позволяющие обеспечить разогрев по команде с пульта оператора. Определение оптимальной конструкции и режима работы индукционной системы достигается в ходе проектирования на базе численных моделей электромагнитных и тепловых процессов. В качестве инструмента используется программный комплекс ELCUT, построенный на базе метода конечных элементов. Решение электромагнитной задачи в квазистационарной постановке учитывает фактическое изменение магнитной проницаемости ферромагнитных сред

Тепловая модель системы состоит из ряда блоков с различными свойствами, между которыми осуществляется теплообмен. Кроме того предусмотрен теплообмен между внешней поверхностью задвижки и окружающей средой.

Для полной физической определенности вводятся эмпирические зависимости плотности, удельной теплоемкости нефти, коэффициентов теплопроводности, и других величин от температуры.

Моделирование тепловых процессов характеризуется наличием нелинейности, но изменение агрегатного состояния среды обычно учитывается с помощью специальных процедур, использующих не только температуру, но и энтальпию. Такой подход используется как при аналитическом решении [1], так и при численном [2]. В программе ELCUT на данный момент такой возможности нет, поэтому предлагается упрощенная процедура учета изменения теплосодержания среды и агрегатного состояния путем введения сложной зависимости коэффициента теплоемкости от температуры.

Выражение энергетического баланса при нагреве воды имеет вид:

$$mc(T_{\text{кон}} + T_{\text{нач}}) + mL = Pt. \quad (1)$$

Здесь L – удельная теплота плавления льда, m – масса льда, P – мощность нагрева, t – время нагрева.

Из выражения (1) с учетом экспериментальных кривых изменения температуры во времени можно получить эффективную функцию теплоемкости от температуры с учетом фазового перехода. Особенностью такой аппроксимации является возможность построения множества кривых, так как критериями выбора являются соблюдение баланса энергии (площадь, ограничиваемая участком), ограничение перепада температуры, соответствующего переходу, заданная погрешность расчета. Кроме того, форма аппроксимирующих кривых влияет на степень нелинейности и на устойчивость вычислительного процесса. Чем ближе рассматриваемый участок к прямоугольной форме, тем неустойчивее процесс, и требуется более мелкая сетка конечных элементов, что сопровождается возрастанием потребляемых вычислительных ресурсов.

Применение предлагаемого подхода к решению поставленной задачи моделирования тепловых процессов в многокомпонентной среде позволило существенно упростить процедуру решения связанной электротепловой задачи при обеспечении приемлемой погрешности расчетов.

Литература

1. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. Издательство "Высшая школа" Москва, 1967, 600 с.
2. **Решение** задач теплообмена. ANSYS 5.7 Thermal analysis guide. Перевод Югов В.П. Москва, 2001, CADFEM.

УДК 621.577

Ю.О. БАЙДАКОВА, науч. сотр. ЦЭО
(ОАО «ВТИ»), г. Москва

Сравнительный анализ термодинамической эффективности бестопливных установок генерации электроэнергии на базе детандер-генераторных агрегатов и теплонасосных установок

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам энергосбережения. Одной из технологий, позволяющей сократить потребление ТЭР при производстве электроэнергии, является детандер-генераторная технология. Детандер-генераторные агрегаты (ДГА) используются в системах газоснабжения промышленных предприятий и тепловых электрических станций, использующих в качестве топлива природный газ. ДГА можно использовать как альтернативу дросселированию на газораспределительных станциях (ГРС) и газорегуляторных пунктах (ГРП). Особенностью работы ДГА является существенное понижение температуры газа после расширения в нем. Поэтому существует необходимость подогрева газа перед или после детандера ДГА. В работах [1,2] было предложено использовать для подогрева газа теплона-

сосную установку (ТНУ) парокompрессионного (ПТНУ) или воздушного (ВТНУ) типов, подводя часть электроэнергии, вырабатываемой ДГА к электродвигателю компрессора ТНУ. Генерация электроэнергии с помощью таких установок является бестопливной. В рамках данной работы проведена сравнительная оценка термодинамической эффективности работы таких установок. Критерием термодинамической оценки эффективности была принята доля электроэнергии, выдаваемой во внешнюю электросеть, которая определяется из выражения:

$$\alpha = \frac{N_{\text{ДГА}} - N_{\text{комп}}}{N_{\text{ДГА}}} \quad (1)$$

В качестве хладагента в контуре парокompрессионной ТНУ рассматривался перспективный хладагент – диоксид углерода, который не оказывает негативного влияния на окружающую среду и является легко получаемым в промышленности. В контуре ВТНУ в качестве хладагента используется воздух. Расчет термодинамической эффективности работы установок проведен для следующих условий и исходных данных:

- энтальпия газа на выходе из детандера равна энтальпии на входе станции технологического понижения давления;
- температура газа на входе станции технологического понижения давления равна температуре окружающей среды;
- температура низкопотенциального источника теплоты равна температуре окружающей среды;
- давление газа на входе и выходе станции технологического понижения давления равны 0,8 и 0,2 МПа соответственно;
- температура окружающей среды изменяется в диапазоне от 0 до 20°С;
- теплота, которую необходимо передать газу с помощью воздушного или парокompрессионного теплового насоса, одна и та же.
- расход газа $G_g = 10,6$ кг/с;
- состав транспортируемого газа – чистый метан;
- внутренний относительный КПД компрессора и детандера – 0,85;
- электромеханический КПД детандера и двигателя компрессора – 0,95.

Для воздушной ТНУ:

- разность температур между газом на выходе и воздухом на входе теплообменника воздушной ТНУ $\delta_1 = 5$ °С;
- разность температур между газом на входе и воздухом на выходе из теплообменника воздушной ТНУ $\delta_2 = 10$ °С.

Для парокompрессионной ТНУ:

- температура хладагента на входе в конденсатор ТНУ выше температуры газа на выходе из него на $\delta_1 = 5$ °С;
- температура хладагента на выходе из конденсатора ТНУ выше температуры газа на входе в него на $\delta_2 = 10$ °С
- температура испарения ниже температуры теплоносителя, поступающего от НИТ, на $\delta_3 = 10$ °С.

Схемы установок приведены на рисунках 1 и 2.

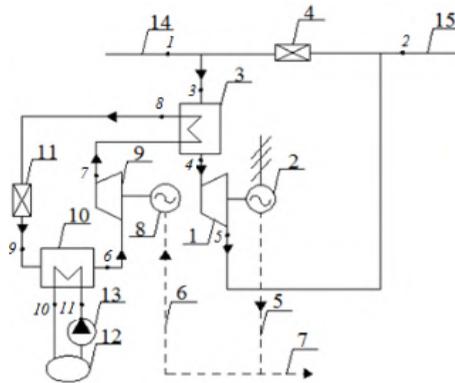


Рис. 1. Детандер-генераторная установка с ПТНУ в качестве преобразователя низкопотенциальной теплоты для подогрева газа:

- 1 – детандер; 2 – генератор; 3- теплообменник подогрева газа – конденсатор теплового насоса; 4 – дросселирующее устройство; 5 - линия электроэнергии от генератора ДГА;
- 6 – линия подачи электроэнергии к электродвигателю – приводу компрессора ТНУ;
- 7 – линия подачи электроэнергии во внешнюю электросеть; 8 - электродвигатель – привод компрессора ТНУ; 9 - компрессор ТНУ; 10 - испаритель ТНУ; 11 - дросселирующее устройство ТНУ; 12 – источник низкопотенциальной теплоты; 13 – насос подачи низкопотенциального теплоносителя в испаритель ТНУ; 14 - газопровод высокого давления; 15 – газопровод низкого давления.

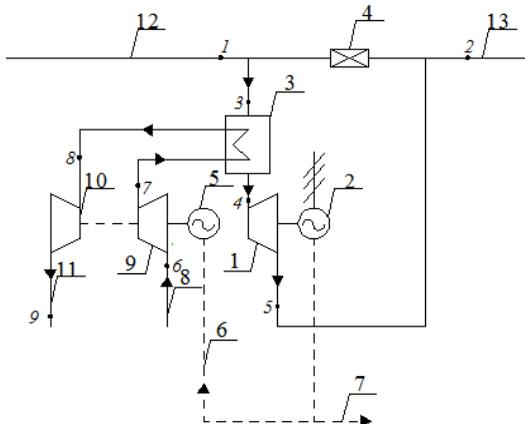


Рис. 2. Детандер-генераторная установка с ВТНУ в качестве преобразователя низкопотенциальной теплоты для подогрева газа.

- 1 - детандер; 2 - генератор; 3 – теплообменник подогрева газа; 4 – дроссель; 5 – электродвигатель компрессора воздушной ТНУ; 6 – линия подачи электроэнергии к электродвигателю компрессора воздушной ТНУ; 7 – линия подачи электроэнергии во внешнюю сеть; 8 – вход воздуха в компрессор воздушной ТНУ; 9 – компрессор воздушной ТНУ; 10 – турбина воздушной ТНУ; 11 – линия отвода воздуха от воздушной ТНУ; 12 - газопровод высокого давления; 13 – газопровод низкого давления.

Результаты расчета термодинамической эффективности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета термодинамической эффективности

Наименование	Тип ТНУ	Температура окружающей среды, $t_{oc}, ^\circ\text{C}$		
		0	10	20
Температура газа на входе в ДГА, $^\circ\text{C}$		79,46	92,62	105,78
Мощность, вырабатываемая ДГА, $N_{дГА}$ кВт		1845,51	1916,50	1987,32
Теплота, необходимая для подогрева газа, Q_1 кВт		1944,15	2044,85	2150,21
Мощность, потребляемая компрессором ТНУ, N_k кВт	ПТНУСО ₂	479,59	544,39	636,29
Полезная мощность установки $N_{пол}$, кВт		1365,92	1372,12	1351,04
Доля электроэнергии, выдаваемой в сеть, α		0,74	0,72	0,68
Мощность, потребляемая компрессором ТНУ, N_k кВт	ВТНУ	1138,30	1194,02	1252,93
Полезная мощность установки $N_{пол}$, кВт		707,21	722,49	734,39
Доля электроэнергии, выдаваемой в сеть, α		0,38	0,38	0,37

По результатам расчета, представленным в табл. 1, можно, сделать следующие выводы:

1. Доля электроэнергии, выдаваемой в сеть, снижается с повышением температуры газа на входе станции технологического понижения давления.
2. Полезная мощность установки с парокompрессионной ТНУ максимальна при температуре окружающей среды, равной 10 $^\circ\text{C}$.
3. С повышением температуры окружающей среды при заданных условиях расчета возрастают: температура подогрева газа перед ДГА; мощность, вырабатываемая ДГА; теплота, необходимая для подогрева газа перед ДГА; полезная мощность установки с ВТНУ.

Литература

1. **Способ** работы детандерной установки и устройство для его осуществления: пат. 2150641 Рос. Федерация: МПК 7 F25 В11/02, F 01 К 27/00 / Агабабов В.С.; заявитель и патентообладатель МЭИ (ТУ). - № 99113159/06 ; заявл.15.06.1999; опубл.10.06.2000, Бюл. №16. – 3 с.
2. **Детандер-генераторная** установка: пат. 39937 Рос. Федерация: МПК 7 F 25В 11/02, F 01 К 27/00 / Агабабов В.С, Корягин А.В., Архаров Ю.М., Архарова А.Ю.; заявитель и патентообладатель МЭИ (ТУ). - № 2004110563/22; заявл. 08.04.2004, опубл. 20.08.2004 Бюл. № 23. – 3 с.

Тепловое аккумулирование и утилизация тепловых потерь в канале теплотрассы

Основной задачей при эксплуатации устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы [1] является отбор тепловой энергии от сети теплоснабжения в количестве, не превышающем допустимые значения [2].

Одним из вариантов решения этой задачи может быть включение аккумулятора тепловой энергии в контур «коллектор-испаритель теплового насоса» с целью преодоления расхождений в нагрузках на тепловую сеть и трансформатор теплоты, а при необходимости и возврата тепловой энергии в канал теплотрассы. Особенностью теплового аккумулирования в данном случае является условия переноса и сохранения тепловой энергии низкого потенциала с температурами теплоносителя в контуре коллектора порядка 20 °С.

На сегодняшний день наиболее распространены виды теплового аккумулирования, связанные с аккумулированием энергии в насыщенных жидкостях, с использованием недогретых жидкостей под давлением, с аккумулированием энергии твердыми телами и посредством использования теплоты фазового перехода [3].

Анализ вышеприведенных способов аккумулирования теплоты показал, что оптимальными видами аккумулирования при утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы являются аккумулирование с использованием недогретых жидкостей под давлением в системе со скользящей температурой и аккумулирование твердыми телами, когда в качестве аккумулирующей среды возможно использование окружающего канал грунта [4].

Первый вариант подразумевает, что температура жидкости во время зарядки постепенно повышается, а во время разрядки понижается за счет встроенного в аккумулирующий сосуд теплообменника. Кроме этого, такой вариант делает возможным подключение коллектора к испарителю теплонасосной установки посредством термогидравлического распределителя, выполняющего функцию аккумулятора.

Предпочтение тому или иному варианту следует отдавать исходя из конкретных конструктивных характеристик коллектора и условий эксплуатации сетей теплоснабжения промышленного предприятия.

Литература

1. **Захаров В.М.**, Банникова С.А., Банников А.В. Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель №116607, 2012.

2. **СНИП 41-03-2003.** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России. – М.:ГУП ЦПП, 2003. – 22 с.
3. **Бекман Г.,** Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 272 с., ил.
4. **Банников А.В.,** Банникова С.А. Устройство для утилизации тепловых потерь теплотрасс. Патент на полезную модель №88361, 2009.

УДК 621.547

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
Г.А. РОДИОНОВ, аспирант
(ИГЭУ), г. Иваново

Сравнительный анализ систем пневмотранспорта

В настоящее время на предприятиях применяют различные типы систем пневмотранспорта, отличающиеся по капитальным затратам, производительности, дальности и высоте подачи, удельным затратам воздуха и т.д. Чаще всего выбор оборудования делают по производительности и капитальным затратам, и редко рассматривают энергетическую эффективность работы оборудования.

Для сравнения различных систем пневмотранспорта необходимо разбить их на группы по типам пневмонасосов как основного элемента пневмосистем:

1. пневмовинтовые насосы;
2. пневмокамерные насосы;
3. пневмопушки;
4. эрлифты и пневмоподъемники;
5. струйные насосы;
6. аэрожелоба.

Приведем основные положительные и отрицательные характеристики указанных пневмонасосов.

Пневмовинтовые насосы (ПВН). Производительность таких систем может достигать 400 т/ч, а дальность подачи материала до 1,5 км.

Достоинства:

1. работа на низком и среднем давлении, а как следствие возможность частичной загрузки;
2. отсутствует необходимость установки ресиверов;
3. непрерывная транспортировка материала.

Недостатки:

1. высокий абразивный износ элементов насоса и материалопроводов;
2. высокие удельные затраты сжатого воздуха

Пневмокамерные насосы. Несмотря на общий принцип работы существуют насосы типа НКЦ, НПА и др. (ПКН), и монжусы – ТА, НО и

др. Различаются ПКН от монжусов меньшими размерами и производительностью. Производительность таких систем достигает 150 т/ч (по некоторым данным до 800 т/ч [1]), дальность и высота подачи соответственно до 3,5 км и 50 м.

Достоинства:

1. надежность,
2. возможность частичной загрузки,
3. низкий абразивный износ элементов оборудования,
4. возможность полной автоматизации.

Недостатки:

1. работа под высоким давлением, необходимо регистрировать в Ростехнадзоре,
2. необходимость столба материала для загрузки камеры,
3. необходимость установки ресиверов для поддержания постоянного давления,
4. импульсный режим работы.

Пневмопушки. Дальность подачи материала до 800 м (на практике не более 150 м), высота подачи до 50 м. Производительность установки до 80 т/ч.

Достоинства:

1. малые размеры,
2. низкие капитальные затраты,
3. низкий уровень абразивного износа оборудования,
4. низкие удельные затраты сжатого воздуха.

Недостатки:

1. сложность проектирования,
2. низкая надежность работы,
3. сильные удары в конце материалопровода.

Эрлифты и пневмоподъемники. Транспортировка материала происходит со сверхвысокими концентрациями на вертикальных участках. Производительность достигает 900 т/ч, а высота подачи до 120 м.

Достоинства:

1. высокая надежность,
2. возможность работы на низком давлении,
3. непрерывный режим работы,
4. низкие удельные затраты воздуха,
5. низкий уровень износа материалопроводов.

Недостатки:

1. транспортировка материала только по вертикали,
2. затраты электроэнергии на привод шнека,
3. абразивный износ элементов насоса,
4. большие потери на поворотах материалопровода.

Струйные насосы (ПСН). Представляют собой эжектор со смешивающей камерой. Производительность не более 10 т/ч, дальность транспортировки 100 м, высота подачи 15 м.

Достоинства:

1. малые размеры,
2. надежность,
3. непрерывный режим работы.

Недостатки:

1. высокие удельные затраты сжатого воздуха,
2. невозможность полной разгрузки приемной камеры из-за поступления в нее воздуха,
3. низкая производительность.

Для сравнения различных систем пневмотранспорта выделим четыре основных параметра: производительность, дальность и высота подачи, удельное потребление сжатого воздуха.

По производительности пневмонасосы располагаются (в порядке возрастания): ПСН (до 10 т/ч), пневмопушка (до 80 т/ч), ПКН (до 150 т/ч), ПВН (до 400 т/ч), монжус (до 800 т/ч), эрлифт (до 900 т/ч).

По дальности транспортировки (в порядке возрастания): эрлифт (только по вертикали), ПСН (до 100 м), пневмопушка (150-200 м), ПВН (до 1500 м), ПКН (до 2000 м), монжус (до 3500 м).

По высоте транспортировки располагаются (в порядке возрастания): ПСН (до 15 м), ПВН (до 20 м), пневмопушка (до 50 м), ПКН и монжус (до 50 м), эрлифт (до 120 м).

По удельному потреблению сжатого воздуха (в порядке возрастания): эрлифт (2-10 м³/т), пневмопушка (5-15 м³/т), ПКН и монжус (80-120 м³/т), ПСН (40-140 м³/т), ПВН (60-200 м³/т)[2].

Для удобства сравнения систем пневмотранспорта по всем параметрам составим таблицу, в которой цифре 1 соответствует наименьшее значение параметра, а 6 – наибольшее.

Таблица 1. Сравнительная характеристика пневмонасосов

	Типы пневмотранспорта	ПВН	Эрлифт	Монжус	ПКН	ПСН	Пневмопушка
1	Производительность	4	6	5	3	1	2
2	Дальность транспортировки	4	-	6	5	2	3
3	Высота транспортировки	2	6	5	4	1	3
4	Удельное потребление сжатого воздуха	6	1	4	3	5	2

Вывод

Выполнен сравнительный анализ различных конструкций пневмонасосов по четырем параметрам, на основании которого можно подобрать систему пневмотранспорта под конкретные задачи.

Литература

1. ЗАО «ИК СПТ» [Электронный ресурс]. Сайт производителя. <http://www.ec-spt.ru>.
2. **Евтюков С.А.** Пневмотранспортное оборудование в строительной индустрии и строительстве / С.А. Евтюков, М.М. Шапунов С—Пб.: ДНК, 2005. 360 с.

УДК 620

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор,
Т.Е. СОЗИНОВА, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Тепловизионное обследование зданий и сооружений ИГЭУ

Тепловизионное обследование зданий и сооружений – это современная диагностика в инфракрасном диапазоне спектра электромагнитного излучения для обнаружения дефектов и их анализа.

Как известно [1], наибольшие потери тепловой энергии приходится на наружные стены зданий и окна. В соответствии с ГОСТ Р 54852-2011 [2] тепловизионную съемку зданий рекомендуется проводить в отопительный сезон, когда перепад температур между наружным и внутренним воздухом составляет не менее 10-15 °С. «Обследуемые поверхности не должны находиться в зоне прямого и отраженного солнечного облучения в течение 12 часов до проведения измерений» [2]. Таким образом, тепловизионное обследование необходимо проводить в предрассветные часы и для проведения съемки следует выбирать безветренные дни без осадков.

Тела с температурой поверхности 800 К имеют максимум спектрального излучения в диапазоне длин волн 3-5 мкм; максимум спектральной интенсивности излучения тел с температурой около 300 К приходится на диапазон длин волн 7-15 мкм [3]. Для термографического обследования используется, как правило, длинноволновый диапазон (8-14 мкм) инфракрасной области спектра. Тепловизионное обследование ограждающих конструкций зданий ИГЭУ выполнено современными тепловизорами testo 882 и NEC 7700, которые работают в указанном диапазоне длин волн.

Тепловизор testo 882, при помощи которого проведена большая часть тепловизионной съемки зданий ИГЭУ, имеет высокое разрешение 320x240 пикселей (76 800 температурных точек), что позволяет получать четкие и детальные снимки. Таким образом, задача по выявлению дефектов и потенциально проблемных участков даже на больших расстояниях реально выполнима [4].

В рамках энергоаудита тепловизионное обследование корпуса «В» было выполнено 19 марта 2009 году [5], остальных корпусов и зданий ИГЭУ: корпусов «А», «Б», «Г», «Д» и «Е», а также спортивного корпуса, спортивного модуля, склада, гаража, столярной мастерской, экспериментально-опытного производства – 5 и 6 марта 2012 года. Было сделано более 850 термограмм наружной съемки.

Тепловизор поставляется с программным обеспечением, необходимым для хранения и анализа инфракрасных изображений (определения тепловых аномалий, построения термофилограмм и т.д.). По завершении тепловизионной съемки была проведена детальная обработка всех термограмм.

Анализ термограмм позволяет сделать следующие выводы:

1. Состояние стен зданий:

– Состояние наружных стен здания корпуса «А», корпуса «Б», корпуса «Г», корпуса «Е», общежития № 1, общежития № 2, общежитий № 3, 3а и 4, склада, спортивного модуля, столярной мастерской, экспериментально-опытного производства в целом удовлетворительное, т.к. температурное поле на глади всех наружных ограждений здания достаточно однородно;

– Температурное поле на глади наружных ограждений корпуса «Д» и гаража неоднородное;

– Наблюдается повышенный температурный фон в левой и правой частях дворового фасада корпуса «Г», что показывает на некачественно выполненную изоляцию фасада;

– Наблюдается нарушение кладки и более высокая температура цокольного этажа общежития № 2, что указывает на повышенные тепловые потери;

– Температурный фон вновь заложённых проёмов корпуса «В» и перехода из корпуса в столовую, корпуса «Д», общежитий № 3, 3а и 4, столярной мастерской, не отличается от основного температурного фона стен, что говорит о качественной кладке проёмов;

– Температурное поле заложённых оконных проёмов экспериментально-опытного производства и гаража имеет повышенный температурный фон;

– Наблюдается незначительное повышение температуры в местах установки отопительных приборов в корпусе «А», спортивном корпусе и переходе в корпус «В», в корпусе «Б» с дворовой стороны, не имеющем дополнительную изоляцию, в корпусе «Д», в корпусе «Е», в общежитиях № 3, 3а и 4, в гараже, в складе, в спортивном модуле, в здании экспериментально-опытного производства;

– Тамбур запасного выхода общежития № 3 имеет повышенные тепловые потери.

2. Состояние окон:

– Большое количество окон корпуса «А», корпуса «Б», корпуса «В», корпуса «Д», общежития № 2, общежитий № 3, 3а и 4, гаража, спортив-

ного модуля, экспериментально-опытного производства имеют повышенные потери;

– Состояние окон корпуса «Г», корпуса «Е», общежития № 1, склада, столярной мастерской удовлетворительное, т.к. температурное поле на глади окон однородно;

– У ряда окон общежития № 2 нарушено остекление.

3. Состояние дверей:

– Состояние большинства дверей корпуса «А», корпуса «Б», корпуса «Г», запасных дверей корпуса «Д», общежития № 1, общежития № 2, общежития № 3, 3а и 4, склада, гаража, столярной мастерской, экспериментально-опытного производства удовлетворительное;

– Поверхность входной двери и одной запасной двери корпуса «Д», входные двери корпуса «Е» имеют повышенные температуры по периметру, что указывает на плохую изоляцию дверных проёмов.

4. Состояние ворот гаража:

– Термограммы поверхностей ряда ворот однородны, что указывает на одинаковые тепловые потери через ворота;

– Ряд ворот имеет повышенные тепловые потери в верхней части проёма.

На основании проведенного анализа предложены рекомендации по улучшению качества изоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений ИГЭУ:

1. Для уменьшения тепловых потерь ограждениями здания корпуса «А» необходимо выполнить ревизию окон корпусов «А», «Б», «В», «Д», общежития № 2.

2. Выполнить тепловую изоляцию по периметру вновь установленных окон с наружной стороны зданий корпусов «А» и «В», общежитий № 3, 3а и 4.

3. Провести остекление окон экспериментально-опытного производства, проходной гаража и общежития № 2.

4. Восстановить кирпичную кладку цокольного этажа общежития № 2.

5. Выполнить утепление стен тамбура запасного выхода общежития № 3.

6. Выполнить тепловую изоляцию проёмов дверей или утеплить входные двери в корпусе «Е», общежитиях № 3, 3а и 4, спортивного модуля.

7. Выполнить тепловую изоляцию ворот гаража по периметру.

8. Установить теплоотражающие экраны за отопительными приборами в корпусах «Д» и «Е», в здании экспериментально-опытного производства.

Все тепловые потери через ограждающие конструкции стен, окон, дверей в корпусе «Г», общежитии № 1, складе, столярной мастерской носят незначительный характер.

Литература

1. http://www.esco-ecosys.narod.ru/2009_5/art150.htm
2. ГОСТ Р 54852-2011. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.
 3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир. 1988 – 416 с.
 4. http://www.testosites.de/cms/thermalimaging/ru_RU/
 5. Бухмиров В.В., Пуганова К.П., Солнышкова Ю.С., Родионов Г.А., Созинова Т.Е. Энергоаудит корпуса «В» ИГЭУ.// Состояние и перспективы развития электротехнологии: Междунар. науч.-техн. конф. (XV Бенардосовские чтения): Тез. докл. в 2-х т. Т.2. – И.: ГОУ ВПО ИГЭУ. – 2009 г. – с. 33.

УДК 621.039.523

А.М. ГАПОНЕНКО д.т.н., профессор кафедры ПТЭ и ТЭС,
Н.Н. АВАКИМЯН к. ф-м.н., доцент кафедры ОМ,
Е.Н. ДАЦЕНКО к.т.н., доцент кафедры НГП,
А.Ю. ДУБОНОСОВ аспирант кафедры ПТЭ и ТЭС
(КубГТУ), г. Краснодар

Моделирование поля скоростей на выходе из цилиндрического коллектора

При проектировании круговых раздаточных коллекторов парогенераторов решается, в частности, задача достижения устойчивости поля скоростей на выходе коллектора при известных ограничениях на гидравлическое сопротивление направляющей решетки [1, 2, 3]. В связи с этим, представляют интерес аналитические зависимости для определения поля скоростей теплоносителя на выходе из решётки раздаточного коллектора, учитывающей геометрические параметры коллектора. Целью работы является разработка методики перехода от дискретного оттока из решётки коллектора к непрерывному и построение математической модели, описывающей распределение расхода на выходе из коллектора.

Уравнение регрессии определялось на основе большого массива экспериментальных данных о полях скоростей на выходе из модели кругового раздаточного коллектора теплообменника, с различными соотношениями высоты входной камеры к диаметру и различными гидравлическими сопротивлениями решетки на выходе из камеры.

Зависимость средней по азимуту скорости теплоносителя от относительного радиуса на выходе из коллектора представлялась в виде:

$$V(r) = \sum_{j=0}^l \alpha_j \cdot r^j, \quad (1)$$

где l, α_j – максимальная степень полинома аппроксимации и коэффициенты, которые определялись методом наименьших квадратов (МНК)

по всему массиву экспериментальных данных с помощью алгоритма пошаговой регрессии Эфроимсона [4], соответственно; r – относительный текущий радиус, равный отношению действительного расстояния, на котором находятся отверстия решетки к радиусу коллектора: $0 \leq r \leq 1$.

Нормировка:

$$2 \int_0^1 \frac{V(r)}{\bar{V}} r dr = 1, \quad (2)$$

где \bar{V} – среднерасходная скорость через решетку коллектора.

Из (1) и (2) относительная скорость теплоносителя на выходе из решетки коллектора:

$$\eta_i = \frac{V_i}{\bar{V}} = \frac{S}{S_i} \cdot \frac{\sum_{j=0}^i \frac{\alpha_j}{j+2} (r_i^{j+2} - r_{i-1}^{j+2})}{\sum_{j=0}^i \frac{\alpha_j}{j+2}}, \quad (3)$$

где V_i – средняя скорость теплоносителя между радиусами r_i и r_{i-1} ; S – площадь коллектора; S_i – площадь кольца между r_i и r_{i-1} .

Как показывают экспериментальные данные, на выходную гидравлическую неравномерность оказывают влияние следующие факторы: геометрические размеры камеры (высота H и диаметр D), коэффициент гидравлического сопротивления $\xi_{p\partial\partial}$, неравномерность входного профиля скоростей, наличие вихреобразования и др.

Эксперименты проводились на модели кругового раздаточного коллектора, позволяющей изменять эти параметры. Относительная погрешность измерений полей скоростей потока составляет в среднем $\bar{\sigma}(V) = 2,25\%$ при максимальной погрешности $\sigma_{\max}(V) = 3,3\%$.

Поскольку во все расчётные формулы оценки гидравлической неравномерности скорости η_i входит относительная высота коллектора

$h = \frac{H}{D}$ и коэффициент гидравлического сопротивления решетки $\xi_{p\partial\partial}$,

то необходимо учесть эти факторы.

Поэтому поле скоростей ищется в виде:

$$\eta_r(h, \xi_p, r) = 1 + \sum_{\mu=0}^1 \sum_{S=0}^2 \sum_{p=0}^p \frac{r^p}{h^{\xi_{p,S,\mu}}} \alpha_{p,S,\mu}, \quad (4)$$

где $\mu = 0; 1$; $S = 0; 1; 2$; $p = 0; 1; \infty$.

При равномерном подводе теплоносителя в коллектор модель удовлетворяет следующим физическим условиям:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \eta_r(h, \xi_{resh}, r) = 1 \text{ для любых } \xi_{resh}, r;$$

$$\lim_{\xi_{\text{реш}} \rightarrow \infty} \eta_r(h, \xi_{\text{реш}}, r) = 1 \text{ для любых } h, r.$$

Коэффициенты уравнения и степень полинома (4) определялись методом пошаговой регрессии с помощью алгоритма Эфроимсона и МНК. В результате расчетов на ЭВМ были получены следующие аналитические зависимости. Для коллектора, в котором выходной поток, после прохождения решетки свободно проходил в окружающий воздух и у которого $V|_{r=1} \neq 0$, на расстоянии 0,15 м от решетки:

$$\eta_r = \frac{V}{V} \approx 1 + \frac{1}{h^2 \xi_{\text{реш}}} (0,566 + 1,203r - 2,198r^2 - 3,691r^5 + 4,996r^{10}) \quad (5)$$

Для коллектора, в котором выходной поток, после прохождения решетки, ограничивается цилиндрической стенкой диаметром, равным диаметру потока перед решеткой (0,2 м) и длиной 0,15 м, у которого $V|_{r=1} = 0$, на расстоянии 0,15 м от решетки:

$$\eta_r = \frac{V}{V} \approx 1 + \frac{1}{h^2 \xi_{\text{реш}}} (0,248 + 1,757r - 4,007r^2 + 6,585r^5 - 5,307r^6) \quad (6)$$

Коэффициент детерминации модели более 0,95.

Используя (5), (6) и (3) можно также определить скорости V_i непосредственно сразу после решетки коллектора. По приведенной методике были выполнены расчеты для коллектора, гидродинамика которого также исследовалась экспериментально [5]. Сопоставление показало, что максимальное расхождение расчетных и экспериментальных результатов составляет около 6%. Приведённая в работе математическая модель позволяет рассчитать распределения относительных скоростей на выходе из цилиндрического раздаточного коллектора только от его геометрических параметров H , D и гидравлического сопротивления $\xi_{\text{реш}}$ с точностью до 6 %.

Литература

1. Олейник В.Н. К вопросу о гидравлическом расчете осесимметричного раздаточного коллектора. Теплоэнергетика 1980, №12. – с. 30 – 32.
2. Решетов В.А., Смирнов В.П., Пикулева Т.А. –Гидравлика кругового раздаточного коллектора. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Реакторостроение. 1976, Вып. 2 (13). – с. 65 – 74.
3. Кузнецов М.М., Наседкин С.П., Демура В.Т. К вопросу о расчете кругового раздаточного коллектора. Теплообмен в энергооборудовании АЭС. 1986, №5. – с. 137 – 143.
4. Стрижов В.В. Методы выбора регрессионных моделей. – М.: Вычислительный центр РАН. 2010. – 60 с.
5. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов. – М.: Энергия, 1964. – 352 с.

Индукционная система для нагрева жидких сред

Рассматриваются вопросы создания системы управления индукционной установкой для нагрева потока вязкой жидкости. Нагреватель представляет собой систему труб, расположенную во внутренней полости цилиндрического индуктора. В связи с тем, что на процесс технологического нагрева вязких жидкостей накладываются ограничения в виде предельно допустимой температуры трубы, высокопроизводительные индукционные нагреватели состоят из нескольких секций, каждая из которых имеет автономный регулируемый источник питания. Одной из основных задач системы автоматического регулирования температуры жидкости в проточном многосекционном индукционном нагревателе с автономными источниками питания для каждой секции является поддержание с заданной точностью требуемого температурного распределения по длине, которая реализуется с помощью системы автоматической стабилизации температуры. Для синтеза системы автоматического регулирования в работе получена передаточная функция индукционного нагревателя по каналу «напряжение на индукторе– температура жидкости на выходе из нагревателя». В качестве базовой модели рассматривается математическая модель процесса теплопроводности в цилиндрической системе, состоящей из двух разнородных по физическим свойствам сопряженных тел – стенки трубы и потока жидкости. Разработан алгоритм расчета, состоящий из двух блоков – электрического и теплового. Расчет производится с помощью программного комплекса ELCUT 5.7 Professional. На основе проведенных исследований определены параметры индукционной системы. По результатам численных экспериментов построена переходная функция индукционного нагревателя как объекта управления. Ввиду сложности и громоздкости получаемых решений для синтеза замкнутой САУ используется обобщенная аппроксимация точной математической модели. Передаточная функция аппроксимированной модели объекта представляется в виде последовательного соединения двух динамических звеньев, одно из которых устанавливает связь между напряжением на индукторе и мощностью внутреннего тепловыделения в нагреваемой трубе, а второе звено отражает процесс преобразования электрической энергии вихревых токов, наведенных в трубе, в тепло и нагрев потока жидкости. Так как постоянная времени электромагнитных процессов существенно (на два порядка) меньше, чем постоянная времени тепловых процессов, в работе при синтезе регулятора учитывается только постоянная

времени тепловых процессов. Таким образом, приближенная передаточная функция объекта в результате обоснованных допущений представляется в виде аperiodического звена с запаздыванием. Высокопроизводительные технологические линии с многосекционными нагревателями имеют технологические промежутки между секциями нагревателя. В этом случае каждую секцию можно рассматривать отдельно, как односекционный автономный нагреватель, отличающийся от предыдущего нагревателя лишь средней температурой на входе, а длина каждой секции определяется исходя из условия достижения предельной температуры пограничного слоя жидкости. Учитывая небольшой диапазон температур при нагреве жидкости, тепло- и электрофизические характеристики материала можно считать постоянными. Для такого процесса требуется синтезировать регулятор, который по измерениям температуры на выходе каждой зоны обеспечивал бы поддержание выходной температуры жидкости на заданном уровне, воздействуя на мощность внутреннего тепловыделения каждой зоны. Так как поток вязкой жидкости имеет ламинарный характер, температурное поле по сечению потока жидкости оказывается существенно неравномерным. Этот факт не позволяет оценивать среднюю температуру жидкости на выходе из секции нагревателя по контролю температуры в одной точке. В предлагаемой системе сигнал, пропорциональный средней по сечению потока жидкости температуре на выходе из нагревателя, формируется с помощью термопар, установленных на выходе из нагревателя в различных точках по сечению потока. Как показывают эксперименты, для оценки средней температуры достаточно иметь три установленных на определенном расстоянии датчика температуры жидкости. Четвертой точкой, характеризующей температурное распределение, может служить температура стенки трубы. Исследуемая система управления имеет три независимых канала регулирования по числу индукционных нагревателей в линии. Каждый канал регулирования имеет ПИ – регулятор, который обрабатывает постоянное задающее воздействие и возмущения, обусловленные изменением скорости потока жидкости, начальной температуры на входе в нагреватель, изменением физических характеристик жидкости (удельной теплоемкости, теплопроводности, плотности, и др.). Для моделирования системы управления использовались возможности среды технологических расчётов – MATLAB®, а также сопутствующей системы для моделирования динамических нелинейных систем – Simulink®. Распределение температурного поля в течение времени в зависимости от распределения внутренних теплоисточников рассчитывается с помощью инструментария MATLAB для решения дифференциальных уравнений в частных производных – PDE Toolbox (Partial Differential Equation Toolbox).

Р.А. КИСЕЛЁВ, студент
А.Б. ТРОЯНОВСКИЙ, соискатель;
Е.Г. АВДЮНИН, д.т.н., профессор
(ИГЭУ), г. Иваново

Энергосбережение при использовании возобновляемых источников энергии

Потребление электрической и тепловой энергии. В мировом энергетическом балансе доля древесных ресурсов не превышает 3,5 %, а в России - 1 %. В 1950 году эта доля составляла в России 9 %, а в 1913 г. – 21 %. Есть, впрочем, и теперь страны, в которых дрова и поныне – основной вид топлива. В странах Африки, например, на дрова идет 88% всей заготовленной древесины, в Южной Америке – 68%. Вместе с тем, следует что древесные и растительные ресурсы единственный на Земле возобновляемый органический источник энергии, тогда как, ресурсы традиционных видов топлива – нефти, газа, каменного угля – постоянно неизбежно сокращаются. Разведанные запасы нефти, например, по оценкам экспертов, могут быть израсходованы еще до конца нашего столетия, природный газ – в течение 150 лет. И хотя в будущем могут быть открыты другие месторождения, но рано или поздно будут исчерпаны и они. Тем более что нефть широко используется не только как топливо, но и как технологическое сырье для получения многих ценных продуктов.

Крупнейшие компании мира выделяют значительные средства для работ в области альтернативных энергоносителей, – прежде всего, солнечной энергии, а также древесной и растительной биомассы. Эксперты Мирового энергетического союза не предвидят технологического прорыва в этой области, по крайней мере, в ближайшее 10-15 лет, но по мере сокращения запасов нефти ситуация, безусловно, будет меняться. Количество древесины на Земле растет: общий годовой прирост в лесах планеты составляет в среднем 5,5 млрд. м³, т.е. примерно в 1,5 раза больше годового объема лесозаготовок. Это, однако, вовсе не означает безграничных возможностей при использовании древесины как топлива, поскольку спрос на пиломатериалы, древесные плиты, фанеру, целлюлозу и бумагу тоже увеличивается. И в перспективе, видимо, источником тепловой энергии станут не дрова, а разного вида древесные отходы (ДО) образующиеся при заготовке и переработке древесины: сучья, ветки, верхушки деревьев, кора, опилки куски дерева, горбыль и т.д. Основные перспективы применения древесины в качестве топлива связаны не с брикетами и не с дровами, а с переработкой древесной биомассы в жидкое или газообразное топливо, которое обладает лучшими потребительскими и экологическими свойствами.

Газогенераторная установка для переработки вторичных древесных ресурсов. Целью работы является создание энергетической газотурбинной установки мощностью 100-120кВт, работающей на генераторном газе с тепловой мощностью $Q_{гр}=500кВт$.

Схема ГГУ приведена на рис. 1, будет являться экологически чистой, безопасной в эксплуатации, несложной в изготовлении. Принцип работы установки изложен в ряде работ.

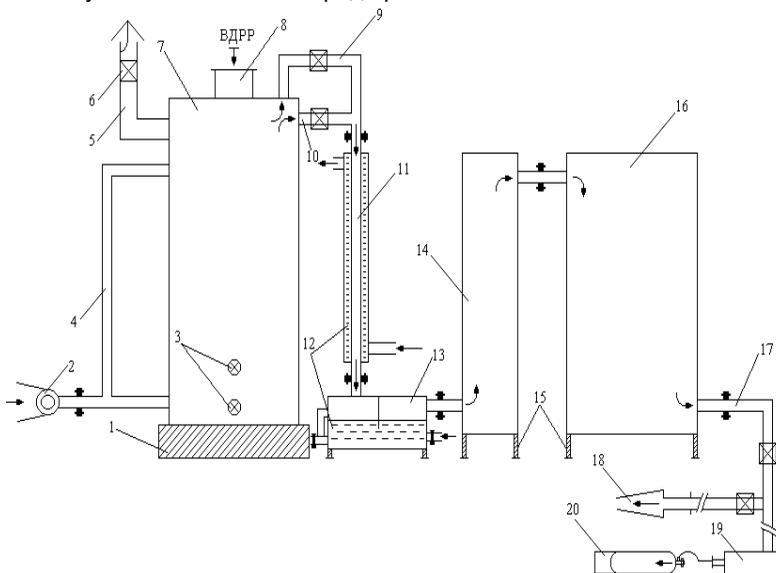


Рис. 1. ГГУ на древесных отходах

Газогенератор 7 предварительно разогревают до необходимой температуры начала газификации. Для этого в бункер газогенератора 7 загружают требуемое количество ДО (примерно 15% объема бункера). Производят розжиг ДО через нижний люк 3. После достижения необходимого температурного режима газогенератора 7 в бункер на весь объем повторно загружают ДО. В камеру газификации при помощи центробежного вентилятора 2 (или компрессора 19) подают атмосферный воздух для окислительно-восстановительного процесса. На этом главном этапе, происходит процесс газификации ДО с получением горючего газа. Выходящий из газогенератора по трубам 9, 10 горючий газ поступает в водяной холодильник 11 для превращения паров побочных продуктов – смолы и водяного пара в жидкость. Смолосборник 13 для осуществляет сбора жидких смол, воды, летучей сажи, а также возможных следов оксидов азота. Циклон 14 предназначен для дополнительной сушки и очистки газа. Ресивер 16 нужен для подачи генераторного газа в горелку 18 камеры сгорания 16 (ЭТУ) или камеры

сгорания газотурбинной установки или для сбора в газовый баллон 20 при помощи компрессора 19.

Основной материал для изготовления установки – листовая сталь толщиной 2,5-7,0мм, огнеупорный кирпич, бетон, металлические трубы. Количество генераторного газа при стационарном режиме обеспечивает тепловую мощность $Q=0,5-5,0$ МВт. Получаемый из ДО газ практически невзрывоопасен, сгорает в воздухе с получением CO_2 и H_2O , фактически не образует экологически вредных оксидов азота, что объясняется выбором соответствующего температурного режима.

Предлагаемый процесс газификации рассчитан на 6 часов непрерывной работы при однократной загрузке ДО с влажностью $W=0,3-0,6$. Дозагрузка может происходить через 1 час работы. После окончания процесса газификации один раз в сутки производится чистка газогенератора от золы, остатков древесного угля, сажи, смолы, проверяется исправность ГГУ.

Представляется целесообразным, в ближайшие годы, создать опытно-промышленную установку, которая позволит получать из измельченных или брикетированных ДО газообразное топливо с теплотворной способностью до 5800 кДж/кг (по нашим экспериментальным данным до 5200кДж/кг).

ГГУ может быть использована на деревообрабатывающих предприятиях, в леспромхозах, в сельскохозяйственной местности, на автономных электростанциях и т.д. Экономический эффект от использования газогенераторной установки связан с получением и использованием дешевого газообразного топлива из древесных отходов или торфа, что особенно важно для населенных пунктов, отдаленных от мест добычи газа и от магистральных газопроводов.

Автономная ГГУ мощностью 100 квт, работающая на вторичных древесных ресурсах. Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.

Топливо (древесные отходы, торф и т.п.) пройдя систему подготовки 2 (сушки) поступает в газогенераторную установку ГГУ-0,5, где газифицируется, после чего поступает в ресивер 3 и затем через вентиль 4 в камеру сгорания 5. В камеру сгорания поступает также воздух, который забирается из атмосферы, проходит фильтр 6, нагревается в маслорадиаторе 14 и в теплообменнике (регенератора) 8. В камере сгорания 5 генераторный газ сгорает в потоке воздуха с выделением теплоты достаточной для нагрева продуктов сгорания до $T_r=1200K$, что соответствует уровню температур в газотурбинных установках и обеспечивает значительный ресурс ее работы.

УДК 517.977.5

Н.Н. КЛОЧКОВА, к.т.н., доцент,
А.В. ОБУХОВА к.т.н., доцент
(г. Самара, Самарский государственный технический университет)

Разработка системы управления процессом индукционной выплавки

Система управления процессом выплавки полимерной массы разрабатывается на основании комплексного подхода последовательного решения следующих задач:

- оптимального управления системы индукционного нагрева установки периодического действия для цилиндрического составного изделия с разнородными физическими свойствами;

- синтез замкнутой системы автоматического управления.

Ряд задач оптимального управления могут быть рассмотрены как линейные задачи с квадратичным критерием, решением которых является регулятор с обратной связью по состоянию. в том числе и рассматриваемая в настоящей работе,

На основании тепловых, электромагнитных расчетов был сделан вывод, что система практически линейна, т.е. $\mu = \text{const}$ для каждой точки, $\lambda = \text{const}$, $c = \text{const}$ из-за малого диапазона температур (погрешность линеаризации не превышает 10%).

Исследования температурных полей системы «корпус изделия – полимерная масса» на цифровой модели показали, что при толщине корпуса 10 мм перепад температуры по толщине стенки корпуса к моменту выхода на предельно допустимое значение температуры поверхности (130°C) не превышает 20°C, температуры на внешней и внутренней поверхностях корпуса изделия колеблются с амплитудой, не превышающей 8°C. Из сравнения постоянных времени для передаточной функции корпуса изделия и полимерной массы следует, что динамика процесса определяется, прежде всего, постоянными времени процесса нагрева и плавки полимерной массы непосредственно в месте контакта, т.е. на поверхности сопряжения.

Эти результаты позволяют в дальнейшем при синтезе системы управления использовать более простую модель объекта, принимая в качестве источника тепла для внутреннего цилиндра тепловой поток от внешнего цилиндра на поверхности сопряжения и пренебрегая тепловыми потерями с поверхности корпуса.

Электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» по своей физической природе представляют собой быстропотекающие процессы, инерционностью которых по сравнению с тепловыми процессами можно пренебречь. Это позволяет представить систему «индуктор – металл» в виде совокупности двух последовательно соединенных распределенных звеньев: одного – статического и второго

– динамического звена, характеризующего процесс формирования температурного поля под действием внутренних источников тепла.

Предлагается следующая постановка задачи оптимального управления:

$$\Delta T \geq \max |T_{\text{отт}}(t) - T_{\text{зад}}(t)|$$

при энергетических и технологических ограничениях вида

$$P_{\min} \leq P(t) \leq P_{\max}, \quad T_{\text{зад}}(t) \leq T_{\max}$$

где $T_{\text{отт}}(t)$ - температурное поле по длине изделия, за период времени, $T_{\text{зад}}(t)$ - заданное температурное распределение, T_{\max} - максимально допустимая температура нагрева.

Тогда модель динамики управляемого процесса в пространстве состояний задается системой:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(t_0) = x_0; \quad \dot{x} = T_{\text{зад}}(t) - T_{\text{отт}}$$

Качество управления определяется квадратичным критерием вида

$$J[u(t)] = 1/2 x^T S_f x \Big|_{t_f} + 1/2 \int_0^{t_f} (x^T F x + u^T E u) dt$$

$$u(t) = -K_{\text{пее}}(t) x(t)$$

Оптимальный закон управления синтезируется оптимальным регулятором с коэффициентом усиления:

$$K_{\text{пее}}(t) = E^{-1} B^T S(t)$$

Матрицы $A(t)$, $B(t)$ определяются для случая контроля температурного поля по длине изделия в четырех точках. При этом стабилизируется температура в одной точке, а в других точках наблюдается. Для контроля выбирается несколько точек максимальных значений температур (рис 1).

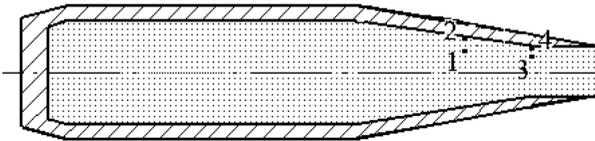


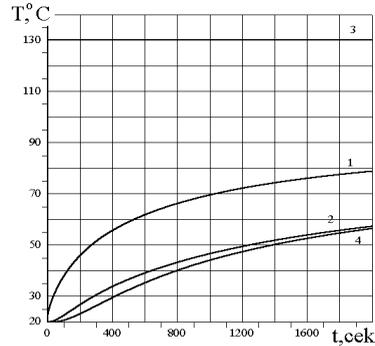
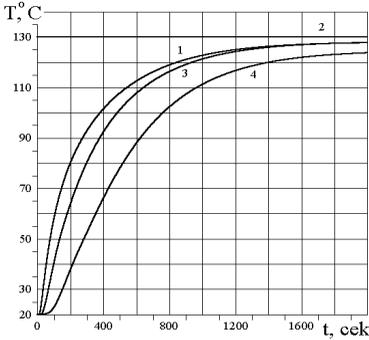
Рис. 1. Местоположение контролируемых точек (1, 2, 3, 4).

Динамика нагрева в контролируемых точках отражена кривыми (рис. 2). Полученные кривые хорошо описываются экспоненциальным законом. Используя преобразования Лапласа, можно перейти к изображениям и передаточной функции для матрицы $A(t)$, которые имеют вид:

$$W_{ij}(p) = \frac{K_{ij} \cdot e^{-t_{ij}p}}{T_{ij}p + 1}$$

где K_{ij} , t_{ij} , T_{ij} - соответственно, коэффициент передачи, время запаздывания, постоянная времени.

$$K_{ij} = \frac{\Delta T_{выхj}}{\Delta T_{exi}}$$



а)

б)

Рис.2. Переходные характеристики объекта: а)- в точке 2 температура постоянна; б)- в точке 3 температура постоянна

Для определения передаточных функций для матрицы [B] необходимо осуществить расчет температурного поля при нагреве по всей длине изделия. Величины мощностей принимаются равными 0,01 от заданных значений. После получения установившегося температурного поля мощность источников увеличена на 10%. Динамика процесса в контролируемых точках отражена на рис.3

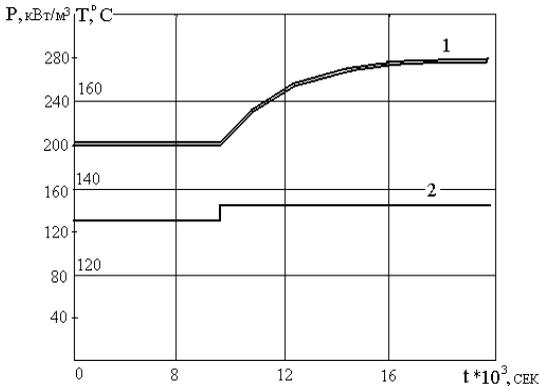


Рис. 3. 1-Графики температурного поля при нагреве по всей длине изделия.(для 4-х контролируемых точек); 2-График изменения мощности по длине изделия.

Коэффициент передачи для определения передаточной функции для матрицы [B]

$$K_{ij} = \frac{\Delta T_{ij}}{\Delta P_{ij}}$$

Полученные выражения для передаточных функций объекта положены в основу синтеза оптимальной системы управления процессом индукционного нагрева при выплавке тротила.

В.В. КЛЮКВИН, аспирант;
рук. В.И. СУББОТИН, к.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

Направление использования ВЭР компрессорной станции

На настоящий момент газовая промышленность обладает большими резервами вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Они представлены в основном в виде теплоты отводящейся от подшипников газоперекачивающего агрегата (ГПА), и теплоты выхлопных газов турбины. В первом случае это масло с температурами $\approx 150^\circ\text{C}$, а во втором - выхлопные газы турбины с температурой $400\text{--}500^\circ\text{C}$.

Анализ опыта создания и эксплуатации утилизационных установок в нашей стране и за рубежом, а также оценка возможностей компрессорных станций показывают, что наиболее перспективным и технически наиболее осуществимым, на настоящий момент, представляются направления утилизация теплоты в холод, механическую и электрическую энергии.

Выработка тепловой энергии

В настоящее время утилизация в виде тепловой энергии с огромным избытком компенсирует любые теплофикационные потребности промплощадок компрессорных станций (КС) и прилегающих населенных пунктов. Однако теплофикационная потребность КС незначительна по сравнению с объемами ВЭРов ГПА. Следует добавить, что с ростом объемов добычи и транспортировки газа из удаленных труднодоступных районов крупные КС будут связаны с малонаселенными районами, где внешние потребители практически отсутствуют.

Крупными потребителями вторичного тепла газотурбинных установок (ГТУ) в отдельных случаях могут стать магистральные нефтепроводы, проходящие в близости КС.

Использование тепла для подогрева нефти может значительно увеличить пропускную способность нефтепроводов и повысить эффективность использования топливного газа. По ориентировочным подсче-

там в непосредственной близости от нефтепроводов (до 10 км) по всей стране расположено около 40 КС.

Таким образом, из-за отсутствия стабильных и энергоемких потребителей утилизация тепла отходящих газов ГТУ только для теплофикационных нужд не может решить проблему использования ВЭРов ГПА полностью.

Выработка электрической энергии

Это направление широко используется в зарубежной практике. В основном – это утилизация тепла для генерации пара, срабатываемого в паровой турбине, для выработки электроэнергии. В настоящее время паровая турбина остается наиболее выгодной установкой для данного вида утилизации.

Основными потребителями электроэнергии на КС являются вспомогательные механизмы ГТУ, насосные и вентиляционные установки, системы управления, а также осветительная арматура цехов. Из опыта обследования КС известно, что мощность основных потребителей электроэнергии типовой КС составляет 600ч700 кВт на 30ч40 МВт установленной мощности ГТУ.

Следует отметить, что в последние годы много внимания уделяется охлаждению транспортируемого газа. Повышение температуры газа существенно сказывается на пропускной способности газопроводов. Рядом научно-исследовательских организаций предлагаются различные схемы охлаждения, и все они связаны с дополнительными затратами энергии, в первую очередь электрической.

Из вышесказанного делаем вывод, что КС является достаточно емким потребителем электроэнергии.

Выработка механической энергии

В настоящее время используется как промежуточный этап для выработки электрической энергии. Однако механическая энергия кроме работы на электрический генератор, может быть использована для привода насосного и вентиляционного оборудования. В этом случае мы лишаемся промежуточного преобразования тепла в электроэнергию, и напрямую направляем тепло на выполнение механической работы.

Как уже упоминалось, основным способом получения механической энергии является преобразование теплоты уходящих газов ГТУ в пар который впоследствии срабатывается в паровой турбине для получения механической энергии. Данный способ зарекомендовал себя, однако он не единственный и обладает некоторыми недостатками, к тому же достаточно сложен в эксплуатации.

Предполагается использовать в данном направлении двигатели внешнего сгорания, в частности двигатель Стирлинга. Этот двигатель до конца 20-го века широко не применялся из-за сложной конструкции, большей материалоемкости и как следствие высокой стоимости.

Однако, в последнее время в ведущих мировых обзорах по энергопреобразующей технике двигатель Стирлинга рассматривается как

двигатель, обладающий наибольшим потенциалом для дальнейшей разработки в применении его в качестве утилизатора теплоты. Низкий уровень шума, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, хорошие характеристики крутящегося момента, отсутствие высокого давления – все эти параметры дают возможность машинам Стирлинга в ближайшее время занять свое место рядом с турбинами и топливными элементами.

Необходимо отметить, что ряд зарубежных фирм начали производство двигателей, технические характеристики которых уже сейчас превосходят паровые турбины и топливные элементы. КПД серийных и опытных образцов двигателя Стирлинга даже при умеренных температурах нагрева (600-700 °С) достигает 40 % . В лучших зарубежных образцах двигателей Стирлинга удельная масса равна 1,2-3 кг/кВт, а эффективный КПД – до 45 %.

В России разработкой двигателей Стирлинга на государственном уровне никто не занимается, хотя до 1990 г. исследования в этой области проводили 15 организаций военно-промышленного комплекса.

Схема утилизации

Аэродинамическое сопротивление теплоутилизатора сильно влияет на работу ГПА. Практические исследования на газоперекачивающих компрессорных станциях показывают, что утилизатор влияет на работу газотурбинного агрегата. Зачастую это влияние снижает эффективный КПД турбины.

Предлагается новая схема утилизации. А именно, не устанавливать теплоутилизаторы в выпускном тракте каждого ГПА, а отводить часть уходящих газов в один коллектор, в котором и установить утилизатор с тепловой мощностью необходимой для нормального теплоснабжения промплощадки. Количество утилизируемого тепла регулируется расходом газов через утилизатор при помощи дымососа. Т.е. имеем классическую схему качественного регулирования отпуска теплоты.

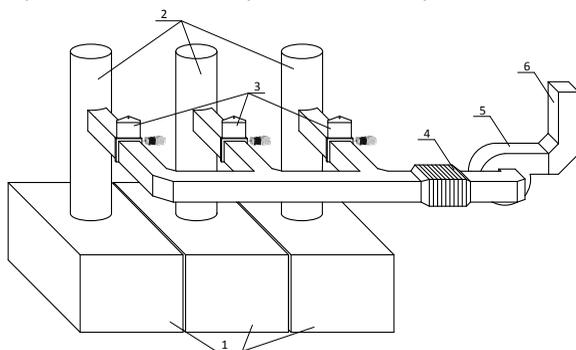


Рис. 1.

1 – ГПА; 2 – выхлопные трубы ГПА; 3 – заслонки; 4 – утилизатора теплоты выхлопных газов; 5 – дымосос; 6 – выход охлажденных выхлопных газов

Предлагаемая схема позволит решить следующие проблемы:

- снижение КПД ГПА за счет сопротивления выпускного тракта.
- несовпадение режима работы ГПА и утилизаторов с потребностью потребителя;
- отсутствие плавного регулирования отпуска тепла.

При применении данного варианта утилизации выхлопных газов себестоимость 1 Гкал не превысит 20 рублей.

Литература

1. Ванюшин Ю.Н., Глушков В.И. Утилизация тепла на компрессорных станциях магистральных газопроводов. – М.: Недра. 1978. –160 с.

УДК 621.

А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Аспекты использования вторичных энергоресурсов промышленных предприятий

В результате энергетического обслуживания тех или других процессов отработавшие энергоносители превращаются в тепловые отходы, которые могут быть использованы для энергетических целей. Такие тепловые отходы называются вторичными энергоресурсами. Особенно значительными вторичными энергоресурсами располагают промышленные предприятия.

Вторичные энергоресурсы достигают в ряде отраслей промышленности 30 – 60% и более от соответствующего суммарного расхода топлива (черная и цветная металлургия, химические производства и др.).

Использование вторичных энергоресурсов снижает общий расход топлива и уменьшает размеры энергопотребления, покрываемого централизованным путем от энергоснабжающей системы. Поэтому рациональное, т. е. технико-экономически обоснованное, использование внутренних ресурсов промышленных предприятий должно производиться, возможно, более полно.

В табл. 1 дается общая характеристика возможных вторичных энергоресурсов современных промышленных предприятий.

Из перечисленных в табл. 1 вторичных энергоресурсов основными являются:

- 1) отходящие горючие газы металлургических печей и нефтеперерабатывающих агрегатов;
- 2) отходящие горячие газы промышленных печей;
- 3) отработавший и вторичный производственный пар;

4) нагретая охлаждающая вода и пар испарительного охлаждения промышленных печей.

Табл.1. Общая характеристика вторичных энергоресурсов современных промышленных предприятий

Энергоносители потребления	Вторичные энергоресурсы	
	разновидности	параметры
Твердое, жидкое и газообразное топливо для обслуживания технологических высокотемпературных процессов (промышленные печи) и охлаждающая вода	Отходящие горючие газы коксовых и доменных печей: – коксовый газ; – доменный газ	$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 3500 \div 4500 \text{ ккал/м}^3$ $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 800 \div 960 \text{ ккал/м}^3$
	Отходящие горючие газы предприятий нефтяной промышленности Отходящие горячие газы промышленных печей Нагретая охлаждающая вода и пар испарительного охлаждения печей Тепло, выделяемое расплавленными металлами и шлаками промышленных печей	$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 10000 \div 15000 \text{ ккал/м}^3$ $t_{\text{о.г}} \geq 400 \div 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ $t_{\text{о.в}} \leq 95 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_{\text{о.н}} \geq 1,6 \div 4 \text{ ама}$ $t_{\text{отх}} > 1000 \text{ }^\circ\text{C}$
Газ и жидкое топливо для обслуживания технологических процессов (двигатели внутреннего сгорания генераторных, воздушных и компрессионных агрегатов) и охлаждающая вода Горючее технологическое сырьё (в предприятиях металлургической и деревообрабатывающей, текстильной, пищевой отраслях промышлен.) Пар для обслуживания технологических силовых процессов (в молотовых, прессовых и штамповочных агрегатах) и нагревательных процессов Горячая вода для бытового теплопотребления Электроэнергия	Горячие газы, отходящие из двигателей внутреннего сгорания Нагретая охлаждающая вода, отходящая от двигателей внутреннего сгорания	$t_{\text{о.г}} = 350 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$ $t_{\text{о.в}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$
	Горючие твердые и жидкие топливные отходы производства	$Q_{\text{н}}^{\text{п}} \geq 1000 \text{ ккал/кг}$
	Отработавший производственный пар Вторичный производственный пар Горячая сливная вода (загрязненный конденсат) Горячая сливная вода	$P_{\text{о.н}} = 1,3 \div 1,5 \text{ ама}$ $P_{\text{в.п}} \approx 1 \text{ ама}$ $t < 100 \text{ }^\circ\text{C}$ $t < 50 \text{ }^\circ\text{C}$
	Внутренние тепловыделения в помещениях	$t < 100 \text{ }^\circ\text{C}$

До настоящего времени отработавший производственный пар используется для энергоснабжения потребителей еще далеко недостаточно.

Многие производственные процессы, связанные с нагревом или выпаркой той или другой продукции, дают вторичный пар с давлением, близким к атмосферному. Подобные тепловые отходы имеют место, например, в предприятиях сахарной, спиртовой, содовой, сульфатцеллюлозной и других отраслей промышленности и представляют собой довольно значительные вторичные энергоресурсы.

Как показывает характеристика вторичных энергоресурсов, использование этих энергоресурсов может значительно уменьшить расчетные тепловые и электрические нагрузки энергопроизводящих установок, работающих на топливе.

При этом ряд вторичных энергоресурсов, например, отработавший производственный пар, нагретая охлаждающая вода, пар испарительного охлаждения, может быть непосредственно использован для покрытия средне- и низкотемпературных тепловых нагрузок, т. е. без применения для этой цели специальных энергопроизводящих установок.

Поэтому, при составлении вариантов энергоснабжения предприятия, необходимо в каждом из вариантов определять в первую очередь наиболее рациональное использование получаемых вторичных энергоресурсов. В остальной части потребности предприятия в разных видах энергии должны покрываться от установок, работающих на первичных энергоресурсах.

Для этого, после установления потребностей предприятия в энергии, в каждом из вариантов энергоснабжения должны определяться сперва начальные качественные и количественные параметры вторичных энергоресурсов.

К качественным параметрам вторичных энергоресурсов относятся начальные температуры (t , °C) и давление (p , ата) соответствующего теплоносителя и его удельная теплоемкость (c , ккал/(кг·град) или (ккал/нм³·град) или рабочая низшая теплота сгорания (Q^P ккал/кг или ккал/нм³).

Основными количественными параметрами вторичных энергоресурсов являются максимальное и среднее часовые количества этих теплоносителей за характерные зимние и летние рабочие сутки, а также годовые количества.

Для использования физического тепла отходящих газов промышленных установок применяются следующие разновидности энергетических теплоиспользующих установок:

- 1) установки для подогрева воды;
- 2) установки для подогрева воздуха;
- 3) паровые котлы-утилизаторы;
- 4) газотурбинные установки, встроенные в газовый тракт.

Первые две разновидности энергоустановок имеют ограниченное применение. Горячая вода ($t_b \leq 130 \div 150^\circ \text{C}$), получаемая в установках на отходящих газах, может применяться для отопительно-вентиляционных и бытовых целей.

В виду сезонности большинства основных потребителей тепла горячей воды, достаточно полное годовое использование горячей воды при сколько-нибудь значительной тепловой мощности утилизационных установок не представляется возможным.

Подогрев воздуха в теплоиспользующих установках отходящими газами местных промышленных печей может производиться:

- а) для пластической обработки металлов воздушными молотами или прессами, причем сжатый воздух подогревается до 250°C ;
- б) для нагревательных (сушки) и отопительно-вентиляционных целей в местных и производственных помещениях.

Пар, получаемый в котлах-утилизаторах, может быть использован:

- а) для производственных, нагревательных, отопительно-вентиляционных и бытовых тепловых целей;
- б) для выработки электроэнергии или производства механической работы при раздельном энергопроизводстве;
- в) для получения теплофикационной электроэнергии или механической работы агрегатов при комбинированном энергопроизводстве на базе тепловых производственных, отопительно-вентиляционных и бытовых нагрузок.

Установки с паровыми котлами-утилизаторами могут обеспечивать наиболее полное и рациональное использование физического тепла отходящих печных газов, как для теплоснабжения потребителей, так и для выработки электроэнергии при комбинированном или раздельном энергопроизводстве.

Таким образом, при энергетическом использовании физического тепла отходящих печных газов основным рабочим теплоносителем является почти всегда водяной пар, вырабатываемый в котле-утилизаторе.

В настоящее время применяются следующие основные конструктивные типы котлов-утилизаторов:

- 1) газотрубные котлы-утилизаторы, используемые в установках малой мощности с низким давлением пара $p_0 \leq 15 \text{ ага}$ и для начальной температуры отходящих газов $t_{0,г.н} \leq 700 \div 800^\circ \text{C}$;
- 2) змеевиковые котлы-утилизаторы с многократной принудительной циркуляцией для начальных параметров пара $p_0 \leq 18 \text{ ага}$, $t_0 \geq 375^\circ \text{C}$;
- 3) водотрубные котлы-утилизаторы с естественной циркуляцией, работающие на газах с высокой начальной температурой порядка 1000°C и выше.

В котлах-утилизаторах первых двух типов используется в основном конвективная теплоотдача газов. Для нормальной работы змеевиковых котлов-утилизаторов с многократной принудительной циркуляцией

необходимо наличие отходящих газов малой запыленности и умеренной температуры. Это устраняет возможность зашлакования трубных пучков змеевикового котла.

Преимущества таких котлов, сравнительно с котлами-утилизаторами других типов, сводятся к следующему:

Преимущества таких котлов, сравнительно с котлами-утилизаторами других типов, сводятся к следующему:

- а) уменьшаются затраты металла на котел;
- б) имеются практически неограниченная мощность (пропуск газов) и возможность выработки пара повышенных давлений;
- в) уменьшаются требования к качеству питательной воды;
- г) достигается большая компактность;
- д) имеется возможность применять блочные установки.

Поэтому змеевиковые котлы, индивидуальные или блочные с многократной принудительной циркуляцией, являются основным современным типом котлов-утилизаторов, изготавливаемых отечественной промышленностью.

Возможны следующие варианты использования пара, получаемого в котлах утилизаторах:

- 1) для теплоснабжения потребителей;
- 2) для выработки электроэнергии при раздельном энергопроизводстве;
- 3) для комбинированного энергопроизводства, т. е. выработки теплофикационной электроэнергии на базе тепловых нагрузок.

В каждом из перечисленных вариантов использования пара котлов-утилизаторов получается экономия топлива на соответствующей заменяемой энергетической установке, работающей на топливе.

Литература

1. Быстрицкий Г.Ф. Энергосетевое оборудование промышленных предприятий. – М.: Издательский мир “Академия”, 2003. – 304 с.
2. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб. для вузов/ О.Л. Данилов, А.Б. Горяев, И.В. Яковлев и [др.] под редакцией А.В. Клименко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 424 с.

Определение коэффициента гидравлического трения в переходной зоне

При движении воды, например, в водопроводных трубах чаще всего сталкиваются с большими скоростями движения. В этом случае коэффициент гидравлического трения определяется по известным формулам [3].

Однако, иногда при транспортировании вязких жидкостей (например, нефти) по трубопроводам скорость движения достигает критических значений. Зона, где происходит такое движение, называется зоной неустойчивого режима или переходной зоной. Внутри этой зоны происходит переход ламинарного режима в турбулентный и наоборот – из турбулентного режима в ламинарный. Числа Рейнольдса лежат в пределах от 1000ч2300 до 4000ч40000.

В зоне неустойчивого режима происходят сложные процессы. При движении жидкости на отдельных участках возникают отдельные области турбулентного режима, которые разрастаются, а затем исчезают и снова появляются. Когда турбулентные области разрастаются, растёт и сопротивление движению жидкости, при этом скорость уменьшается. Как только она становится меньше критической, разросшиеся турбулентные области обращаются в ламинарные. После этого в связи с уменьшением потерь напора скорость увеличивается, причём турбулентные области снова появляются и т.д.

В связи с таким характером движения в переходной зоне, представить это движение графически очень сложно. Исключение могут составить случаи, когда ламинарный режим «затягивается» и имеет место по длине всего трубопровода или, когда турбулентный режим имеет место по длине всего трубопровода.

Необходимо также добавить, что при постоянном расходе кинетическая энергия жидкости при турбулентном и ламинарном режимах будет отличаться по величине. Это обуславливается тем, что коэффициент Кориолиса при разных режимах имеет различное значение. Кроме того, при турбулентном режиме происходит пульсация скоростей.

Учитывая всё выше сказанное, можно сделать вывод о том, что при смене режимов разность показаний пьезометров в сечениях трубы не будет равна искомой потере напора (зная величину которой можно определить коэффициент гидравлического трения).

Для цилиндрической трубы в рассматриваемый момент времени разница отметок горизонтов жидкости в пьезометрах можно определить по формуле:

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = h_{\text{тр}} + h_i, \quad (1)$$

где $\frac{p_1}{\gamma}$ и $\frac{p_2}{\gamma}$ - пьезометрические напоры в 1-ом и 2-ом сечениях трубы,

соответственно, м; $h_{\text{тр}}$ – потери напора на трение, м; h_i – инерционный напор, м.

Потери напора на трение определяются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{D} \times \frac{u^2}{2g}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, безразм.; u – скорость движения жидкости, м/с; D – внутренний диаметр трубопровода, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; l – длина трубопровода, м.

Инерционный напор определяется по формуле

$$h_i = \frac{\alpha l}{g} \times \frac{du}{dt}, \quad (3)$$

где α – коэффициент Кориолиса, безразм.

В данном случае определить инерционный напор не представляется возможным. Однако если движение жидкости во времени будет изменяться достаточно медленно, то величина инерционного напора оказывается незначительной, в связи с чем ею можно пренебречь.

Экспериментальные исследования проводились на полипропиленовой и стальной трубах внутренним диаметром 13,2 и 15 мм соответственно. Расход жидкости находился в пределах от $2,9 \cdot 10^{-5}$ до $7,72 \cdot 10^{-5}$ м³/с. Длина экспериментального участка трубы составляла 3,5 м. По трубам транспортировалась вода с температурой 10 °С.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса. Здесь же для сравнения представлены графики зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, рассчитанные по формуле Пуазейля для ламинарного режима движения

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (4)$$

И по формуле Блазиуса для гидравлически гладкого течения

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (5)$$

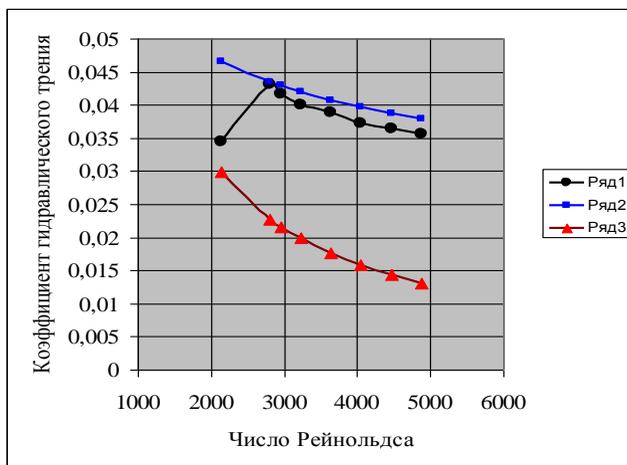


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса в полипропиленовой трубе $D = 13,2$ мм: ряд 1 – экспериментальные значения λ ; ряд 2 – λ , рассчитанные по формуле (5); ряд 3 – λ , рассчитанные по формуле (4)

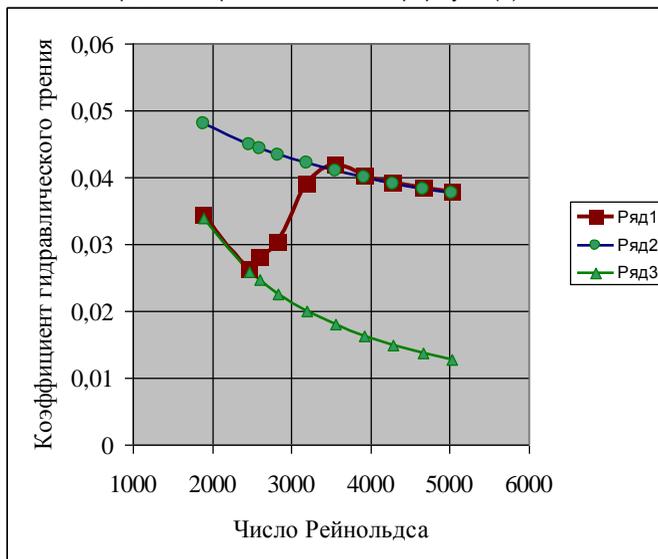


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса в стальной трубе $D = 15$ мм: ряд 1 – экспериментальные значения λ ; ряд 2 – λ , рассчитанные по формуле (5); ряд 3 – λ , рассчитанные по формуле (4)

Экспериментальные значения коэффициента гидравлического трения определялись по формуле (2) пренебрегая при расчётах величиной инерционного напора.

Как видно из графиков при значениях числа Рейнольдса около 2000 значения λ , полученные экспериментальным путём, располагаются рядом с линией ламинарного течения. По мере увеличения числа Рейнольдса увеличивается и коэффициент гидравлического трения, достигая своё максимальное значение в стальной трубе при $Re = 3500$, в полипропиленовой трубе при $Re = 2800$. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса значения коэффициента гидравлического трения уменьшаются приближаясь к значениям, рассчитанным по формуле Блазиуса.

Литература

1. **СП 40-102-2000.** Проектирование и монтаж трубопроводных систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие положения/ Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001.
2. **Добромыслов А.Я.** Таблицы для гидравлических расчётов напорных и безнапорных трубопроводов из полимерных материалов/Под ред. В.С. Ромейко. Пособие к СНиП и СП. М.: ТОО «Изд-во ВНИИМП», 2000.
3. **Чугаев Р.Р.** Гидравлика. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 672 с.
4. **Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф.** Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. пособие. – М.: Стройиздат, 1995. – 176 с.
5. **Кормашова Е.Р.** К вопросу определения коэффициента гидравлического трения/ «Информационная среда вуза»// Материалы XIV Междун. научно-техн. конф.- Иваново: ИГАСУ, 2007.

УДК 620.92

Е.В. КОЧАРЯН, к.т.н., доцент
И.К. МАСАЛИМОВ, магистрант
(КубГТУ, г. Краснодар)
А.С. ЛУЦЕНКО, директор
(ООО «Энергетическая компания»)

Эффективность использования теплоотражающих экранов за приборами отопления в целях энергосбережения

Одним из часто рекомендуемых энергосберегающих мероприятий по экономии тепловой энергии на отопление зданий является устройство теплоотражающих панелей за радиаторами отопления.

В рамках эксперимента была проведена оценка эффективности устройства отражающего экрана на теплотери здания. Для этих целей было выбрано два участка стены в одном помещении с установленными радиаторами, имеющими равные характеристики. Участок стены № 1 за одним из радиаторов исследовался до установки тепло-

отражающих экранов и после установки в течение 24 часов. Контроль температуры участка стены № 2 за другим радиатором осуществлялся синхронно. Однако теплоотражающий экран на участке № 2 за радиатором не устанавливался.

В рамках исследования проводилось термографирование поверхности в соответствии с требованиями [1]. Показания температур поверхности в контрольных точках снимались контактным термометром с погрешностью не более $0,1^{\circ}\text{C}$.

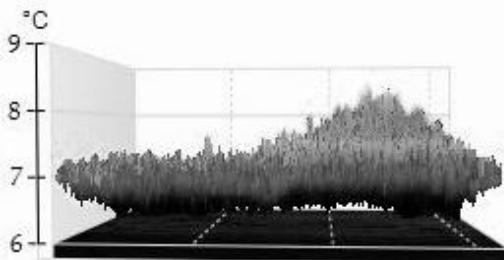


Рис. 1 – Термограмма (3D) исследуемой поверхности через сутки после установки теплоотражающих экранов

В результате экспериментов отмечено снижение Δt (разницы между температурой наружной поверхности ограждающей конструкции и окружающей средой) относительно начального значения в среднем на 13 %. Эта величина определена с учетом коррекции на незначительные колебания температуры наружного воздуха. Корректирующая поправка определялась путем контроля температуры наружной поверхности стены на участке № 2.

Снижение теплотерь достигается за счет отражения излучения экраном. Этот эффект можно учесть за счет эквивалентного снижения коэффициента теплопередачи стены. В результате пропорционально снизятся тепловые потери через стену - $Q_{\text{ст}}$.

Используем известную зависимость для расчета теплотерь через стену [2]:

$$Q_{\text{ст}} = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ст}}$ – количество тепловой энергии, теряемой через ограждающую конструкцию, Вт; α – коэффициент теплоотдачи между наружной поверхностью ограждающей конструкции (стена здания) и окружающей средой (воздух), $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$; F – площадь ограждающей конструкции (стен), м^2 ; Δt – разница температур между температурой наружной поверхности ограждающей конструкции и окружающей средой, $^{\circ}\text{C}$.

Исходя из полученных данных, можно рассчитать снижение тепловых потерь за счет экранирования участка стены за радиатором:

$$\Delta Q_3 = 0,13 \cdot \frac{f}{F_{\text{ст}}} \cdot Q_{\text{ст}}, \quad (2)$$

где f – площадь участка стены здания, перегреваемая радиатором, °С;
 $F_{\text{ст}}$ – площадь стен здания (без учета остекления и дверных проемов), м²;
 ΔQ_3 – снижение количества тепловой энергии, теряемой через ограждающую конструкцию площадью f , кДж.

Для всего здания формула может быть преобразована так:

$$\Delta Q_3 = 0,13 \cdot \frac{nf}{F_{\text{ст}}} \cdot Q_{\text{ст}}, \quad (3)$$

где n – количество радиаторов в здании.

Проведем примерную оценку относительной величины экономии для реального объекта. Площадь f примем равную 0,36 м² (исходя из размеров стандартного 7-ми секционного чугунного радиатора М-140), другие необходимые данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры многоквартирных домов

Тип здания	$F_{\text{ст}}, \text{ м}^2$	$n, \text{ шт.}$	$nf / F, \%$
Двухэтажный жилой дом	1076	108	3,6
Девятиэтажное общежитие	5285	980	6,7
Девятиэтажный жилой дом	6045	424	2,5
Пятиэтажный жилой дом	1880	280	5,4
Пятиэтажный жилой дом	1361	195	5,2

Исходя из приведенных данных и формулы (3), можно утверждать, что эффект от энергосберегающего мероприятия – установка теплоотражающих экранов за радиаторами отопления, не превышает 0,9 % от тепловых потерь здания через стены. В пересчете на суммарные тепловые потери, с учетом тепловых потерь через перекрытия, светопрозрачные ограждающие конструкции, а также с учетом инфильтрации, эффект будет в несколько раз ниже.

Литература

- ГОСТ 26629-85. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.
- Малявина Е.Г. Теплотери здания. – М. Изд. : АВОК-ПРЕСС, 2007.

Е.И. КРУПНОВ к.т.н., доцент,
Л.И. ТИМОШИН к.т.н., доцент
Е.Р. КОРМАШОВА к.т.н., доцент,
(ИГЭУ, ИГАСУ) г. Иваново

Подготовка воды для систем централизованного водоснабжения

Природные воды, используемые для питьевого и производственного водоснабжения, должны иметь благоприятные органолептические свойства, быть безвредными по химическому составу и безопасными в санитарно-эпидемиологическом отношении. Перед производителями питьевой воды стоит задача обеспечения ее эпидемической безопасности, т. е. достаточной очистки и обеззараживания.

Следует понимать, что ни один из современных методов обработки воды не обеспечивает 100 % очистки воды от микроорганизмов (наиболее близкими к идеалу остаются только дистилляция и обратный осмос). Но даже если предположить, что система водоподготовки и обеспечит абсолютное удаление из воды всех микроорганизмов, то остается большая вероятность вторичного загрязнения воды при ее транспортировке по трубам распределительной сети, при хранении в емкостях, при контакте с атмосферным воздухом и т. д.

Санитарными нормами и правилами не ставится цель доведения воды по микробиологическим показателям до стерильного качества (отсутствие всех микроорганизмов). Задача состоит в том, чтобы удалить (или инактивировать) наиболее опасные для здоровья человека микроорганизмы.

Основным документом, определяющим гигиенические требования к качеству питьевых вод, является СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

СанПиН 2.1.4.1074-01 устанавливает нормативы безопасности питьевой воды по микробиологическим и паразитологическим показателям (табл. 1).

Обеззараживание осуществляется химическими и физическими методами.

Физические методы обеззараживания:

- кипячение;
- ультразвуковое воздействие;
- воздействие электрическим разрядом;
- ультрафиолетовое облучение.

Химические методы обеззараживания:

- обработка воды сильными окислителями: озоном, хлорсодержащими веществами;

– олигодинамия (воздействие ионами тяжелых металлов – серебра, меди и других).

Таблица 1. Нормативы безопасности питьевой воды по микробиологическим и паразитологическим показателям

Показатели	Единицы измерения	Нормативы
Термотолерантные колиформные бактерии	Число бактерий в 100 мл	Отсутствие
Общие колиформные бактерии	Число бактерий в 100 мл	Отсутствие
Общее микробное число	Число образующих колонии бактерий в 1 мл	Не более 50
Колифаги	Число бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл	Отсутствие
Споры сульфитредуцирующих клостридий	Число спор в 20 мл	Отсутствие
Цисты лямблий	Число цист в 50 л	Отсутствие

Эффективность обеззараживания воды химическими и физическими методами во многом зависит от свойств воды и биологических особенностей микроорганизмов – их устойчивости к этим воздействиям.

Экономичность (экономическая целесообразность) обеззараживания воды тем или иным методом определяется составом воды, местоположением и мощностью водопроводной станции, стоимостью реагентов и оборудования дезинфекции и финансовой возможностью собственника водопровода.

Важно понимать – ни один из методов обеззараживания не является универсальным и самым лучшим. Каждый метод обладает своими достоинствами и недостатками.

Кипячение воды при атмосферном давлении в течение 10–12 мин убивает все неспорообразующие микроорганизмы. После охлаждения споры в этой воде прорастут (вторичное загрязнение). Кипячение требует большого расхода энергии и не обладает пролонгированным эффектом.

Этот метод используется для обеззараживания малых объемов воды: в быту, полевых условиях, лабораториях, малых водоочистных установках и других подобных случаях.

Ультразвуковое воздействие убивает большинство микроорганизмов при интенсивности излучения не менее 2 Вт/см² и времени обработки не менее 5 мин. Работа генератора ультразвука требует большого расхода энергии и не обладает пролонгированным эффектом.

Этот метод, также как и кипячение, используется для обеззараживания малых объемов воды.

Электрический разряд в воде обладает высоким бактерицидным эффектом. При разряде образуются ударные волны и свободные радикалы, обладающие сильными окисляющими свойствами. В результате происходит гибель большинства микроорганизмов. Электрический

разряд в воде требует большой мощности высоковольтного генератора. Поэтому расход электроэнергии составляет около 2 кВт·ч на 1 м³ обрабатываемой воды

Ультрафиолетовое облучение убивает микроорганизмы, но клеточные стенки бактерий, грибков, белковые фрагменты вирусов остаются в воде. УФ излучение требует большого расхода энергии и не обладает пролонгированным эффектом. УФ лампы содержат ртуть (класс опасности 1) и требуют специальных мер по утилизации.

Озонирование – самый эффективный и дорогой метод обеззараживания воды, требует большого расхода электроэнергии, больших затрат на приобретение и обслуживание оборудования.

Использование озона для обеззараживания производится в очищенную воду. В этом случае озон будет затрачиваться лишь на дезинфекцию. Если после очистки в воде остались не окисленные соединения (органические загрязнения, не окисленное железо, марганец и т. п.), расход озона значительно возрастет. В обработанной озоном воде иногда наблюдается рост бактерий, поскольку разложение фенольных групп, входящих в состав гуминовых веществ, способствует активации микроорганизмов, ранее находящихся в подавленном состоянии. Поэтому остаточный озон не всегда гарантирует высокое качество воды по микробиологическим показателям у потребителя. Кроме этого остаточный озон разрушает металлические трубопроводы, особенно стальные, поэтому перед подачей воды в распределительные сети необходимо некоторое время выдерживать ее в контактных резервуарах для полного разложения озона. Использовать остаточный озон для защиты воды от вторичных загрязнений в трубопроводе в период транспортирования возможно лишь для труб из материалов, стойких к воздействию озона (некоторые пластмассы, асбестоцемент, бетон и т. д.). Поэтому в воду чаще добавляют хлорсодержащие вещества.

Поскольку озон (класс опасности 1) представляет высокую опасность для персонала, в зале озонаторов и в помещениях распределительных камер должна предусматриваться приточно-вытяжная вентиляция как постоянно действующая, так и аварийная на случай превышения допустимой концентрации озона. Вентиляционные системы автоматизируются на тепловой режим и степень загазованности. Вентиляционное оборудование выполняется во взрывобезопасном варианте.

Пролонгированный (консервирующий) эффект обеспечивается только хлорсодержащими веществами.

Хлор является сильнодействующим ядовитым веществом (класс опасности 2), поэтому его использование требует мероприятий повышенной промышленной безопасности, защиты населения и территорий от последствий возникновения возможных аварий и чрезвычайных ситуаций.

В этой связи предприятия водопроводно-канализационного хозяйства применяют альтернативные способы обеззараживания воды с пролонгированным (консервирующим) эффектом.

Хлорсодержащие вещества для обеззараживания воды: гипохлорит натрия (NaClO) химический и электролитический, гипохлорит кальция ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), диоксид хлора (ClO_2).

Химический гипохлорит натрия марки «А» (класс опасности 3) производится с содержанием активного хлора не менее 190 г/л. При транспортировке и хранении из-за нестойкости продукта происходят потери гипохлорита натрия, главным образом по причине превращения его в более стойкое соединение NaCl (соль).

Электролитический гипохлорит натрия марки «Э» (класс опасности 4) производится с содержанием активного хлора 4–8 г/л. В отличие от химического гипохлорита натрия электролитический гипохлорит получают на месте потребления, и его транспортировка и хранение не требуется.

Гипохлорит кальция санитарно-технический марки «А» (класс опасности 3), представляющий собой порошок белого цвета с резким запахом хлора, производится с содержанием активного хлора не менее 45 %. Гипохлорит кальция при контакте с жидкими маслообразными органическими веществами или пылевидными органическими продуктами может вызвать их возгорание.

Диоксид хлора (класс опасности 1) получают на месте потребления реакцией соляной кислоты с хлоритом натрия NaClO_2 . Диоксид хлора более сильный окислитель по сравнению с хлором и может использоваться для удаления запаха, деструкции органических веществ и улучшения вкусовых качеств воды. Однако его использование может привести к образованию побочных продуктов, например хлорита, который является токсичным. Кроме того, стоимость диоксида хлора высока.

Обеззараживание воды ионами тяжелых металлов. Небольшие концентрации ионов тяжелых металлов (серебра, меди, цинка и др.) вызывают гибель находящихся в воде микроорганизмов. Наибольшими бактерицидными свойствами обладает серебро (класс опасности 2). В настоящее время разработаны технологии и устройства для электролитического растворения серебра. Получаемая «серебряная вода» содержит ионы серебра и является эффективным веществом для дезинфекции и консервирования питьевой воды. Но следует учитывать, что серебрение воды, во-первых, дорогой метод обеззараживания, во-вторых, концентрации серебра, которые разрешены действующими нормативами, способны лишь притормозить рост бактерий в воде. Как и большинство тяжелых металлов, серебро медленно выводится из организма и при его постоянном поступлении может накапливаться. При длительном накоплении серебра возможно проявление признаков отравления.

При выборе методов обеззараживания необходим комплексный подход, который позволит достичь требуемого эффекта при оптимальном сочетании эффективности и экономичности дезинфекции воды.

Повышение энергетической эффективности когенерационных установок

За последние десятилетия дефицит энергоресурсов и, как следствие, их дороговизна стали причиной появления различных энергообеспечивающих технологий. В настоящее время для повышения энергетической эффективности систем энергообеспечения широкое применение нашли комбинированные энергетические установки малой мощности.

Когенерационные установки используются в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, жилищно-коммунальном хозяйстве и сфере обслуживания. Их внедрение обусловлено не только очевидными преимуществами по сравнению с отдельным производством электрической и тепловой энергии, но и быстрой окупаемостью [1-3].

На практике не всегда в полной мере удается реализовать преимущества когенерационных технологий, поскольку существуют ряд ограничений, определяемых:

- несоответствием совмещенных графиков тепловой и электрической нагрузки производительности когенерационной установки по обоим видам энергии;
- значительной суточной и сезонной неравномерностью как электрической, так и тепловой нагрузок потребителя;
- понижение энергетической эффективности системы в целом, вследствие возможного снижения доли низкопотенциальной энергии на выходе системы в виде тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение.

Решить задачу повышения энергетической эффективности когенерационных установок (технологий) и конкурентоспособности систем альтернативного теплоснабжения возможно за счет внедрения объединенных систем энергоснабжения, сочетающих когенерационные установки малой мощности и дополнительные источники теплоты, основанные на использовании вторичных энергетических ресурсов, установок трансформации теплоты, возобновляемых источников энергии и перспективных технологий.

Авторами проанализированы принципиальные подходы к построению тепловых схем мультигенерационных установок, что позволило сделать вывод о невозможности универсальных подходов к рассматриваемой проблеме. На этой основе определены критерии оптимизации инженерных решений, имеющие жесткую привязку к конкретным технико-экономическим обстоятельствам реализации проекта.

Литература

1. **Баласанян Г. А., Мазуренко А. С.** Эффективность интегрированных систем энергоснабжения на базе установки когенерации и гелиоколлектора // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2007. – Вып. 2. – с. 164-170.
2. **Басок Б.И., Коломейко Д.А, Базеев Е.Т.** Энергетический анализ когенерационных схем [Электронный ресурс] -Режим доступа: <http://www.turbine-diesel.ru>, свободный.
3. **Гринман М.И., Фомин В.А.** Перспективы применения энергетических установок с низкокипящими рабочими телами [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://esco.co.ua>, свободный.

УДК 621.311

А.А. РОГОВА, научный сотрудник
(ОАО «ВТИ»), г. Москва

Технико-экономическая эффективность тригенерационных установок

В последние годы в нашей стране возрос интерес к созданию высокоэффективных систем генерации энергии различных видов. Разрабатываются основы функционирования тригенерационных установок, позволяющих осуществлять одновременную выработку электрической энергии, теплоты и холода.

Одно из перспективных направлений развития тригенерации связано с применением детандер-генераторных агрегатов (ДГА). ДГА могут устанавливаться на газораспределительных станциях (ГРС), газорегуляторных пунктах (ГРП), компрессорных станциях (КС) и позволяют вырабатывать электрическую энергию за счет использования энергии потока транспортируемого природного газа. Применение теплонасосных установок (ТНУ) совместно с ДГА позволяет создавать тригенерационные установки.

На рис. 1 представлена принципиальная схема тригенерационной установки, позволяющей генерировать электроэнергию, теплоту и холод.

По условиям работы детандера природный газ предварительно подогревается в теплообменном аппарате 4, затем он расширяется в детандере 5 и направляется далее в трубопровод низкого давления 3. Механическая энергия вращения ротора детандера превращается в электрическую в электрогенераторе 7. Часть электроэнергии, выработанной ДГА, направляется на привод компрессора теплонасосной установки 6, которая одновременно генерирует теплоту и холод для потребителя. Оставшаяся часть электроэнергии направляется потребителю.

Источники теплоты для подогрева газа перед детандером в теплообменнике 4 могут быть различными. В настоящей работе рассматривались следующие источники: вариант 1 – покупная теплота стороннего источника; вариант 2 – автономный котел; вариант 3 – дымовые газы

ГТУ; вариант 4 – ТНУ. Для генерации теплоты и холода была выбрана парокompрессионная ТНУ.

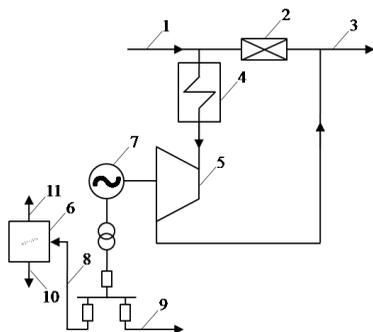


Рис. 1. Принципиальная схема тригенерационной установки:

1 – газопровод высокого давления; 2 – дросселирующее устройство; 3 – газопровод низкого давления; 4 – теплообменный аппарат подогрева газа перед детандером; 5 – детандер; 6 – ТНУ; 7 – электрогенератор; 8 – часть электроэнергии, направляемая на привод компрессора ТНУ; 9 – часть электроэнергии, направляемая потребителю; 10 – холод для потребителя; 11 – теплота для потребителя

Для всех четырех вариантов тригенерационных установок была произведена оценка технико-экономических показателей, позволяющая судить об инвестиционной привлекательности проектов. Результаты расчетов технико-экономических показателей представлены в таблице.

Таблица 1. **Технико-экономические показатели проектов тригенерационных установок**

Показатель	Ед. изм.	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4
Установленная электрическая мощность	МВт	15,44	15,44	23,70	14,58
Тепловая мощность	кВт	10	10	10	10
Холодильная мощность	кВт	5	5	5	5
Число часов использования установленной мощности	час/год	8000	8000	8000	8000
Капитальные вложения	млн. руб.	476,72	496,24	720,00	481,19
Чистый дисконтированный доход	млн. руб.	-141,40	1 114,98	1 773,80	1 023,67
Внутренняя норма доходности	%	0,0	30,985	32,9817	29,790
Индекс прибыльности	-	0,937	2,142	2,235	2,077
Дисконтированный срок окупаемости	лет	>18	5,834	5,531	6,051

Результаты расчетов показывают, что вариант 1 тригенерационной установки с подогревом газа перед детандером за счет покупной теплоты

стороннего источника экономически не привлекателен. Срок окупаемости данного проекта превышает его жизненный цикл, а индекс прибыльности ниже единицы.

Варианты 2 – 4 проектов тригенерационных установок имеют сроки окупаемости от 5,5 до 6 лет. Индексы прибыльности проектов составляют 2,077–2,235, а, как известно, к инвестированию принимаются проекты с индексом прибыльности более 1.

Наилучшими финансово-экономическими показателями характеризуется проект тригенерационной установки с подогревом газа перед детандером уходящими газами ГТУ (вариант 3). Срок окупаемости составляет 5,5 лет, а внутренняя норма доходности – почти 33 %. Чистый дисконтированный доход составляет 1 773,80 млн. рублей. Преимущества данного варианта заключаются в большей установленной электрической мощности установки и, соответственно, большей прибыли от продажи электроэнергии. Однако данный вариант характеризуется наибольшим потреблением топлива.

В целом варианты 2–4 тригенерационных установок характеризуются высокими финансово-экономическими показателями, что говорит об инвестиционной привлекательности этих проектов. Выбор источника теплоты для подогрева газа перед детандером оказывает влияние на электрическую мощность установки и потребление топлива установкой. Определенными перспективами обладает проект по варианту 4 – с подогревом газа от ТНУ – в силу того, что установка не требует затрат топлива для обеспечения своей работоспособности и обладает высокими экологическими показателями.

Литература

1. **В.С. Агабабов, А.В. Корягин.** Бестопливные детандер-генераторные установки: учебн. пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

УДК 621.321

А.Т. СЕВАЛЬНЕВ, к.э.н., доцент,
Е.Г. АВДЮНИН, д.т.н., профессор,
Д.В. КАДУЙСКИЙ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Обоснование актуальности разработки и установки мобильных ГТЭС

По данным ОАО «СО ЕЭС» потребление электроэнергии в России первым полугодии 2010 года составило 505,8 млрд. кВт·ч. Этот показатель выше аналогичного за первое полугодие 2009 года на 5 процентов.

Главной проблемой энергосистем России является перегруженность узловых подстанций и электрических сетей. В этом аспекте частично решить проблему могли бы мобильные электростанции используемые в качестве временного источника дополнительной мощности.

В московском регионе наиболее загружены подстанции по западному и юго-западному направлениям. Работа мобильных ГТЭС на четырех самых перегруженных подстанциях Москвы и Московской области в осенне-зимние периоды позволяет сдерживать объемы ограничений электроснабжения в пиковое время и избегать аварийных ситуаций.

Режим эксплуатации МГТЭС подразумевает их работу в пиковые часы энергопотребления утром и вечером, при этом мобильные ГТЭС используются только в аварийной ситуации или при угрозе ее возникновения.

Мобильные ГТЭС находят широкое применение во всем мире. Самые передовые энергомашиностроительные корпорации мира - GeneralElectric, Rolls-Royce и Pratt&Whitney - постоянно осуществляют разработку и строительство таких электростанций.

Оборудование ГТЭС установлено и успешно функционирует более чем в сорока странах мира, в том числе в Канаде, Бразилии, США, Германии, Великобритании, Израиле и в других странах.

МГТЭС основаны на использовании газотурбинных установок (ГТУ), устройство которых показано на рис.1. Каждая газотурбинная установка состоит из газовой турбины, генератора, трансформатора, системы очистки выбросов и пульта управления. Все оборудование установлено на передвижных платформах, а платформы - на специальных бетонных площадках. Такая конструкция позволяет перемещать установки с одной подстанции на другую, оперативно реагируя на возникающий дефицит электроэнергии. Установки спроектированы для работы на авиационном топливе.

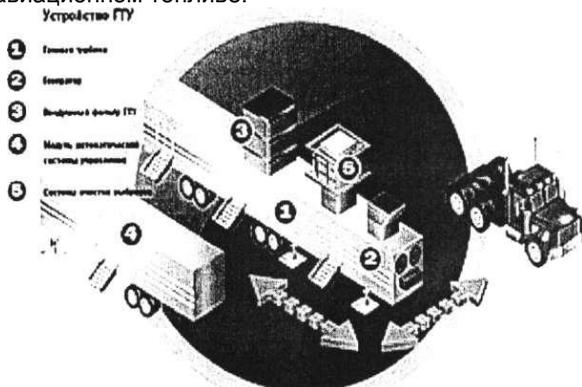


Рис.1 . Устройство газотурбинной установки

Мобильная электростанция оборудована пультом автоматизированного управления. С него непрерывно ведется контроль всех параметров, как технических, так и экологических. Все показания выводятся на мониторы.

Мобильная ГТЭС (MP-25 MOBILEPAC™) предназначена для обеспечения устойчивой работы энергосистемы в часы максимумов нагрузки путем выработки электрической мощности из энергии горячих газов, полученных при сжигании жидкого топлива (керосин) и выдачи ее в сети ЕЭС.

Газотурбинная установка (ГТЭС) серии FT8-3, входящая в состав мобильной установки (Mobile Pac) MP25, состоит из газогенератора GG8-3 и силовой турбины (СТ) PT8.

Газогенератор подает газ на силовую турбину, где он, расширяясь, совершает полезную работу, и через гибкую муфту турбина приводит во вращение электрогенератор фирмы Brush (BDAX62.170ER).

В основе газогенератора GG8 лежит двигатель JT8D-219 производства Pratt & Whitney. Он представляет собой двухвальный газотурбинный двигатель, состоящий из двух компрессорных модулей: компрессора низкого давления и компрессора высокого давления, камеры сгорания и двух турбинных модулей: турбины высокого давления и турбины низкого давления (рис.2).

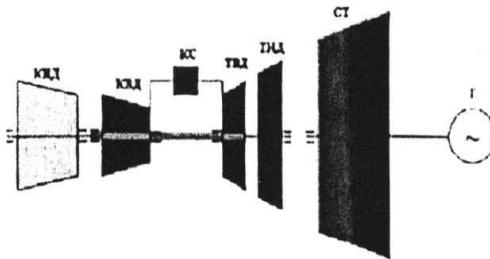


Рис. 2.. Схема газотурбинной установки

Газотурбинная установка работает по открытому циклу при гарантированных стандартных условиях: температуре атмосферного воздуха до -15°C , относительной влажности атмосферного воздуха 60%, падении давления на входе в компрессор низкого давления 63,5 мм вод.ст., падении давления на выходе из ГТЭС 25,4 мм вод.ст., частоте генератора 50 Гц, коэффициент мощности 0,8, работа на жидком топливе с низшей теплотой сгорания 10200,0 ккал/кг.

Гарантированные технические показатели на базовой нагрузке составляют: выходная электрическая мощность 22,486 МВт, электрический КПД "нетто" 36%, удельный расход тепла 2362,2 ккал/ кВт.ч.

Мобильная газотурбинная электростанция представляет собой современный высокотехнологичный комплекс с параметрами, недостижимыми сейчас при использовании традиционных способов выработки электроэнергии. Как результат совершенства конструктивных и технических решений, заложенных при создании установки, а также, проведения специальных экологических мероприятий станция полностью

удовлетворяет всем самым строгим экологическим и санитарным нормам. ГТЭС MOBILEPAC™ состоит из четырех модулей: силовой модуль (газотурбинная установка), модуль системы автоматического управления, модуль повышающего трансформатора 10/110 кВ и модуль общеподстанционного пульта управления.

В силовом модуле размещены: газогенератор, силовая турбина и электрогенератор. Кроме того, на силовой модуль монтируются воздушный фильтр и глушитель выхлопа высотой 6м. Газогенератор предназначен для создания высокопотенциального потока газов перед силовой турбиной, которая размещена на одном валу с генератором.

Газогенератор FT8-3 разработан на основе авиационного двигателя JT8, который был подвергнут серьезной модификации в связи с изменением сферы применения. ГТЭС является энергетической турбиной.

Наземный резервуар с топливом располагается на безопасном расстоянии от жилых и общественных зданий, линий электропередач и силовых трансформаторов. Трансформаторы, в свою очередь, дополнительно огорожены противопожарной стеной. Для системы хранения и подачи топлива предусмотрены противопожарные мероприятия. Она оборудована подъездной дорогой до хранилища топлива. Все проекты размещения мобильных ГТЭС соответствуют государственным санитарно - эпидемиологическим нормам и правилам.

Был проведен расчет по полям температур на выходе из трубы. Максимальная температура уходящих газов на срезе глушителя составит 360°С при температуре воздуха 0°С. При скорости ветра 1 м/с температура уходящих газов на расстоянии 20 м от среза глушителя - 240°С, при этом температурное поле выхлопа направлено вертикально вверх. При скорости 20 м/с на расстоянии 5 м от глушителя температура составит 80°-120°С. В соответствии с этим, в зимний период, полностью отсутствует вероятность создания парникового эффекта в районе подстанции и образования наледи на проводах и на трансформаторах.

Топливо для реактивных двигателей являются малоопасными по ГОСТ 10227-86*. Концентрация вредных веществ в его продуктах сгорания значительно ниже, чем в продуктах сгорания других видов топлива. Нижний предел взрываемости топлива ТС-1 и РТ составляет 1,5% (объемных). Концентрация паров керосина составит 0,05 долей ПДК, что меньше предела взрываемости.

Станции оснащены современными системами контроля параметров, эффективной автоматической системой пожарной безопасности. Установки смонтированы в шумопоглощающем укрытии и оборудованы системой шумогашения.

Эффективность их применения обусловлена повышением КПД использования топлива, снижением ущерба от перегрузок и отказов в дефицитных ЭСО, куда оперативно, в часы максимальных нагрузок, можно перебросить дополнительные мощности мобильных ГТЭС.

Литература

1. <http://www.mobilegtes.ru/about-mobile-gtes>
2. Батенин В.М., Масленников В.М. О стратегии развития энергетики России // Газотурбинные технологии, 1999. ШЛЗ. С. 14-20.

УДК 621.321

В.П. СОЗИНОВ, д.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

Регулируемые системы аспирации с магистральным коллектором

Системы аспирации служат для поддержания чистоты воздуха в производственных помещениях и поэтому относятся к вентиляционным техническим средствам. Их задачей является улавливание отходов производства в виде пыли и более крупных частиц из зоны образования и перемещения по трубопроводной сети за пределы помещения в зону складирования или переработки.

Системы с магистральными коллекторами обычно применяются в производственных помещениях большой протяженности и значительным количеством источников выделения отходов. Они имеют определенные преимущества по сравнению с другими системами. Основным достоинством является то, что при необходимости можно наращивать их производительность. Это происходит за счёт присоединения дополнительной секции магистрального коллектора (рис.), удлинения транспортной ленты и установки дополнительного вентилятора отбора воздуха.

Первая система, показанная на рисунке, применяется для удаления от технологического оборудования пыли, стружки, обрезки, например в деревообрабатывающей промышленности. Вторая система, имеющая воздухопроницаемую транспортную ленту, может применяться в случаях удаления от технологического оборудования волокнистых отходов, которые обладают большой парусностью. Очистка ленты также происходит в конце коллектора, но не за счет ссыпания отходов в приемное отверстие транспортного трубопровода, а за счет обратной продувки ленты воздухом, забираемым из помещения. Работают системы следующим образом.

Когда включены оба вентилятора и механизм движения транспортной ленты, начинается эксплуатация технологического оборудования и отходы от технологического оборудования вместе с воздухом поступают во всасывающие ответвления. В коллекторе эта смесь разделяется. Крупные отходы попадают на транспортную ленту и перемещаются по ней в сторону транспортного трубопровода, а пылеобразные частицы направляются в трубопровод отбора воздуха. Этот воздушный поток по необходимости можно либо направить в окружающую среду либо, до-

полнительно очистив, вернуть в производственное помещение. Последнее может быть экономически оправдано, поскольку в холодный период года количество тепловой энергии, расходуемой на подогрев приточного воздуха в помещении, может быть сокращено. Основное количество отходов поступает через транспортный трубопровод в воздухоочиститель. Разделение потоков в коллекторе на транспортный и отбираемый дает возможность более качественно и с наименьшими затратами очистить воздух, удаляемый из производственного помещения.

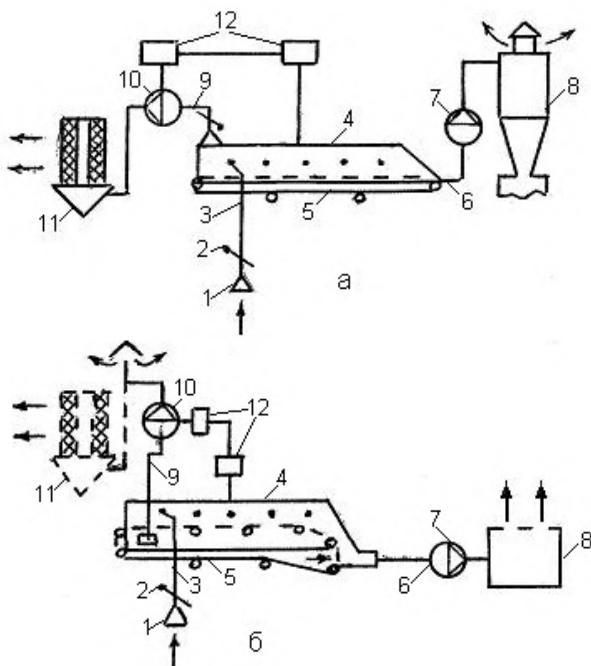


Рис. Схемы регулируемых систем аспирации с магистральным коллектором:
 а – система с воздухонепроницаемой транспортной лентой; б – система с воздухопроницаемой транспортной лентой;
 1 – приемник вредности; 2 – отсечной клапан;
 3 – всасывающее ответвление; 4 – магистральный коллектор; 5 – транспортная лента; 6 – транспортный трубопровод; 7 – транспортный вентилятор;
 8 – воздухоочиститель; 9 – трубопровод отбора воздуха; 10 – вентилятор отбора воздуха; 11 – фильтр тонкой очистки воздуха; 12 – датчик давления и управляющее устройство (начало)

Если количество источников выделения отходов уменьшилось, то соответствующие всасывающие ответвления перекрываются отсечными клапанами. Это приводит к повышению разрежения в коллекторе и датчик давления даёт сигнал к включению управляющего устройства вентилятора отбора воздуха. Последнее снижает скорость вращения рабочего колеса вентилятора настолько, чтобы разрежение в коллекторе восстановилось. Таким образом поддерживается необходимое разрежение в коллекторе при использовании меняющегося количества всасывающих ответвлений. В результате из помещения удаляется только минимально необходимое количество воздуха, требующегося для аспирации технологического оборудования. В среднем эта величина составит

$$V = K_{\text{одн}} \cdot U_{\text{ср.и}} \cdot \sum_1^{\text{max}} F_i + V_{\delta},$$

где $K_{\text{одн}}$ – коэффициент одновременности использования всасывающих ответвлений; $U_{\text{ср.и}}$ – средняя скорость во всасывающих ответвлениях, м/с; $\sum_1^{\text{max}} F_i$ – суммарная площадь сечения всех всасывающих ответвлений, м^2 ; V_{δ} – количество воздуха, расходуемое на регенерацию транспортной ленты, $\text{м}^3/\text{с}$.

Экономическая эффективность данных систем складывается из снижения потребления электроэнергии приводом вентилятора отбора воздуха и затрат энергии на подачу в помещение и подогрев приточного воздуха. Экономия будет увеличиваться с уменьшением коэффициента одновременности использования всасывающих ответвлений.

Литература

1. **Созинов В.П.** Аспирация в АПК. Учеб. пособие. – Иваново: НПЦ "СТИМУЛ", 1996. – 424 с.

Особенности теплообмена в строительных конструкциях при высоких температурах

Ограждающие конструкции поглощают часть тепловой энергии, которая выделяется внутри помещения в результате горения горючих материалов. Исходя из этого очевидного факта, можно написать следующую формулу для суммарного теплового потока в ограждения:

$$Q_W = \varphi Q_{т\text{в}}, \quad (1)$$

где $Q_{т\text{в}} = \eta \psi$ – выделяющаяся в единицу времени тепловая энергия, Вт; φ – коэффициент теплопоглощения; Q_W – суммарный тепловой поток в ограждения, Вт, т. е.

$$Q_W = Q_{н0} + Q_{т0} + Q_{т\text{в}}. \quad (2)$$

Исследования показали, что коэффициент φ , не является «универсальной» константой». Его значение зависит от большого числа параметров (размеров помещения, количества горючего материала, свойств ограждений и др.) и, кроме того, изменяется во времени по мере развития пожара. Чтобы установить вид этой функции, необходимо знать зависимость от времени развития пожара теплового потока Q_W и скорости тепловыделения $Q_{\text{пож}}$. Их можно установить с помощью теории теплообмена и горения.

Экспериментальные исследования пожаров и их различных Q_t^p стадий развития показали, что доля поглощенного конструкциями тепла от выделяемого может составлять от 0,2 до 0,75.

При приближенных оценках используют допущения о постоянстве величины φ . Такое допущение приемлемо, если рассматривается достаточно малый интервал времени развития пожара. Например, в рекомендациях принималось, что $\varphi = 0,6$.

Методы расчета тепловых потоков в ограждающие конструкции можно разделить на две группы – эмпирические и полуэмпирические.

При пожаре имеет место сложный радиационно-конвективный теплообмен на поверхностях ограждений. Полуэмпирические формулы получены с помощью теории пограничного слоя. Для развитой стадии пожара они были получены доктором технических наук И. С. Молчадским методом, который основывается на использовании интегральных уравнений пограничного слоя. Формулы для расчета средних коэффициентов теплоотдачи имеют следующий вид:

- для вертикальных поверхностей высотой H :

$$\alpha_{\text{ст}} = 0,2 \frac{\lambda}{H} (\text{GrPr})^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\text{Pr}^{\frac{2}{3}}}{2,14(1+N) + \text{Pr}^{\frac{2}{3}}} \right]^{\frac{1}{3}} (1+N); \quad (3)$$

- для горизонтальных поверхностей (потолок, пол):

$$\alpha_{\text{пот}} = 1,4 \frac{\lambda}{r} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \sqrt{\text{Re}} + 13,3 \frac{\delta_0 T_W^3}{\text{Bu}}; \quad (4)$$

$$\alpha_{\text{пол}} = 0,7 \alpha_{\text{ст}}, \quad (5)$$

где T_W – температура поверхности ограждения; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля; N – аналог числа Кирпичева, характеризующего соотношение радиационного и кондуктивного тепловых потоков; Bu – аналог числа Бугера; Re – число Рейнольдса; λ – коэффициент теплопроводности; δ_0 – характерный размер.

Для того, чтобы определить с помощью формул (1–3) тепловой поток в ограждающую конструкцию, необходимо знать температуру поверхности ограждающей конструкции T_W , которую можно определить путем решения дифференциального уравнения теплопроводности. Она зависит не только от условий теплоотдачи, но и от толщины и теплофизических свойств материала конструкции. Общий поток тепла Q_W получают суммированием потоков во все конструкции.

Следует отметить, что температура среды в помещении заранее неизвестна. Следовательно, задача о нагревании ограждения должна решаться совместно с основной системой дифференциальных уравнений математической модели.

Применение эмпирических формул ограничивается условиями, в которых проводились исследования теплообмена (вид и количество горючего материала, число и размеры проемов, свойства материала ограждений, размеры помещений и др.).

Первую группу таких формул представляют зависимости, полученные на основании результатов исследований Ю.А. Кошмарова и М.П. Башкирцева:

$$Q_W = a_2 F \left[a(T_m - T_0) - b_1(T_m - T_0)^2 \right] \exp \left[n(T_m - T_0) \right],$$

где $a = 0,8 \text{ K}^{-1}$, $b_1 = 0,00065 \text{ K}^{-2}$, $n = 0,0023 \text{ K}^{-1}$ (эмпирические коэффициенты); $\alpha_1 = 4,07 \text{ Вт/м}^2$; $\alpha_2 = 11,6 \text{ Вт/м}^2$ (коэффициенты теплообмена); F – суммарная площадь ограждений, м^2 ; T_m – средняя температура газовой среды; T_0 – начальная температура среды; Q_W – тепловой поток в ограждения, Вт .

Вторая группа эмпирических зависимостей для расчета тепловых потоков в ограждения была получена И. С. Молчадским. Эти формулы позволяют вычислить тепловые потоки, направленные в вертикальные стены, потолок (перекрытие) и пол. Общий тепловой поток есть сумма потоков в стены, потолок и пол, т. е.

$$Q_W = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{пол}}$$

Значения приведенных коэффициентов теплоотдачи вычисляются по эмпирическим формулам:

$$\alpha_{\text{ст}} = 0,0159 \times G^{0,222}$$

$$\alpha_{\text{пот}} = \frac{0,0172 \cdot G^{0,222}}{1 - 0,127 \cdot G^5 e^{-1,6G}}$$

$$\alpha_{\text{пол}} = 0,0111 \cdot G,$$

где G – количество (масса) горючего материала, приходящегося на 1 м^2 суммарной площади поверхностей всех ограждающих конструкций. Исследования проводились в помещениях объемом от 60 до 200 м^3 с ограждениями из бетона и кирпича. В опытах сжигалась древесина ($G = 0,8411 \text{ кг/м}^2$).

Третью группу эмпирических формул представляют зависимости тепловых потоков от времени:

$$Q_i = F_i q_i \left[37 \left(\frac{T}{T_i} \right)^{3,6} \exp(-3,6 \left(\frac{T}{T_i} \right)) \right],$$

где F_i – площади стен, потолка и пола соответственно, м^2 .

В первый момент времени поступление тепла в ограждения происходит главным образом за счет лучеиспускания от пламени. Поток лучистой энергии по мере задымления помещения постепенно уменьшается. При сильном задымлении излучение от пламени рассеивается в задымленной среде, заполняющей помещение.

Коэффициент задымления в начальные моменты времени, равен единице. При сильном задымлении, этот коэффициент равен нулю.

$$\omega = 1 - \frac{T_m - T_0}{T_{\text{кр}} - T_0}$$

Для расчета суммарного теплового потока в ограждения при начальной стадии пожара нужно использовать формулу

$$Q_W = Q_W^* + Q_W^{\text{RAD}} = F_W q_0 \left[a(T_m - T_0) - b_1(T_m - T_0) \right]^{\frac{4}{3}} + C \varepsilon \left(\frac{T_{\text{пл}}}{100} \right) \omega F_{\text{RAD}}$$

Значения ϕ следует вычислять для каждого момента времени в начальной стадии пожара (т. е. при $0 < T < \tau_{\text{кр}}^T$) по формуле

$$\phi = (1 - \phi)^{\frac{2}{3}} \Gamma \cdot \Phi + \Delta_{\text{RAD}}, \quad (4)$$

Решение уравнения (4) получены численным методом, которым определены средние коэффициенты теплопотерь для пожаров в различных по форме и размерам помещениях при круговом и линейном распространении пламени по слою твердого горючего материала (см. рис.1).

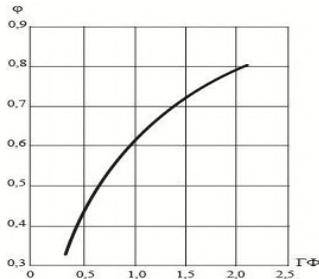


Рис 1. Зависимость среднего коэффициента теплопотерь от параметра $\Gamma \cdot \Phi$ при круговом распространении пламени.

УДК 621.321

М.М. ОЛЕШКЕВИЧ, к.т.н., доцент
А.С. РУДЕНЯ, аспирант
(БНТУ), г. Минск

Установка альтернативных источников электроэнергии в Республике Беларусь

Согласно отчету нефтяной компании British Petroleum, извлекаемые запасы нефти составили 1,653 млрд. баррелей. При текущем уровне потребления доказанных запасов в мире хватит на 54 года при сохранении нынешнего объема добычи. Что касается газа, то его извлекаемые запасы составляют 208,4 трлн. кубометров, которых должно хватить на 64 года. Исходя из выше изложенных данных, можно сделать вывод, что в ближайшее время энергосистема столкнется с трудностями. Поэтому пора задуматься о решении этой проблемы. Одним из способов решения этой проблемы являются использование нетрадиционных источников электроэнергии.

В мире все больше набирают популярность такие нетрадиционные источники как ветроэнергетика, солнечная энергетика, биоэнергетика, геотермальная энергия, энергия океанов, гидроэнергетика, энергия водорода.

Поскольку характеристики ветра внутри континента отличаются от характеристик ветра прибрежных зон и вблизи побережья, характеристики соответствующих ВЭУ (начальная скорость вращения, скорость достижения номинальной мощности и др.) также разнятся. Так, хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации ВЭУ внутриконтинентального базирования ряда немецких фирм начинают работу со скоростей ветра 3,0-4,0 м/с и достигают номинальной мощности при скоростях 10-13 м/с.

Следовательно, освоение ветроэнергетики в Беларуси необходимо вести, ориентируясь на ВЭУ зарубежного производства внутриконтинентального базирования. Карта зонального распределения среднегодовых фоновых скоростей ветра в Беларуси приведена на рис. 1.

Взяв усредненные значения для Республики Беларусь, был произведен расчет срока окупаемости ветроустановок и солнечных батарей по формуле [1], полученный результат приведен в таблице [1].

$$T = \frac{C_K}{C_A \cdot 8760 \cdot k_i \cdot (1-z)} \quad (1)$$

где C_K – капитальные удельные затраты, долл./кВт, C_A – тариф на электроэнергию, Z – годовые эксплуатационные затраты, K_i – коэффициент использования номинальной мощности установки.

Таблица 1. **Срок окупаемости ветроустановок и солнечных батарей в РБ**

Название	Срок окупаемости (лет)	Капитальные удельные затраты, долл./кВт
Ветроэнергетика	Менее 8 лет	900...1300
Солнечная энергия	23-29	2000...2500

Сроки окупаемости капитальных вложений в ветротехнику сопоставимы со сроками окупаемости малых гидроэлектростанций, парогазовых и газо-мазутных электростанций и значительно ниже данных сроков для угольных, атомных и дизельных электростанций. По завершении срока окупаемости затраты на эксплуатацию ВЭУ неизмеримо ниже аналогичных затрат для электростанций, работающих на жидком, газообразном, твердом и ядерном топливе, т.к. не нуждаются в поставках ископаемых источников энергии. Следует учитывать, что ветроэнергетическая отрасль за счет каждой ВЭУ начинает вырабатывать энергию немедленно после монтажа и при этом не требует гигантских единовременных капитальных вложений, также как и концентрированных вложений при заменах по завершении сроков эксплуатации каждой отдельной ВЭУ.

Сроки окупаемости электростанций на солнечной энергии выше, но не надо забывать, что получение энергии от альтернативных источников позволит меньше влиять на экологию, а также получать бесплатное сырьё для выработки электричества.

Литература

1. **Олешкевич М.М.** Нетрадиционные источники энергии: Учебно-методическое пособие для студентов высших учебных заведений специальности 1 43 01 03 «Электроснабжение»– Мн.: БНТУ 2007.-157 с.

УДК 621.321

В.Д. БУРОВ, к.т.н., доцент,
А.А. ДУДОЛИН, к.т.н., доцент,
Е.Н. ОЛЕЙНИКОВА, магистр
(ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»), г. Москва

Исследование парокомпрессионной ТНУ на различных хладагентах в составе ПГУ-ТЭЦ

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 г. [1] одним из приоритетных направлений энергетической политики является внедрение энергосберегающих технологий на ТЭС. В этой связи становится актуальным вопрос внедрения теплонасосных установок (ТНУ) на энергетических объектах. Ввиду принятого курса развития отрасли, целесообразно рассматривать перспективу внедрения ТНУ на ПГУ-ТЭЦ как способа усовершенствования комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, направленного на снижение топливных издержек. Однако эффективность использования ТНУ напрямую зависит в том числе и от рабочего тела (хладагента), применяемого в рабочем цикле теплового насоса. Так, например, в случае использования ТНУ для выработки дополнительной тепловой мощности на ПГУ-ТЭЦ по тепловому графику потребителя, необходимо использовать хладагент с сравнительно высокой температурой конденсации, а также обеспечивающий такой коэффициент преобразования, при котором не будет происходить потеря экономичности работы энергообъекта ввиду затрат на привод компрессора ТНУ. Фреоны являются традиционными хладагентами, однако ряд из них выведен из использования, является временными альтернативными вариантами либо недостаточно исследованы (синтетические хладагенты и смеси). Актуальными рабочими веществами являются природные хладагенты: аммиак, диоксид углерода, углеродосодержащие вещества, обладающие рядом преимуществ и недостатков [2].

В работе рассмотрено влияние типа хладагента ТНУ для тепловой схемы ПГУ-110Т на базе газовой турбины General electric MS6FA. Моделирование ПГУ-110Т с парокомпрессионной ТНУ выполнено в программном комплексе Thermoflex разработки компании Thermoflow. ТНУ использует низкопотенциальную теплоту циркуляционной воды конденсатора паровой турбины для выработки дополнительной тепловой мощности от энергоблока. Расчеты выполнены для климатических условий Сибирского федерального округа с графиком теплового потребителя 120/70 °С в трех режимах работы:

Режим 1: горячего водоснабжения (ГВС) : температура наружного воздуха +15 °С.

Режим 2: при среднеотопительной температуре -8,4 °С.

Режим 3: при температуре наиболее холодной пятидневки -37 °С.

Исследования приведены применительно к хладагентам: R12; R22, R134A, R152A, аммиак (NH₃), пропан, бутан.

На рис. 1 приведены результаты расчета относительных показателей работы энергоблока и ТНУ в режиме ГВС (режим 1).

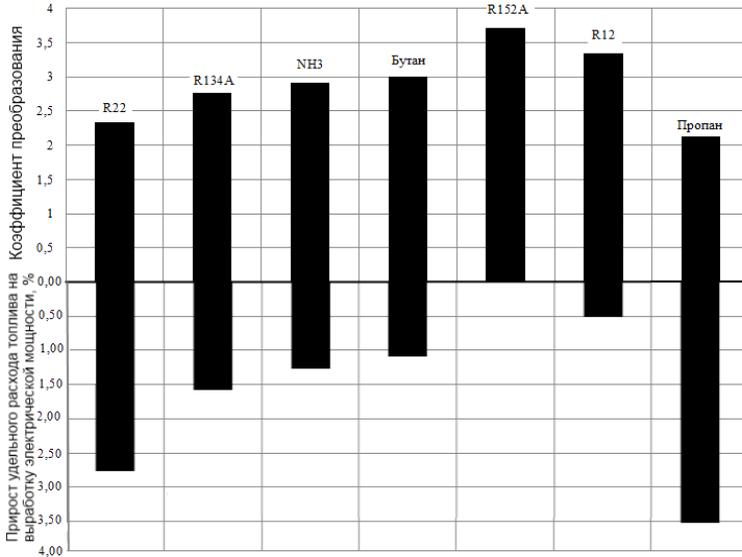


Рис. 1. Зависимости коэффициента преобразования ТНУ и прироста удельного расхода топлива на отпуск 1 кВт электрической мощности от типа хладагента

На приведенных гистограммах показан прирост удельного расхода топлива на выработку электрической мощности относительно базового варианта- ПГУ с ТНУ на R152. Из полученных данных видно, что в режиме ГВС минимальный прирост удельного расхода топлива по отпуску электроэнергии соответствует ТНУ на R152A, что обусловлено наибольшим коэффициентом преобразования.

На рис. 2 приведены результаты расчета относительных показателей работы энергоблока и ТНУ в режиме при среднеотопительной температуре окружающей среды (режим 2). Из приведенных данных видно, что в данном режиме минимальный прирост удельного расхода топлива по отпуску электроэнергии соответствует ТНУ на R152A, что обусловлено наибольшим коэффициентом преобразования. При этом ТНУ на хладагентах R22 и пропан в данном режиме не рассчитаны, так как не обеспечивается требуемая температура конденсации.

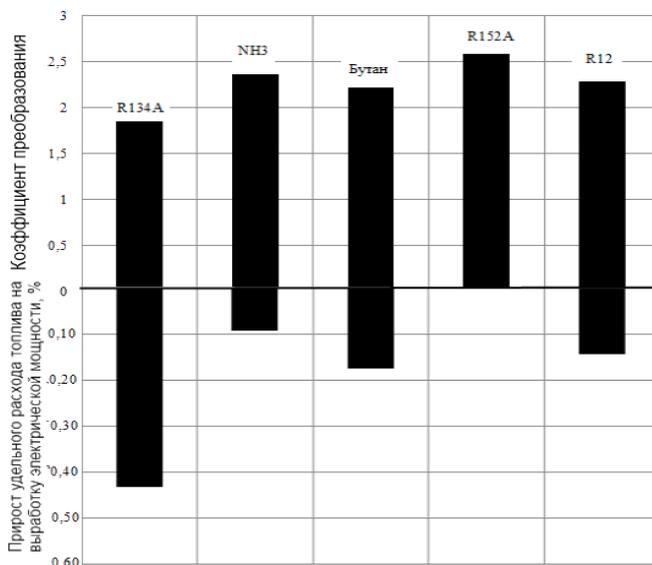


Рис. 2. Зависимости коэффициента преобразования ТНУ и прироста удельного расхода топлива на отпуск 1 кВт электрической мощности от типа хладагента

В режиме 3 рассчитаны ПГУ с ТНУ на бутане и аммиаке, так как остальные хладагенты не обеспечивают требуемую температуру конденсации ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$). В данном режиме минимальный прирост удельного расхода топлива по отпуску электроэнергии соответствует ТНУ на аммиаке, что обусловлено наибольшим коэффициентом (1,675) преобразования в сравнении с ТНУ на бутане (1,229).

Таким образом, минимальный удельный расход топлива в режимах ГВС и при среднетеплотельной температуре соответствует ТНУ на фреонах, в режимах при более низких температурах – на природных хладагентах. Дальнейшие исследования должны заключаться в исследовании ТНУ в годовом разрезе для конкретного региона и энергообъекта. Окончательный вывод об эффективности использования определенного типа хладагента должен быть сделан после расчета среднеинтегральных годовых и технико-экономических исследований системы ПГУ-ТЭЦ с ТНУ.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года.
2. Исследование влияния типа хладагента ТНУ при использовании на ТЭС / Олейникова Е.Н., Бузов В.Д., Дудолин А.А. // Материалы VII научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования - 2012». – СПб, 2012. С.519 – 529.

Применение фреоновых термотрансформаторов в составе комбинированного теплоснабжения от ТЭЦ с ГСП

Теплофикация в стране приобрела масштабность и большое социальное значение, поскольку надежно обеспечивает теплом практически всех средних и крупных энергопотребителей, занимает существенную долю в общей структуре энергогенерирующих мощностей и, заменяя многочисленные мелкие котельные, способствует улучшению экологической обстановки.

Перспективным направлением развития теплоснабжения является создание комбинированных систем на базе ТЭЦ с термотрансформаторами [1].

На рис. 1 приведена принципиальная тепловая схема парогазового теплофикационного энергоблока ТЭЦ в системе комбинированного теплоснабжения с газосетевым подогревателем (ГСП) и фреоновыми термотрансформаторами (ФТТ) [2]. По этой схеме в течение всего года сетевая вода параллельно подогревается до 70 °С уходящими из газовой турбины (4) газами в ГСП (6) и паром из теплофикационного отбора турбины в традиционном сетевом подогревателе (СП) (7). К фреоновым термотрансформаторам (8), осуществляющим качественное регулирование при теплоснабжении внутриквартальных теплопотребителей (Q), сетевая вода подводится из тепловых центров.

На рис. 2 показаны оптимальные и стандартные значения давления и температуры острого пара и температуры питательной воды.

Оптимальное давление острого пара сопоставимо с давлением, принятым для стандартных энергоблоков соответствующих типоразмеров, т.е. находится на уровне 13 МПа и увеличивается до 28 МПа с ростом мощности энергоблока. Из рис. 2 так же видно, что при разработке специальных (оптимальных) энергоблоков температура острого пара (начальная температура) для энергоблоков без промперегрева, так и при введении промперегрева должна приниматься на уровне 540 °С, температура питательной воды для блоков без промперегрева и докритических параметров принимается на уровне 160-200 °С, что ниже стандартных значений на 40-70 °С, а с введением промперегрева и переходом на закритические параметры принимается на уровне 280-300 °С, что выше традиционной температуры питательной воды на 40-60 °С. Для обеспечения такой температуры питательной воды требуется установка четырех ПВД (подогреватель высокого давления) вместо трех, а паровая турбина должна иметь еще один отбор высокого давления.

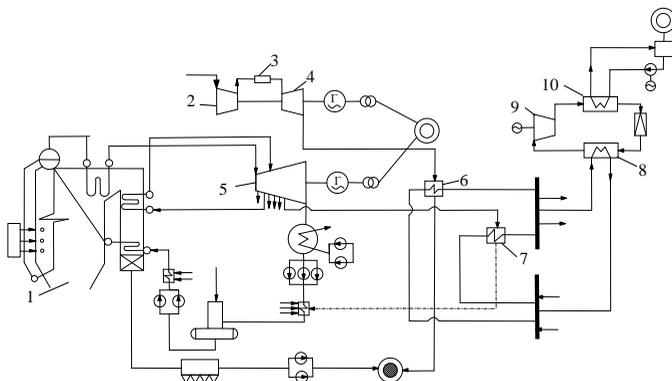


Рис 1. Технологическая схема энергоблока ТЭЦ в системе комбинированного теплоснабжения с ГСП и внутриквартальными ФТТ: 1-паровой котел; 2-компрессор газотурбинной установки; 3-камера сгорания; 4-газовая турбина; 5-паровая турбина; 6-газосетевой подогреватель; 7-традиционный сетевой подогреватель; 8-испаритель; 9-компрессор; 10-конденсатор

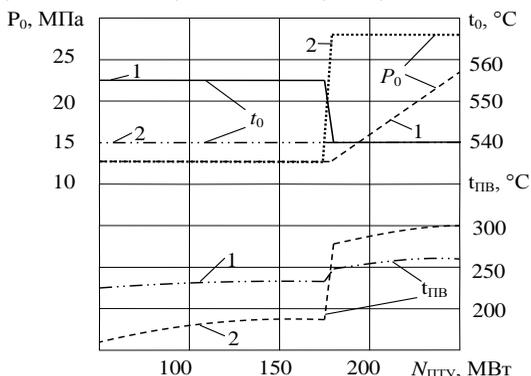


Рис. 2. Параметры острого пара (P_0 , t_0) и температура питательной воды $t_{ПВ}$ энергоблоков ТЭЦ-МТ-ТТ: 1-стандартные параметры; 2-оптимальные параметры

Технико-экономическая эффективность представляет собой отношение полученных от продаж сумм за отпущенную энергопродукцию к полным затратам за тот же период (1).

$$\eta_Z = \frac{\sum_{\tau} C_N N + \sum_{\tau} C_E E_6}{\sum_{\tau} \lambda_4 N + \sum_{\tau} \lambda_6 E_6} \quad (1)$$

где C_N ; C_E – получаемая плата за электроэнергию и теплоэнергию в данном τ -м году, руб./($\text{kВт} \cdot \text{ч}$); N ; E_6 - отпущенные в τ -м году потребителю электроэнергия и теплоэнергия, $\text{kВт} \cdot \text{ч/г}$.

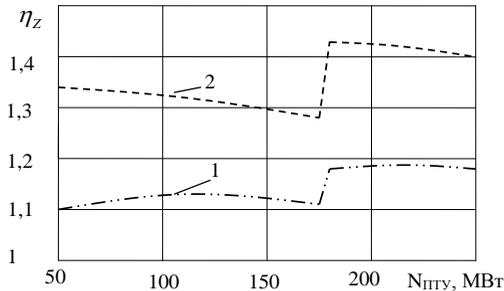


Рис. 3. Техничко-экономическая эффективность η_z : 1-при стандартных параметрах; 2-при оптимальных параметрах.

Энергоблоки со всеми вариантами теплофикационных турбин можно считать рентабельными, так как критерий эффективности больше единицы (рис. 3). Оптимальная эффективность ТЭЦ-МТ-ФТТ увеличивается по сравнению со стандартной в среднем на 7%.

Литература

1. Андрющенко А.И. Комбинированные системы энергоснабжения // Теплоэнергетика, 1997, № 5. - С. 2...6.
2. Пат. № 110459 РФ, МПК F24D 3/08. Система централизованного теплоснабжения / Ноздренко Г. В., Щинников П. А., Францева А. А. - Оpubл. 20.11.2011. - Бюл. № 32.

УДК 677:621.1

В.К. ПЫЖОВ, к.т.н., профессор,
А.В. НОВИКОВ, аспирант
(ИГЭУ), г. Иваново

Математическое описание процессов отделки материалов

В настоящее время на российских текстильных предприятиях остро стоит проблема сбережения энергоресурсов. Отчасти большие энергозатраты можно объяснить низким уровнем эксплуатации устаревшего ответственного оборудования. Значительные энергозатраты и низкая энергетическая эффективность технологического процесса часто имеет место и при работе технологических линий, в состав которых входит оборудование иностранных фирм. В качестве примера рассматривается ситуация на Тейковском хлопчатобумажном комбинате (ООО «ТТК»). В здании новой отделочной фабрики установлено современное отделочное обо-

рудование иностранного производства (газоопальная машина «Osthoff», отбельная линия «Kusters», сушильно-ширильные машины «Terma», печатные машины «Unika»). Однако остаётся множество нерешённых проблем, связанных с работой оборудования.

С целью устранения существующих недостатков ведётся разработка математической модели, призванной описать технологическую цепочку по отделке тканей, а также процессы создания и регулирования микроклимата в производственном помещении. Причём в модель закладывается описание всех технологических процессов, происходящих при работе оборудования (опаливание ткани, отбелка, заваривание и промывка полотна в отбельной линии, конвективная, радиационная и контактная сушка ткани и его одновременным ширением, печать рисунка на полотно с последующей сушкой). Разрабатываются блоки, позволяющие описать организацию работы отделочных линий в замкнутом по воздуху и технологическим жидкостям режиме с применением тепловых насосов и различных утилизаторов энергии.

Предлагаемое математическое модель даёт возможность решать сопряжённую задачу совместной работы технологического оборудования, с учетом динамических режимов в ограждении оборудования и ограждающих конструкциях здания при выборе энергосберегающих режимов работы технологического оборудования и систем создания микроклимата.

В качестве примера реализации данных задач можно привести математическое описание процессов тепло- и массообмена при конвективно-контактной сушке ткани (что имеет место, например, в печатных машинах «Unika»).

Тепловой баланс сушильной части печатной машины для любого i -ого режима в общем виде выражается следующим уравнением [1]

$$Q_{с,i} - Q_{ак,i} - Q_{окр,i} + Q_{дв,i} = L_{пдс,i} (h_{ух,i} - h_{в,i}) + L_{т,i} (h_{ух,i} - h_{т,i}), \quad (1)$$

где $Q_{с,i}$ – расход теплоты на сушку i -ом режиме, кВт; $Q_{ак,i}$ – расход теплоты на аккумуляцию энергии элементами сушильного оборудования в i -ом режиме, кВт; $Q_{окр,i}$ – потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильного оборудования в i -ом режиме, кВт; $Q_{дв,i}$ – выделение теплоты от электродвигателей оборудования, в i -ом режиме кВт; $L_{пдс,i}$ – расход воздуха, подсосываемого в сушильную камеру в i -ом режиме, кг/с; $L_{т,i}$ – расход технологического воздуха, нагнетаемого в сушильную камеру оборудования в i -ом режиме, кг/ч; $h_{ух,i}$, $h_{в,i}$, $h_{т,i}$ – соответственно удельная энтальпия воздуха в сушильной камере, подсосываемого воздуха из цеха и воздуха, подаваемого в сушильную камеру вентиляторами для поглощения испаренной влаги в i -ом режиме, кДж/кг.

Общий расход воздуха, уходящего из сушильной установки $L_{общ,i}$, кг/с, определяется по соотношению

$$L_{\text{общ},i} = L_{\text{ндс},i} + L_{\tau,i} = \frac{W_i \cdot 1000}{d_{yх,i} - d_{в,i}} \quad (2)$$

где W_i - количество испаряемой влаги из ткани в i -ом режиме, кг/с; $d_{yх,i}$, $d_{в,i}$ - влагосодержание соответственно удаляемого из сушильной камеры воздуха и воздуха, поступающего в сушильную камеру в i -ом режиме, г/кг с.в.

При построении математической модели для каждой единицы оборудования необходимо решить общую краевую задачу с подвижной границей фаз для системы нелинейных дифференциальных уравнений тепло- и переноса. Система уравнений, описывающая динамику процесса сушки при различных способах подвода энергии, имеет вид [1]:

$$c_j \rho_0 \frac{\partial t_j}{\partial \tau} = \nabla (\lambda_j \text{grad} t_j) + \varepsilon_j \rho_0 \frac{\partial t_1}{\partial x} + P_j(x, y, z, \tau) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial \tau} = \nabla (a_{mj} \text{grad} u_j + a_{mj} \delta_j \text{grad} t_j) + Q_j(x, y, z, \tau) \quad (4)$$

где $j = 1, 2$ - «сухой», «влажный» слои полотна; λ_j - коэффициент теплопроводности слоя полотна, Вт/(м²К); ρ_0 - масса абсолютно сухого материала в единице объема влажного материала, кг/м³; ε_j - удельная теплота парообразования, Дж/кг; $\xi = f(\tau)$ - граница раздела областей полотна; a_{mj} - коэффициент диффузии жидкости в слое полотна; δ_j - относительный коэффициент термодиффузии жидкости, кг влаги/кг сухого вещества; ε_j - модифицированный критерий фазового превращения в слое полотна; P_j, Q_j - объёмная производительность источников или стоков теплоты и влажности.

Краевые условия, сформулированные для одномерной задачи и полотна ткани, условно сведённого к форме неограниченной пластины, имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1(x, 0) &= f_1(x); \quad t_2(x, 0) = f_2(x); \\ u_1(x, 0) &= \varphi_1(x); \quad u_2(x, 0) = \varphi_2(x). \end{aligned} \quad (5)$$

Условия на неподвижных границах ($x=0, x=l$)

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} + q_1(\tau) - \gamma \left(1 - \varepsilon_1 \right) m_1(\tau) &= 0 \\ a_{m1} \rho_0 \frac{\partial u_1(0, \tau)}{\partial x} + a_{m1} \rho_0 \delta_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} + m_1(\tau) &= 0 \\ -\lambda_2 \frac{\partial t_1(l, \tau)}{\partial x} + q_2(\tau) - \gamma \left(1 - \varepsilon_2 \right) m_2(\tau) &= 0 \\ a_{m2} \rho_0 \frac{\partial u_2(l, \tau)}{\partial x} + a_{m2} \rho_0 \delta_2 \frac{\partial t_2(l, \tau)}{\partial x} + m_2(\tau) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Условия на движущейся границе ($x=f(\tau)$):

$$t_1(\xi, \tau) = t_2(\xi, \tau); u_1(\xi, \tau) = u_2(\xi, \tau); \quad (7)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1(\xi, \tau)}{\partial x} + \lambda_2 \frac{\partial t_2(\xi, \tau)}{\partial x} = m(\tau) \gamma \varepsilon_2 + [c_2 \rho_2 t_2(\xi, \tau) - c_1 \rho_1 t_1(\xi, \tau)] \frac{d\xi}{d\tau};$$

$$a_{m1} \rho_0 \left[\frac{\partial u_1(\xi, \tau)}{\partial x} + \delta_1 \frac{\partial t_1(l, \tau)}{\partial x} \right] - a_{m2} \rho_0 \left[\frac{\partial u_2(\xi, \tau)}{\partial x} + \delta_2 \frac{\partial t_2(\xi, \tau)}{\partial x} \right] = \rho_0 u(\tau) \frac{d\xi}{d\tau}$$

Необходимо отметить, что на неподвижных границах приняты обобщённые граничные условия второго рода, учитывающие источники и стоки теплоты и вещества, действующие непосредственно на поверхности полотна.

Общая длительность процесса сушки определяется по выражению:

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{1}{N} \left(\omega_n - \omega_k + \frac{1}{\chi_1} \lg \frac{\omega_{\text{кр}1} - \omega_p}{\omega_{\text{кр}2} - \omega_p} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{\omega_{\text{кр}2} - \omega_p}{\omega_k - \omega_p} \right) \quad (8)$$

где N - скорость в периоде постоянной скорости сушки, %/с; $\omega_n, \omega_k, \omega_p$ - начальное, конечное, равновесное влагосодержание ткани, %; $\omega_{\text{кр}1}, \omega_{\text{кр}2}$ - первое и второе критическое влагосодержание полотна в периоде падающей скорости сушки, %; χ_1, χ_2 - относительные коэффициенты сушки (определяются структурой материала и методом сушки).

Например, при комбинированном контактно-конвективном (радиационном) способе подвода энергии зависимость для расчёта скорости сушки d gthdju gthbjt имеет вид [1]

$$N = a t_{\text{гр}}^b g^{-1} \tau_{\text{ц}}^{-k} \left(\frac{\tau_n}{\tau_{\text{по}}} \right)^n K_n \quad (9)$$

где $t_{\text{гр}}$ - температура греющей поверхности, $^{\circ}\text{C}$; g - удельная масса материала, $\text{кг}/\text{м}^2$; $\tau_{\text{ц}}$ - время цикла сушки, с; τ_n - продолжительность контакта полотна с сушильными цилиндрами; $\tau_{\text{по}}$ - продолжительность контакта полотна (наиболее распространённая в сушильных установках); K_n - коэффициент прижатия материала к греющей поверхности (зависит от рода прижимающего материала и его состояния); a, b, k, n - показатели степени (зависят от рода материала).

Литература

1. Красников, В.В. Кондуктивная сушка / В.В. Красников – М.: Наука, 1973 – 288 с.

УДК 62-97/-98(608.4)

Е.В. ФИРСОВА, ассистент,
В.Ю. СОКОЛОВ, к.т.н., зав. каф. теплоэнергетики
(ОГУ), г. Оренбург

Подбор микротурбинного двигателя для тригенерационных циклов

Установки, работающие в тригенерационном цикле, позволяют вырабатывать одновременно три энергоносителя: электрическую и тепловую с отрицательным и высоким потенциалами.

Для осуществления тригенерационного цикла необходим генератор. Для малых и средних мощностей используются микротурбинные и поршневые двигатели.

Преимущества использования микротурбинного двигателя заключаются в следующем:

- Возможность работы установки при перепаде электрической нагрузки до 70-80%;
- Возможность устойчивой работы в течение длительного времени при малой степени загрузки, в том числе в режиме холостого хода (по произвольному электрическому графику);
- Интервал замены масла в турбогенераторе около 24000, а в дожимном компрессоре 8000 мото-часов;
- Бесперебойность работы;
- Возможность работы на низкокалорийных топливах (угле) и на топливе с минимальной концентрацией метана 30% (биогазовые установки);
- Низкий уровень эмиссии по NO_x - 25 ppmv при 15% O_2 .

Микротурбинный двигатель представляет собой установку из нескольких узлов. Для обеспечения нагнетания и передачи крутящего момента на электрогенератор используется "микротурбина" Томаса Генри, оснащенная камерой сгорания и рекуператором для обеспечения лучших параметров работы.

Поступающий воздух с окружающей среды проходит через рекуператор, нагревается в нем теплом сгоревших газов и поступает в камеру сгорания. Что улучшает параметры горения топливно-воздушной смеси.

В настоящее время большой выбор микротурбинных установок от разных производителей. Предлагаемые мощности (электрические) находятся в диапазоне от 35 кВт до 1 МВт и более. Тепловые мощности, так же, зависят от производителя.

Для осуществления тригенерационного цикла с одновременной выработкой тепла, холода и электричества необходимо подобрать микротурбину с необходимыми параметрами.

Тригенерационный цикл может работать в следующих режимах:

1. Электроэнергия и тепловая энергия высокого потенциала (электричество-тепло) – данный режим используется в зимний промежуток времени. Тепловая энергия используется для отопления потребителей.

2. Электроэнергия и тепловая энергия отрицательного потенциала (электричество-холод) – используется в летнее время для кондиционирования помещений.

3. Электроэнергия и тепловая высокого и отрицательного потенциала (электричество-тепло-холод) – режим используется для одновременной выработки трех видов энергии. Холод в данном режиме круглогодично используется в холодильных машинах на производстве, в крупных торговых центрах. Тепло на производстве используется в производственном цикле, а в торговых комплексах, в летнее время, переводится для кондиционирования или для других нужд.

4. В ночное время электроэнергия накапливается в блочных аккумуляторах, что позволяет покрыть пиковые нагрузки в течение дня.

Возможность работать в любом из вышеперечисленных режимов делает тригенерационные установки востребованными, так как своевременное переключение позволяет, как обеспечивать потребителей необходимыми энергоносителями, так и более эффективно сжигать топливо.

Для осуществления тригенерационного цикла по данной схеме выбор микротурбинного двигателя осуществляется по следующим основным критериям: тепловая мощность и температура отработавших газов на выходе из турбины.

Тепловая мощность важна по причине того, что установка изначально должна обеспечивать потребителей горячим водоснабжением (эта тепловая мощность изначально входит в технические характеристики микротурбин) не зависимо от режима работы.

Температура отработавших газов - для подключения к установке абсорбционной холодильной машины, для выработки холода.

Совокупность данных параметров позволяет тригенерационной установке легко переключаться между режимами, в зависимости от тех или иных факторов.

Нами были рассмотрены микротурбины фирм Calnetix и Capstone, а так же одной менее известной фирмы - Ingersoll Rand. Первые две фирмы являются лидирующими и конкурирующими. Они изготавливают микротурбины различной комплектации и являются патетообладателями на некоторые узлы установок.

На рис. 1 представлен график сравнения тепловой мощности микротурбин, на рис. 2 - график сравнения температуры уходящих газов, при вырабатываемой электрической мощности в 100 кВт.

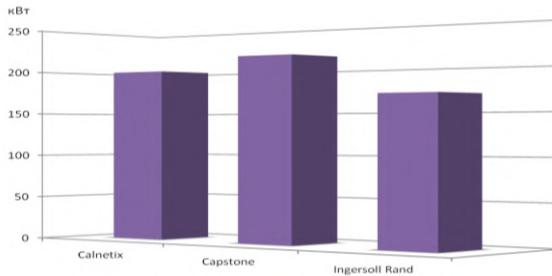


Рис. 1. Тепловая характеристика микротурбин

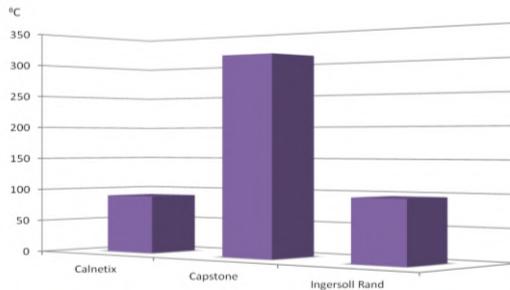


Рис. 2. Температура уходящих газов

Из представленных графиков наглядно видно, что микротурбины Capstone подходят для работы в тригенерационном цикле. Сгоревшие газы, пройдя через микротурбину, теплообменный аппарат и АБХМ имеют температуру от 8 до 10 °С, что соответствует требованиям Федерального закона № 7 от 10 января 2002 года «Об охране окружающей среды». Такое снижение температуры обеспечивает высокий коэффициент полезного использования топлива. Данный коэффициент показывает на сколько установка энергосберегающая относительно энергетических топливных ресурсов.

Литература

1. **Попель О.С.** Разработки ИВТ РАН по эффективному использованию возобновляемых источников энергии: Научно-практическая конференция «Малые и средние ТЭЦ. Современные решения», Институт высоких температур РАН, г. Москва.
2. **Фирсова Е.В.** Использование мини-ТЭЦ для тригенерации энергии /Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: состояние, проблемы перспективы» / Оренбург 2010. С.47-51.

УДК 62-67

В.В. БУХМИРОВ д.т.н., профессор;
Ю.С. СОЛНЫШКОВА к.т.н., ст. преподаватель;
А.В. ДАНИЛОВ, программист,
А.И. ПОГОДИН, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

Рекомендации по совершенствованию системы лучистого отопления для производственного здания

В связи с принятием Федерального Закона [1], актуальным стало решение проблемы сбережения энергетических ресурсов, при производстве, передаче и потреблении энергии. В настоящее время с целью энергосбережения для отопления производственных зданий с большой высотой потолков все чаще применяют системы лучистого отопления.

В статье [2] было показано, что в системе лучистого отопления станции технического обслуживания автомобилей ОАО «РИАТ» существует превышение мощности лучистой отопительной системы. Вследствие этого температура воздуха в рабочих зонах выше оптимальной, установленной нормативным документом [3]. Это превышение можно считать ещё более существенным, поскольку системы отопления с инфракрасными излучателями (ИКИ) позволяют снижать температуру воздуха внутри помещения на 3 – 4°С [4].

По информации, указанной в проспекте [5], тариф на газ в 2013 году будет увеличен на 15% по сравнению с 2012 годом. При учете данного обстоятельства экономия при оптимальном режиме работы уже существующей системы отопления с ИКИ может быть значительной.

Экономический эффект при использовании системы инфракрасного отопления может быть достигнут за счет внедрения следующих мероприятий:

- 1) снижение температуры в помещении до +10°С в нерабочее время;
- 2) отключение ряда нагревателей при температурах наружного воздуха от –6°С до +8°С.

Расчет экономического эффекта от предложенных мероприятий выполнен в ценах 2011 года.

Мероприятие 1. В нерабочее время допустимым является снижение температуры в помещении до +10°С, что соответствует минимальному режиму работы излучателей. Снижение температуры возможно из-за малой инерционности систем инфракрасного отопления.

Для условий станции технического обслуживания автомобилей ОАО «РИАТ» затраты на отопление помещения в нерабочее время составят 160585 рублей, а экономический эффект от применения данного мероприятия составит 110663 рублей. При этом мероприятие 1 будет иметь хороший срок окупаемости (1,45 года) и положительное значение чисто-

го дисконтированного дохода, что свидетельствует об экономической эффективности данного мероприятия.

Мероприятие 2. Вариантные расчеты показали, что для станции технического обслуживания автомобилей при температуре наружного воздуха от -6°C до $+8^{\circ}\text{C}$ рациональным является отключение ряда нагревателей. Предложено при указанном интервале температур наружного воздуха отключать 3 однотрубных нагревателя из 9-ти установленных. Для сравнения теплового состояния помещения проведены расчеты микроклимата для трех вариантов отопления с инфракрасными излучателями:

1. отопление помещения девятью работающими ИКИ;
2. отопление помещения пятью работающими ИКИ;
3. отопление помещения шестью работающими ИКИ.

Результаты расчета для трех вариантов включения инфракрасных излучателей при температуре наружного воздуха -6°C представлены на рисунке 1. Суммарная мощность ИКИ составила 32,4 кВт, 32,5 кВт и 28,8 кВт для первого, второго и третьего вариантов расчета соответственно. Расчеты при помощи математической модели [7] показали, что для всех рассмотренных случаев облученность поверхностей в рабочей зоне (см. рис. 1) не превышает предельно допустимое значение, регламентированное нормативным документом [3]. Температура воздуха в рабочей зоне так же отвечает требованиям ГОСТ [3].

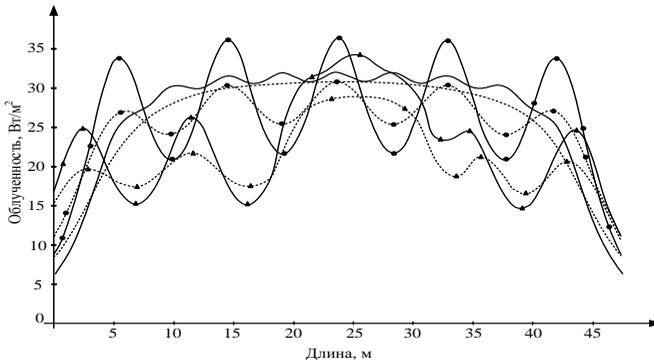


Рис. 1. Облученность поверхностей инфракрасными излучателями:

- — облученность на высоте 1,7 м от пола при работе 9-ти излучателей;
- — облученность на полу при работе 9-ти излучателей;
- ▲— — облученность на высоте 1,7 м при работе 6-ти излучателей (№№1, 3, 5, 6, 7, 9);
- ▲····· — облученность на полу при работе 6-ти излучателей (№№1, 3, 5, 6, 7, 9);
- — облученность на высоте 1,7 м при работе 5-ти излучателей (№№1, 3, 5, 7, 9);
- — облученность на полу при работе 5-ти излучателей (№№1, 3, 5, 7, 9)

При этом по технологическим причинам отключение именно трех нагревателей из девяти целесообразно из-за периодически открываемых ворот в отапливаемой зоне помещения.

Для отключения нескольких лучистых нагревателей необходимо к имеющимся в помещении СТО ОАО «РИАТ» двум регуляторам температуры с датчиками типа «шаровой» зонд установить еще два регулятора температуры.

Расчет экономического эффекта от внедрения второго мероприятия выполнен при условии соответствия температур наружного воздуха температурам, указанным в СНиП 23-01-99 [6] для города Иваново. Температура от -6°C до $+8^{\circ}\text{C}$ наблюдается в городе Иваново 129 дней в отопительный период. Для этих условий экономический эффект составит 33661 рубль. Простой срок окупаемости мероприятия 2 равен 0,29 лет при положительной величине чистого дисконтированного дохода, что свидетельствует об экономической эффективности данного мероприятия.

Вывод. Модернизация системы лучистого отопления на станции технического обслуживания ОАО «РИАТ» путем снижения температуры воздуха в помещении в нерабочее время и отключении части ИКИ позволит получить значительный экономический эффект.

Литература

1. **Федеральный закон** от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ.
2. **Бухмиров В.В.** Экспериментальное исследование системы отопления с инфракрасными излучателями [Текст] / В.В. Бухмиров, Ю.С. Солнышкова, М.В. Пророкова // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып.3. – С. 12-16.
3. **ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ.** Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. (Изменения №1 20.06.2000) – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.
4. **Богуславский Л.Д.** Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ Пособие [Текст] / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, В.П. Титов и др.; Под ред. Л.Д. Богуславского и В.И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
5. **Рекламный проспект** компании ТСТ (Технические системы и технологии): Эколайн.
6. **СНиП 23-01-99.** Строительная климатология: Утв. Постановлением Госстроя России от 11.06.99 №45, М., 2000. – 57 с.
7. **Солнышкова Ю.С.** Совершенствование систем радиационного отопления зданий с целью сбережения энергетических ресурсов: Дис. ...к-та тех. наук – Иваново, , 2012. – 157 с.

УДК 62-67

В.В. БУХМИРОВ д.т.н., профессор;
В.А. ТИБАЙКИН, гл. инженер,
Ю.С. СОЛНЫШКОВА к.т.н., ст. преподаватель;
А.Ю. КОСТЕРИН, доцент;
Т.Е. СОЗИНОВА, к.т.н., доцент;
Е.В. ПОНОМАРЕВА, ассистент;
А.М. ШУРЫГИН, к.т.н., доцент;
М.В. ПРОРОКОВА, аспирант;
А.В. ДАНИЛОВ, инженер; Г.А. РОДИОНОВ, ассистент;
А.К. ГАСЬКОВ, аспирант, (ИГЭУ) г. Иваново

Энергетическое обследование ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ивановский государственный энергетический университет в соответствии со статьей 16 ФЗ №261 от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении...» [1] обязан пройти энергетическое обследование с целью анализа существующего потребления ТЭР всех видов, включая холодную воду, и выявления потенциала энергосбережения, а также разработки энергосберегающих мероприятий с экономическим обоснованием их внедрения.

Гарантией качественной оценки существующего положения по потреблению ТЭР, предложения энергосберегающих мероприятий и выполнения требований законодательства в части проведения энергетического обследования является зарегистрированный в саморегулируемой организации в области энергетического обследования (СРО) энергетический паспорт потребителя ТЭР, оформленный согласно требований приказа Минэнерго №182 от 19.04.2010 года «Об утверждении требований к энергетическому паспорту...» [2]. На основании статьи 15 Федерального Закона «Об энергосбережении...» [1], энергетическое обследование вправе проводить только организации, являющиеся членами СРО в области энергетических обследований. При этом в статье 18 ФЗ №261 [1] отмечено, что члены СРО вправе проводить энергетические обследования в отношении самих себя. Ивановский государственный энергетический университет входит в НП СРО «Гильдия Энергоаудиторов» (г. Москва), поэтому энергоаудит зданий и сооружений ИГЭУ был выполнен сотрудниками университета в январе – декабре 2012 года.

Энергетическое обследование проведено по методикам, утвержденным в НП СРО «Гильдия Энергоаудиторов» [3].

При энергетическом обследовании проанализированы потребление и затраты ТЭР и воды как в целом по ВУЗу, так и по отдельным корпусам. Расчетным путем выявлены резервы экономии по каждому виду ТЭР путем сравнения фактического и нормативного потребления.

Таблица 1. **Перечень основных типовых энергосберегающих мероприятий, включенных в энергетический паспорт ИГЭУ**

Наименование мероприятия, вид энергетического ресурса	Годовая экономия энергетических ресурсов			Затраты, тыс. руб.	Средний срок окупаемости, лет	Согласованный срок внедрения, квартал, год
	в натуральном выражении		в стоимостном выражении, тыс. руб. (по тарифу)			
	единица измерения	кол-во				
Среднезатратные						
Замена люминесцентных ламп на светодиодные (корпус "А"). Электроэнергия	тыс. кВт·ч	303,34	606,897	3554,42	5,86	III, 2017
Установка автоматического регулятора отопительной системы (корпус "Д"). Тепловая энергия	Гкал	48,66	60,132	60	0,998	III, 2014
Наложение теплоотражающей изоляции за радиаторами отопления (корпус "Д"). Тепловая энергия	Гкал	7,3	9,021	20,28	2,25	III, 2013
Установка котла меньшей мощности (котельная). Котельно-печное топливо: природный газ	тыс. м ³	91,872	236,94	509,2	2,15	IV, 2017
Замена старых окон на пластиковые стеклопакеты (ЭОП). Котельно-печное топливо: природный газ	тыс. м ³	29,39	125,251	939,9	7,5	I, 2013
Установка сенсорных кранов-смесителей на холодную и горячую воду (корпус "А"). Вода	тыс. м ³	1,16	9,626	87,137	9,05	IV, 2014
Замена трубопроводов системы отопления на пенополиуретановые (участок диаметром 216 мм и длиной 105 м). Тепловая энергия	Гкал	32,39	24,598	79,595	3,24	III, 2013
Теплоизоляция кровли с применением пенополиуретана (Машиностроительный колледж). Тепловая энергия	Гкал	178,8	255,94	723,94	2,83	III, 2013
Проектирование и монтаж ИТП (корпус "Б"). Котельно-печное топливо: природный газ	тыс. м ³	25,82	96,207	1844,03	более 10	IV, 2013
Проектирование и монтаж вентилируемого фасада (корпус "В"). Котельно-печное топливо: природный газ	тыс. м ³	23,92	101,94	11850,96	более 10	IV, 2015

Для оценки полноты сведений, имеющихся в отчетной и технической документации, было проведено инструментальное обследование зданий и сооружений ИГЭУ и Машиностроительного колледжа ИГЭУ, которое включало в себя: анализ качества потребления электрической энергии, фактическое потребление тепловой энергии, тепловизионное обследование зданий и сооружений и измерение параметров микроклимата в помещениях ВУЗа и Машиностроительного колледжа ИГЭУ. Было отснято и проанализировано более 500 термограмм внутренней и наружной тепловизионной съемки.

В результате обследования были предложены энергосберегающие мероприятия по видам ТЭР и воде, которые вошли в энергетический паспорт ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Все энергосберегающие мероприятия согласованы и утверждены Заказчиком - Ректоратом ИГЭУ. В табл. 1 приведен перечень энергосберегающих мероприятий (выборочно), рекомендованных по результатам энергоаудита ВУЗа и Машиностроительного колледжа ИГЭУ.

Результаты энергетического обследования ИГЭУ представлены в 11 отчетах (общий отчет и 10 отчетов по потребителям ТЭР ИГЭУ) и разработан энергетический паспорт потребителя ТЭР согласно требованиям Приказа Минэнерго [2]. Энергетический паспорт прошел экспертизу и зарегистрирован в ПН СРО «Гильдия Энергоаудиторов» в декабре 2012 года.

Литература

1. **Федеральный закон** № 261 «Об энергосбережении...» от 23 ноября 2009 г.
2. **Приказ Минэнерго** РФ №182 «Об утверждении требований к энергетическому паспорту...» от 19.04.2010 г.
3. <http://www.quildenergo.ru/01.01.04.02/256.aspx> - [Электронный ресурс] / дата обращения 12.02.2012.

УДК 536.2

В.В. БУХМИРОВ д.т.н., профессор;
О.Б. КОЛИБАБА к.т.н., доцент
А.К. ГАСЬКОВ, аспирант;
М.Г. СУЛЕЙМАНОВ, аспирант;
(ИГЭУ), г. Иваново

Классификация методов определения теплофизических свойств дисперсных материалов

Дисперсные материалы широко применяют в энергетике, металлургии, строительстве и других областях техники в качестве теплоизоляции, строительных материалов, фильтров, абсорберов/десорберов тепла и вещества. Дисперсными называют материалы, состоящие из нескольких фаз (минимум из двух), разделённых сильно развитой поверхностью, при этом

одна фаза (дисперсная фаза) распределена в виде мелких частиц в другой фазе (дисперсионной среде). Из-за большого разнообразия дисперсных материалов их группируют по типам: а) твёрдые связанные капиллярно-пористые материалы (кирпич, бетон, алебастровые плиты, пробковые доски и др.); б) насыпные зернистые материалы (изоляционные засыпки, опилки, порошки разных веществ различной дисперсности и др.); в) волокнистые материалы (ткани, волокна, войлоки, ваты и др.); г) материалы в виде тонких слоёв (клеёнки, плёнки, слои лаков и красок и др.); д) почвогрунты, шахтно-рудные и закладочные материалы; е) огнеупоры; ж) замороженные материалы (лёд, снег и др.); з) полупроводники и диэлектрические материалы (полимеры, пластмассы и др.) [1].

Данные о теплофизических свойствах (ТФС) дисперсных материалов и о характере их изменения под воздействием ряда факторов окружающей среды необходима для математического моделирования и решения прикладных инженерных задач. Для решения задач тепломасообмена необходима информация о коэффициентах теплопроводности и температуропроводности, удельной теплоёмкости, а также о плотности материала [2].

Процесс передачи теплоты в дисперсных материалах, в общем случае, проходит посредством: а) теплопроводности вдоль твёрдого скелета материала дисперсионной среды; б) контактной теплопроводностью в местах непосредственного контакта твёрдых частиц; в) молекулярной теплопроводностью в дисперсной фазе; г) лучистой и конвективной теплоотдачи на границе дисперсионной среды и дисперсной фазы; д) излучения в дисперсной фазе; е) конвекции газа и влаги в дисперсной фазе [3].

Все методы определения ТФС дисперсных материалов можно разделить на две группы: расчётные (теоретические) и экспериментальные [4].

В теоретических методах теплофизические свойства дисперсных материалов определяют используя модели квантовой механики, статистической термодинамики и молекулярно-кинетической теории строения вещества. Теоретические методы сложны для практического применения, так как расчётные модели и формулы содержат коэффициенты, значение которых можно определить только эмпирически.

Наиболее распространёнными методами нахождения ТФС являются экспериментальные методы, основанные на решении обратной задачи теории теплопроводности.

На рис. 1 представлена классификация методов определения теплофизических свойств дисперсных материалов [5-7].

Значение теплофизических свойств дисперсных материалов зависит от многих факторов: размера твёрдых частиц и пор, структуры материала, теплофизических свойств дисперсионной среды и дисперсной фазы, наличия влаги и примесей в дисперсионной среде, а также от температуры, при которой эксплуатируется материал. Поэтому выбор метода определения ТФС зависит от вида дисперсного материала и его структуры. Например, анализ литературы и собственный опыт показали, что для тонкоплёночных

дисперсных материалов (лаков, красок и др.) наиболее эффективным способом определения ТФС является метод цилиндрического слоя из-за простоты реализации и достаточно высокой точности получаемых данных.

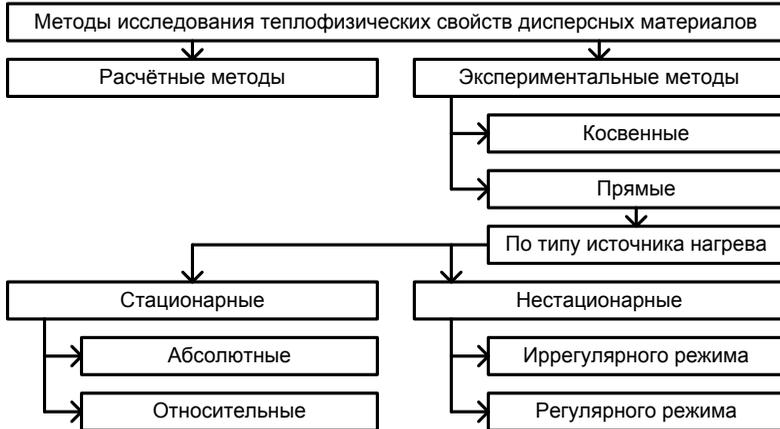


Рис. 1. Методы определения теплофизических свойств дисперсных материалов

В настоящее время растёт ассортимент выпускаемых промышленностью материалов, в числе которых значительную долю составляют дисперсные и композитные материалы. В связи с этим получили развитие комбинированные расчётно-экспериментальные методы определения теплофизических свойств дисперсных материалов, которые позволяют, на основе накопленного опыта исследований и созданных моделей, с достаточной степенью точности, определять и прогнозировать свойства веществ. Развитие комбинированных методов определения теплофизических свойств дисперсных материалов получило в работах Максвелла, Бугера [8], Бровкина [9], Крыловой [10], Дульнева [11], Кирсанова [12] и др. Однако, на сегодняшний день, большинство моделей определения ТФС дисперсных материалов, основанные на комбинированных методах, являются однофакторными и не учитывающими всего многообразия процессов переноса, протекающих в дисперсном материале.

Вывод. Совершенствование комбинированных методов определения теплофизических свойств дисперсных материалов, путём установления однозначных зависимостей влияния комплекса факторов на процессы переноса в дисперсных веществах, с целью повышения их точности, является весьма актуальной научной задачей, решить которую необходимо в ближайшее время.

Литература

1. **Чудновский А.Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: ГИФМЛ, 1962 – 456 с.
2. **Методы** определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А.В. Лыкова. - М.: «Энергия», 1973 – 336 с.
3. **Чудновский А.Ф.** Теплообмен в дисперсных средах.– М.: ГИТТЛ, 1954.– 444 с.
4. **Бухмиров В.В.** Разработка и использование математических моделей для решения актуальных теплотехнических задач металлургического производства. Дис. ... д-ра тех. наук. – М., 1998. – 464 с.
5. **Осипова В.А.** Экспериментальное исследование процессов теплообмена. Изд. 2-е, переработ. и дополн. - М.: «Энергия», 1969.- 392 с.
6. **Лыков А.В.** Явления переноса в капиллярно-пористых телах.- М.: ГИТТЛ, 1954.- 296 с.
7. **Дульнев Г.Н.,** Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. Л., "Энергия", 1974.- 264 с. с ил.
8. **Васильев Л.Л., Танаева С.А.** Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971. – 263 с.
9. **Бровкин Л.А.** Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. Иваново: ИЭИ, 1973. – 364 с.
10. **Крылова О.Б.** Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных заготовок: Дис. ... к-та техн. наук – Ленинград, 1988. – 212 с.
11. **Дульнев Г.Н.,** Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1991.- 248 с.: ил.
12. **Кирсанов А.Ю., Назипов Р.А., Данилов В.А.** Теплообмен пористого тела с однофазным потоком теплоносителя // Теплофизика высоких температур. 2011. т. 49, №2. с. 235-242.

УДК 620.9

В.В. БУХМИРОВ д.т.н., профессор;
О.Н. МАХОВ к.т.н., доцент
М.В. ПРОРОКОВА, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Результаты энергоаудита зданий и сооружений бюджетных учреждений

Недостаток нормативных требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций, ориентация на приоритетность массивных конструкций из сборного железобетона сделали строительство зданий и сооружений в России самым энергоемким в мире. Как показывает статистика энергетического аудита, более 30% потенциала экономии сосредоточено в коммунальных инженерных системах, до 70% - в зданиях и сооружениях. Только на отопление и электроснабжение жилых, промышленных и общественных зданий расходуется по усредненному проектным данным около 560 млн. тонн условного топлива или около 35% потребляемых в России энергетических ресурсов [1].

Значительный потенциал энерго- и ресурсосбережения можно отыскать в практике существовавшего проектирования и строительства зданий и сооружений общественных, промышленных, административных и жилых зданий.

Проводимая в прошлом веке политика дешевых энергоносителей привела к строительству в нашей стране зданий и сооружений с низким термическим сопротивлением ограждающих конструкций, а в отсутствии средств регулирования и учета расхода тепловой энергии, горячей и холодной воды к расточительному их использованию во всех сферах деятельности, в том числе и в бюджетной.

По данным, собранным в результате проведения энергетического аудита зданий и сооружений бюджетной сферы установлено, что теплопотери в зданиях на 15-25% превышают проектные и нормативные значения из-за низкого качества строительства и неграмотной эксплуатации самого здания. Уровень теплозащитных свойств большинства обследованных зданий не отвечает нормативным требованиям. Результаты сравнения фактических и расчетных удельных тепловых характеристик для различных групп обследованных бюджетных учреждений приведены на рис. 1.

Из рисунка 1 видно, что по всем зданиям наблюдается превышение фактического потребления над нормативным. Отклонение фактического значения от нормативного, в среднем, составляет 25%. Таким образом, минимальный потенциал энергосбережения может составлять до 25% от потребления тепловой энергии в учреждении. В каждом конкретном случае, потенциал может быть различным.

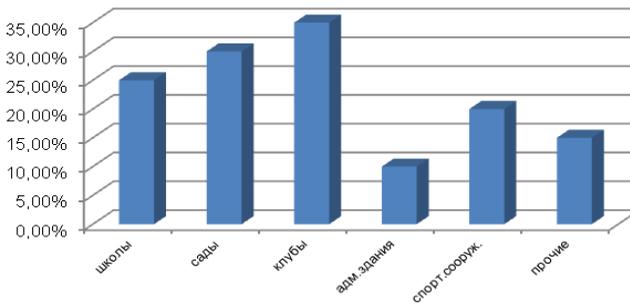


Рис. 1. Сравнение фактических и расчетных удельных тепловых характеристик для различных групп бюджетных учреждений

В 10-15% зданий, в которых проводился аудит, фактические удельные характеристики соответствовали нормативным значениям для данного вида здания. Малая часть зданий была построена после 2000 года. Остекление зданий было выполнено пластиковыми двухкамерными стеклопакетами, а система отопления оборудована прибором учета

и современными биметаллическими радиаторами. Температура воздуха в таких зданиях соответствовала норме.

В остальных зданиях, температура в помещениях опускалась ниже нормативного значения на 2-3⁰С. Часть радиаторов отопления была забита и со слов сотрудников никогда не промывалась. Результаты тепловизионного обследования показали, что в большинстве случаев, радиаторы отопления работали только на 45-50%. Кроме того, на всех объектах отсутствовали отражающие экраны за радиаторами, которые способны повысить эффективность работы этого прибора на 5-7% [1].

Эффективность остекления зданий также была низкая, так как возраст окон соответствовал дате ввода здания в эксплуатацию. Если учесть, что в среднем для бюджетных учреждений год постройки можно датировать 1970-80 г.г., то возраст окон составляет 30 лет и более. При определении фактического теплопотребления выяснялось, что в здании был так называемый «недотоп». Полученная таким образом экономия негативно отражается на персонале учреждения. Увеличивается количество заболевших среди сотрудников, если здание административное и может привести к росту заболевших среди воспитанников, если это образовательное учреждение. Снижение температуры воздуха в помещении также может привести к появлению плесени на ограждающих конструкциях учреждения из-за повышения влажности. Такая псевдоэкономия может привести не к снижению затрат, а наоборот к их увеличению.

В оставшихся 85-90% случаях наблюдалось превышение фактического потребления тепловой энергии над нормативным. Нужно отметить тот факт, что в части зданий также была низкая температура внутреннего воздуха. Кроме того, часть помещений зданий была вообще отключена от центральной системы отопления в целях экономии. Как показала практика аудита, отключение части помещений от системы отопления приводит к увеличению потребления электрической энергии. Увеличение электропотребления связано с отоплением отключенных помещений электрическим нагревателями разного типа.

Согласно рис.1 в зданиях клубов наблюдаются наибольшие потери тепловой энергии. Это связано с тем, что все учреждения культуры, в которых есть сцена, отапливаются водяными радиаторами отопления. Однако, в проекте, для отопления здания использовалась система вентиляции, которая демонтирована. Наличие системы отопления не позволяет поддерживать тепловой баланс в помещениях учреждения для требуемой нормативной температуры внутреннего воздуха. В результате, помещение очень быстро остывает, а температура не соответствует нормативным значениям. Основные потери в таких зданиях наблюдаются через крышу, двери и окна. Как правило, двери в учреждениях старые и требуют замены. При тепловизионном обследовании потери тепла наблюдаются именно через неплотности в дверях и через старые оконные конструкции. Есть примеры, когда потери тепловой энергии наблюдались при трещинах в стенах и в потолках таких учреждений. Из-за частых «недотопов», или при полном отключении

учреждения от системы отопления наблюдались разрывы в кирпичной кладке стен, разрывы фундаментов, и появление трещин в полу и потолке. Через образовавшиеся неплотности в помещение поступает холодный воздух способствующий понижению температуры внутреннего воздуха.

Таким образом, можно сделать вывод, что основными недостатками при эксплуатации зданий и сооружений бюджетных учреждений являются: старые окна и двери, низкие теплозащитные свойства ограждающих конструкций, конструкционные дефекты зданий и сооружений появившиеся при эксплуатации или при строительстве, неграмотная эксплуатация здания, а также некачественно проведенный текущий или капитальный ремонт. Все эти недостатки могут приводить к значительным потерям тепловой энергии, достигающим 30% от общего теплопотребления.

Литература

1. Энергосбережение в ЖКХ: Учебно-практическое пособие / Под.ред. Л.В. Примака, Л.Н. Чернышова.- М.: Академический Проект: Альма Матер, 2011.- 622с.

СЕКЦИЯ «ТЕПЛОБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ»

УДК 621.039.523

Н.Н. АВАКИМЯН к.ф.-м.н., доцент;
Н.И. ВАСИЛЬЕВ к.т.н., доцент;
Е.Н. ДАЦЕНКО к.т.н., доцент
(КубГТУ) г. Краснодар

Определение эффективной теплопроводности воды, отделенной паровой прослойкой от нагретой поверхности

Капельное охлаждение нагретых поверхностей используется в аппаратах и процессах различных областей техники, таких, как энергетика, металлургия, химическая промышленность и др. Проведено большое количество исследований параметров взаимодействия нагретой твёрдой стенкой с каплями [1], однако отсутствуют данные об эффективной теплопроводности жидкости из капель, определяемой одновременным действием механизмов молекулярной и конвективной теплопередачи.

В опытах [2] капли падали на поверхность нагретой стенки, температура которой измерялась малоинерционной поверхностной термопарой и величина температуры фиксировалась на экране осциллографа. Термопара располагалась на поверхности нагретой стенки в месте падения капли. Можно было выбирать скорость капель - V , начальную температуру стенки и жидкости - $T_w(0)$ и $T_l(0)$, угол падения - α каплей и выбирать их диаметр - 0,3 мм и 3,2 мм.

Для одномерной схемы процесса взаимодействия капли и поверхности нагретой стенки равенство количества тепловой энергии переданной нагретой стенкой и поглощённой жидкостью в системе: нагретая стенка – жидкость:

$$0,5\rho_w c_w \delta_w (T_w(0) - T_w(\tau_{фр})) = 0,5\rho_l c_l \delta_l (T_l(\tau_{фр}) - T_l(0)), \quad (1)$$

Равенство мощностей потока энергии из стенки в жидкость:

$$-\lambda_w \frac{T_w(0) - T_w(\tau_{фр})}{\delta_w} = \lambda_{l,эфф} \frac{T_l(0) - T_l(\tau_{фр})}{\delta_l}, \quad (2)$$

где ρ, c, δ - плотность, теплоёмкость и глубина проникновения тепловой волны в стенку «W» и жидкость «l» соответственно в течение времени $\tau_{фр}$, λ_w - теплопроводность стенки, $\lambda_{l,эфф}$ - эффективная теплопроводность жидкости. При составлении балансов (1) и (2) не учитывалась теплота испарения жидкости внутрь парового слоя, т.к. по оценкам, она много меньше, чем теплота, передаваемая от нагретой поверхности к

жидкости. Незначительное дополнительное испарение внутрь парового слоя при контакте капли и нагретой стенки практически не нарушает балансы (1) и (2). Кроме того, в (1) и (2) не учитываются изменения параметров стенки: ρ_w, c_w, λ_w и жидкости: ρ_l, c_l при изменении их температуры в диапазоне $100 \div 400$ °С [4]. Из (1) и (2) определялась величина эффективной теплопроводности:

$$\lambda_{l,эфф.} = \frac{\rho_w c_w \lambda_w (T_w(0) - T_w(\tau_{фр}))^2}{\rho_l c_l (T_l(\tau_{фр}) - T_l(0))^2}. \quad (3)$$

В (3) величины $\rho_w, c_w, \lambda_w, \rho_l, c_l$ - известные величины, $T_w(0)$ и $T_l(0)$ - измерялись с относительной погрешностью 0,5%, $T_w(\tau_{фр})$ и $\tau_{фр}$ измерялась с погрешностью 5% на осциллограммах изменения $T_w(\tau)$ с течением времени. Измерить величину температуры поверхности жидкости прилегающей к паровому слою $T_l(\tau_{фр})$ не представлялось возможным, но, так как паровая прослойка тонкая, можно предположить, что пар и жидкость находятся в равновесии в каждый момент времени взаимодействия $\tau_{фр}$, поэтому температура $T_l(\tau_{фр})$ близка к температуре насыщения жидкости $T_s(p)$ при давлении p , развиваемом каплей в момент удара и последующего растекания капли в течение времени $\tau_{фр}$. Это давление можно найти из зависимости [3]: $p = 0.2c_{зв} V \sin \alpha$, $T_l(\tau_{фр}) = T_s(p)$, ($c_{зв}$ - скорость звука в жидкости).

На рис. 1 представлена зависимость величины эффективной теплопроводности жидкости, определенной из зависимости (3) и экспериментальных данных для различных режимов взаимодействия поверхности нагретой стенки; параметры материала стенки и жидкости принимались при 100°С. Видно, что при сравнительно низкой температуре стенки $T_w(0) \sim 150 \div 200$ °С, эффективная теплопроводность близка к справочной для молекулярной теплопроводности воды: $\lambda_{l,эфф.} \approx 0,65 \text{ Вт/мК}$. Дальнейшее повышение начальной температуры стенки в диапазоне $T_w(0) = (200 \div 400)$ °С приводит к увеличению эффективной теплопроводности $\lambda_{l,эфф.}$ более чем на порядок для всех параметров. Увеличение $\lambda_{l,эфф.}$ с ростом T_{w0} может быть связано с возникновением парового слоя при $T_{w0} \geq 200$ °С между жидкостью из капли и нагретой стенкой и последующим развитием неустойчивости поверхности жидкости, прилегающей к паровому слою, и системы волн, вызывающих возникновение конвективной составляющей теплопроводности жидкости.

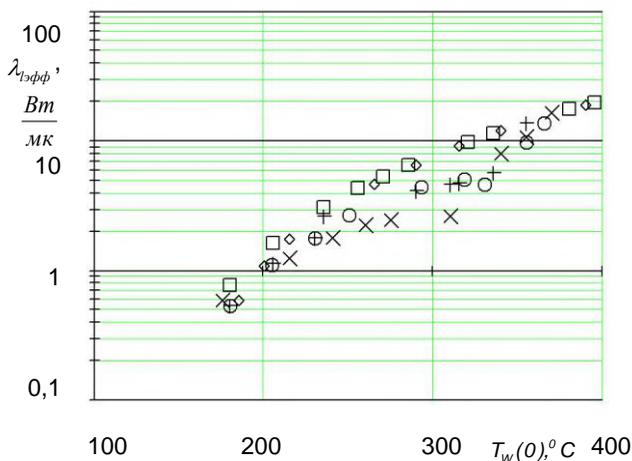


Рис.1. Зависимость величины эффективной теплопроводности от начальной температуры поверхности нагретой стенки

	V м/с	$T_1(0)$, $^{\circ}C$	d , мм	α , град.
× -	32	95	0,3	90
○ -	16	95	0,3	45
+ -	11	95	0,3	45
◇ -	3,2	23	3,2	90
□ -	1,8	98	3,2	90

Таким образом, на экспериментально установлено, что при падении мелких, быстрых капель жидкости на нагретую металлическую стенку в режиме возникновения между жидкостью и нагретой стенкой парового слоя в течение длительности времени фронта падения температуры поверхности нагретой стенки, эффективная теплопроводность, определяемая совместным действием молекулярного и конвективного механизмами теплопередачи, в слое жидкости, прилегающей к паровой прослойке может увеличиваться на порядок и более сравнительно со справочным значением для молекулярной теплопроводности.

Литература

1. Исаченко В.П., Кушнырёв В.И. Струйное охлаждение. – М.: Энергоатомиздат. –1984. – 216с.
2. Авакмян Н.Н., Васильев Н.И., Даценко Е.Н. Определение температурных и временных параметров взаимодействия сильно нагретой металлической стенки и мелких быстрых капель. «Известия ВУЗов. Сев.–Кав. Регион. Техн. науки» 2010, №1 – С. 59 – 63.
3. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергия, 1968. – 423 с.

Использование нейросетей для определения точности решения одномерных задач нагрева граничных условий второго рода при переменных теплофизических свойствах

Главная задача при изучении процесса нагрева тела, построенного в одномерном пространстве – определение точности расчета температурного поля пластины в конце нагрева при граничных условиях второго рода в зависимости от настроечных коэффициентов пакета Ansys. Такими коэффициентами являются время и шаг по пространству. Варьируя настроечные коэффициенты изменяется относительная погрешность вычисления температуры поверхности пластины и температурного перепада по сравнению с аналитическим решением, найденным ранее в пакете MathCad. В приведенном примере расчет осуществлялся только для стали 20, но он также возможен и для других материалов.

Для дальнейшего анализа в качестве метода моделирования пластины выбран метод на основе нейронных сетей с использованием пакета NeuroSolution. Нейронная сеть используется тогда, когда неизвестен точный вид связи между входами и выходами [1]. В данном случае результаты расчета нагрева одномерной пластины посредством теплового потока зависит от выбора настроечных коэффициентов, с помощью которых были построены номограммы, используемые для эффективности решения задач на стадии ее постановки. Их преимущество заключается в создании точного результата на основе ранее полученных данных, удобстве использования, а также в возможности обрабатывать информацию в зависимости от марки стали, тогда как номограммы сделанные другими способами не могут обеспечить таких возможностей.

Итоговую модель, обученную и протестированную, можно использовать для определения размера шага по пространству и по времени в зависимости от марки стали [2] и заданной погрешности вычислений температурного поля в конце нагрева.

Литература

1. **Нагорная О.Ю., Горбунов В.А.** Использование нейросетей для обработки экспериментальных данных. Метод. указания. – Иваново: ИГЭУ, 2006.
2. **Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок: монография / В.А. Горбунов; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». - Иваново, 2011 – 476 с.

О зависимости расхода топлива от производительности газовой нагревательной печи

В литературе пока еще нет достаточно четкого ответа на важный для теории и практики вопрос: "Где находится минимум зависимости $b(\tau_k)$ удельного расхода топлива b на нагрев садки металла массой M от заданного конечного времени нагрева τ_k ?" В одних работах утверждается, что минимальный удельный расход топлива на нагрев металла требуется при наибольшей производительности или при наискорейшем для данных условий времени нагрева $\tau_{кн}$. В других работах указывается, что с ростом производительности увеличивается удельный расход топлива на нагрев металла.

Рассмотрим методику аналитической оценки зависимости $b(\tau_k)$.

Удельный расход топлива b , $\text{м}^3/\text{кг}$, для проходных (методических), секционных печей и печей периодического действия выразим из уравнения баланса теплоты рабочего пространства печи:

$$b = \frac{(I_m + I_n) / M}{i_t - i_{yx}}, \quad (1)$$

где i_t – энтальпия продуктов сгорания, учитывающая химическую и физическую теплоту топлива и воздуха на горение, $\text{Дж}/\text{м}^3$ (м^3 топлива, здесь и далее объемы газов даны при нормальных условиях); i_{yx} – энтальпия уходящих газов, $\text{Дж}/\text{м}^3$ (м^3 топлива); I_m – количество теплоты, затраченной на нагрев садки металла, Дж ; I_n – количество теплоты, теряемой из рабочего пространства через кладку (ограждение), окна и в водоохлаждаемые элементы печи, Дж .

На динамику изменения функции $b(\tau_k)$ в основном влияют только две величины I_n и i_{yx} . Представим эти параметры функциями времени нагрева τ_k .

Потери теплоты выразим через средний поток теплоты, теряемой теплопередачей Q_n

$$I_n = Q_n \cdot \tau_k, \quad (2)$$

где $Q_n = q_n \cdot F \cdot \omega$, Вт , q_n – средний за время нагрева удельный поток теплоты, $\text{Вт}/\text{м}^2$ (м^2 кладки), F – площадь обогреваемой поверхности металла, м^2 , ω – степень развития обмуровки, $\omega = F_{\text{кл}} / F$, $F_{\text{кл}}$ – площадь внутренней поверхности кладки, м^2 . При наличии потерь теплоты через окна и водоохлаждаемые элементы печи, величины q_n , $F_{\text{кл}}$ и ω должны приводиться к условиям теплопередачи через кладку.

Энтальпия уходящих газов зависит от температуры уходящих газов T_y

$$i_{yx} = c \cdot u \cdot T_y, \quad (3)$$

где c – теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м³·К), u – удельный объем продуктов сгорания одного м³ топлива, м³/м³.

В общем случае величины q_n и c зависят от температуры газов (режима нагрева) и следовательно от времени нагрева. Примем, что эти зависимости для качественного (приближенного) анализа несущественны.

Наибольшие проблемы вызывает описание зависимости температуры уходящих газов T_y от конечного времени нагрева, которая должна снижаться при увеличении τ_k . Рассматривалось несколько вариантов выражения функции $T_y(\tau_k)$. Был принят весьма приближенный способ выражения T_y через средний перепад температур между газом и металлом $\Delta T_{г-м} = I_m / (\tau_k \cdot \alpha \cdot F)$:

$$T_y = T_{my} + I_m / (\tau_k \cdot \alpha \cdot F), \quad (4)$$

где α – приведенный коэффициент теплоотдачи от газов к металлу Вт/(м²·К), T_{my} – среднеинтегральная температура поверхности металла за время нагрева τ_k для секционных печей и печей периодического действия, или температура поверхности металла в районе отвода продуктов сгорания (начало методической зоны).

Выразим зависимость $b(\tau_k)$, подставив формулы (2), (3), (4) в (1):

$$b = \frac{(I_m + Q_n \cdot \tau_k) / M}{i_m - cv \cdot (I_m / (\tau_k \cdot \alpha \cdot F) + T_{my})} \quad (5)$$

Используя выражение (5) можно классическим методом определить минимум функции $b(\tau_k)$ и время $\tau_{ко}$, при котором расход топлива будет минимален. Более наглядным может быть численное исследование функции $b(\tau_k)$ при различных значениях параметров, характеризующих условия нагрева металла.

Исследование функции $b(\tau_k)$ и положения ее минимумов позволило определить параметры, которые сокращают оптимальное время нагрева (увеличивают оптимальное значение производительности):

- увеличение потерь теплоты теплопередачей,
- снижение калориметрической температуры сгорания топлива $T_{кал} = i_T / (c \cdot u)$;
- увеличение интенсивности теплоотдачи к металлу α ,
- снижение температуры уходящих газов, за счет организации их отвода из низкотемпературной (методической) зоны и уменьшения T_{my} (см. (4)).

На основании выполненных исследований можно полагать, что величина оптимального времени существенно зависит от условий нагрева, поэтому обобщающие утверждения, такие как наискорейший нагрев является оптимальным – некорректны. Свидетельствовать о величине оптимальной производительности можно только для конкретной печи и конкретных условий ее работы (свойства металла, схема отвода продуктов сгорания, величина потерь теплоты теплопередачей, состояние тепловой изоляции и др.).

Для определения более достоверных значений $t_{к0}$ следует использовать более сложные математические модели, или результаты промышленных испытаний, или статистические данные о работе печи.

Приведенные выше приближенные формулы можно применять лишь для качественной оценки взаимосвязей параметров печей. Их целесообразно использовать также в учебном процессе при изучении простейшей математической модели тепловой работы печи и оценки степени влияния параметров на удельный расход топлива. Выполнение исследований по формулам (2)...(5) будет достаточно наглядным и потребует простейших программных средств.

Некоторые зависимости, характеризующие процессы теплообмена можно уточнить. При определении среднего за время нагрева удельного потока теплоты можно учесть его зависимость от температур кладки и газа по формулам [1], а для описания взаимосвязи температур металла и газа можно использовать закономерности нагрева термически тонкого тела или тела умеренной массивности при линейном изменении температуры газа [2]. Для описания зависимости $c \cdot u$ от температуры газа можно применить формулы [3]. Однако при таком усложнении математического описания функции $b(t_k)$, аналитическое определение оптимального времени $t_{к0}$ станет невозможным.

Литература

1. **Соколов А.К.** Математическое моделирование нагрева металла в газовых печах / А.К. Соколов; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 396 с.
2. **Казанцев Е.И.** Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 367 с.
3. **Лебедев А.Т.** Аналитический метод определения температур и энтальпий воздуха и продуктов сгорания энергетических топлив / А.Т. Лебедев, Л.А. Баранов // Изв. вуз. Энергетика. – 1972. – № 3. – С. 53–57.

УДК 66. 041

Е.Н. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент;
Н.Е. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент;
М.В. ЛОПАТИНА,
М.С. ЦВЕТКОВА, студенты
(ИГЭУ) г. Иваново

Тепловой баланс туннельной печи для обжига кирпича

Известны работы по печам и сушилам керамического и силикатного производств [1,2], в том числе появившиеся сравнительно недавно [3÷6], в которых освещены вопросы определения материального и теплового балансов теплотехнологических агрегатов. Однако, информации о реальных тепловых балансах туннельных печей недостаточно.

Нами выполнены работы по испытанию туннельной печи ЗАО «Норский керамический завод» (г. Ярославль). Целью теплотехнологического испытания было измерение основных параметров работы печи и составление теплового баланса.

По результатам испытаний был рассчитан тепловой баланс туннельной печи. Статьи теплового баланса измерялись в кВт. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_{\text{тл}} + Q_{\text{оп}} + Q_{\text{ф}} + Q'_k + Q'_e + Q_{\text{вз}} = \\ = Q''_k + Q_{\text{изв}} + Q_{\text{исп}} + Q''_e + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{вг}} + Q_{\text{неучт}} \end{aligned} \quad (1)$$

где в приходе: $Q_{\text{тл}}$, $Q_{\text{оп}}$, $Q_{\text{ф}}$, Q'_k , Q'_e , $Q_{\text{вз}}$ - соответственно теплота горения топлива и опилок, тепло топлива физическое, тепло загружаемых изделий, тепло вагонеток на входе и теплота воздуха, поступающего в печь; в расходе: Q''_k , $Q_{\text{изв}}$, $Q_{\text{исп}}$, Q''_e , $Q_{\text{пов}}$, $Q_{\text{ух}}$, $Q_{\text{вг}}$, $Q_{\text{неучт}}$ - соответственно тепло керамических изделий, разложения известняка, на испарение и нагрев влаги, потери тепла с уходящими вагонетками, наружными поверхностями печи, теплота уходящих газов, горячего воздуха из зоны охлаждающихся изделий.

При измерении параметров работы печи использовались современные приборы с внутренней памятью и выходом на ПК, в том числе газоанализатор ДАГ-500, многоканальный регистратор «Терем-4», автономный миниатюрный регистратор температуры ТЛ-01, инфракрасный пирометр излучения С-300, тепловизор IRISYS 1011.

Теплотехническое испытание имело ряд особенностей: детальное измерение теплотерь в окружающую среду наружной поверхностью кладки печи; обследование наружных поверхностей печи с помощью тепловизора; измерение величины газовых потоков; измерения в контрольном канале температурных полей; подробное изучение коэффициента расхода воздуха в зонах подготовки и обжига керамических изделий.

Результаты расчета теплового баланса печи, приведенные на рис. 1 показали, что удельный расход условного топлива на обжиг керамических изделий составляет 230 кг.у. т. на 1000 шт. усл. кирпича. Производительность печи линии «В» по обожженным изделиям в испытаниях составила 7486 кг/ч. На рис. 1 дана схема Санкея теплового баланса печи линии «В», где для сравнения в скобках приведены числа по печи линии «С».

Основная доля тепла в приходной части – химическая энергия сжигания топлива 90,0 % (80,5 %). В расходной части теплового баланса расход тепла с охлаждающим воздухом составляет ~ 9,9 % (25,8) %, потери тепла с уходящими газами ~ 37,5 % (34,6 %), теплотери через кладку печи ~ 17,1 % (19,2 %). Велика в тепловом балансе печи доля тепла, теряемого с уходящими газами: 37,5% (34,6%), хотя температура уходящих газов достаточно низкая (120 °С ÷ 140 °С), что сильно

затрудняет утилизацию теплоты газов, содержащих водяные пары, а также окислы серы, углерода, азота.

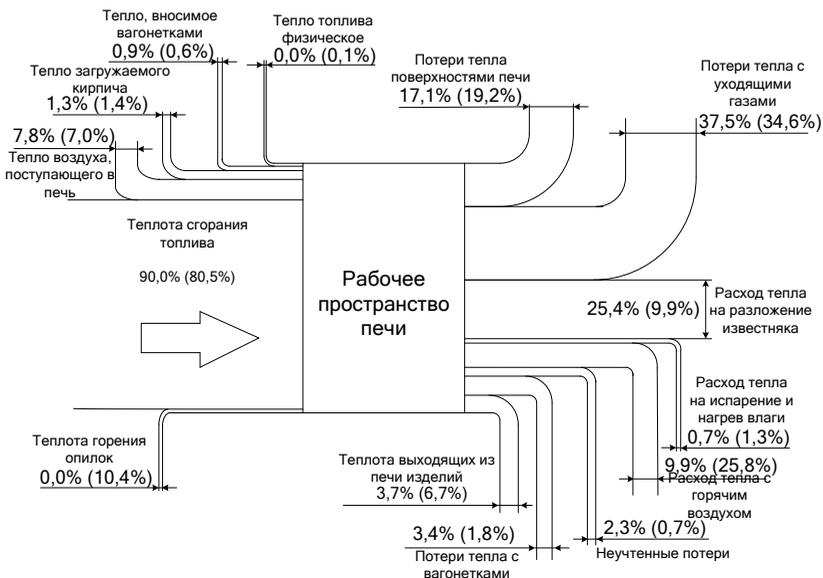


Рис. 1. Схема Санкея теплового баланса печи линии «В» («С»)

Коэффициент расхода воздуха по результатам газового анализа на выходе из печи за дымососом $\alpha_{вз}$ изменялся в наших экспериментах от 6,3 до 9,0 (по проекту $\alpha_{вз} = 7,0$), тогда как для горения достаточно иметь величину порядка $\alpha_{вз} = 1,15$. Если удастся снизить подсосы воздуха в зоне подогрева керамических изделий, то экономия топлива может быть существенной – до 20 ÷ 25 %. Такое направление экономии топлива является, на наш взгляд, основным.

Вторым по значению направлением экономии топлива является уменьшение теплотерь через ограждения рабочего пространства печи, которые сравнительно велики - 17,1 %. Температура садки изделий на выходе из печи высока (при измерениях ~ 128 °С). Доля тепла выходящих из печи изделий ~ 3,7 % может быть уменьшена ~ в 1,5 ÷ 2 раза. Доля теплоты горячего (~ 330 °С) воздуха составляет сейчас только ~ 9,9 %.

Выводы.

1. Разработана методика теплотехнологических испытаний туннельной печи для обжига керамических изделий.

2. Выявлены направления экономии энергоресурсов, среди которых основными являются потери тепла с уходящими газами и снижение теплотерь через ограждения печи. Это может привести к экономии 25 ÷ 30 % газообразного топлива.

Литература

1. **Гинзбург Д.Б.**, Деликишкин С.Н., Ходоров Е.И., Чижский А.Ф. Печи и сушилки силикатной промышленности / Под ред. Будникова П.П. – М.: Госстройиздат, 1963.–344с.
2. **Левченко П.В.** Расчет печей и сушил силикатной промышленности. – М.: Высшая школа, 1968. 368 с.
3. **Химическая** технология керамики: Учеб. пособие для вузов / Под ред. проф. И.Я. Гузмана. – М., ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. – 496 с.
4. **Гнездов Е.Н.**, Марченко Ю.И., Гущина А.В., Кулинич Е.Г., Медведева Н.В. Мониторинг температурного поля в сушилке керамических изделий. //Строительные материалы. – 2008. – № 4.С.39-41.
5. **Гнездов Е.Н.**, Марченко Ю.И., Пережигин Е.А. Разработка и внедрение измерительно-регистрирующего комплекса для мониторинга процесса сушки керамических изделий. // Строительные материалы. – 2007. – № 2.С.74 -75.
6. **Гнездов Е.Н.**, Гнездов Н.Е., Марченко Ю.И., Пережигин Е.А., Лопатина М.В., Цветкова М.С. Технологический энергоаудит туннельной печи для обжига керамических изделий. // Строительные материалы. – 2012. - № 5. С. 54-58.

УДК.536.24

Г.А. ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ асп.;
В.А. ГОРБУНОВ к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Моделирование процессов в роторе-регенератора

Роторный двигатель – родовое наименование конструкции теплового двигателя, за которым стоит целое семейство близких по конструкции двигателей, объединенное ведущим признаком – типом движения главного рабочего элемента.

Разработка такого рода теплового двигателя, использующего в качестве привода не утилизируемую и бросовую энергию тепловых и атомных станций, является приоритетной разработкой в области энергосбережения.

Рабочий элемент двигается вокруг главной оси, на которой расположен ротор двигателя. Внешний вид ротора – генератора показан на рис. 1.

Рабочее колесо ротора-генератора закреплено на валу, с которого снимается крутящий момент. Внутри рабочего колеса располагаются камеры, заполненные рабочей легкокипящей жидкостью. Расположение и внешний вид камер показаны на рис. 2.

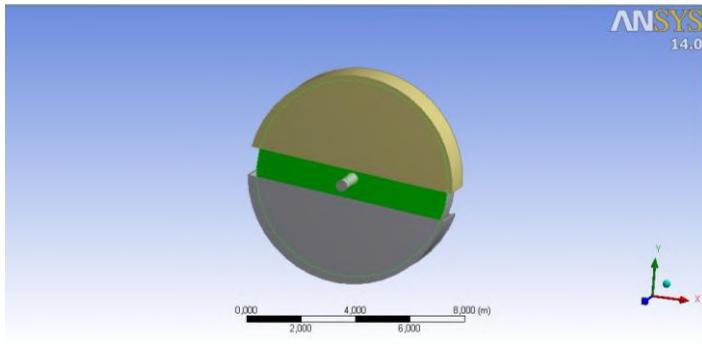


Рис. 1. Внешний вид ротора-регенератора

В данной работе рассматривается модель теплового двигателя, работающего за счет изменения плотности легкокипящей жидкости при нагреве и охлаждении. Прототипом для создания модели является работа [1].

Для упрощения инженерных расчетов примем следующие допущения:

- 1) В камере № 1 жидкость полностью сконденсирована
- 2) В камере № 3 жидкость полностью перешла в газообразное состояние
- 3) В камерах № 2 и 4 жидкость находится в переходном состоянии, 50% газообразного состояния и 50% жидкого состояния.

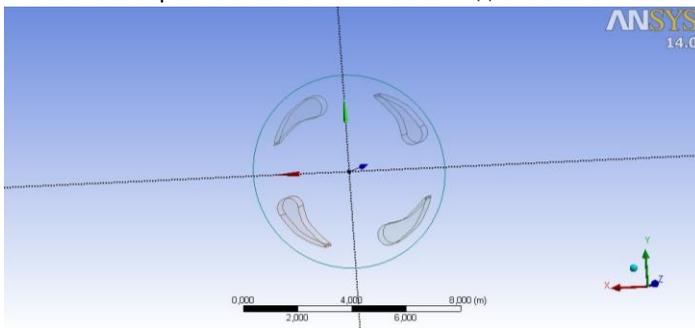


Рис. 2. Расположение и внешний вид камер

На рис. 3 показаны основные силы и точки их приложения, действующие на камеры.

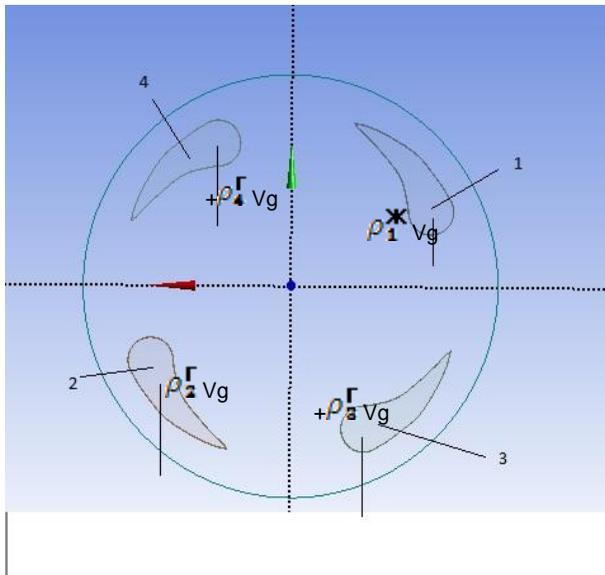


Рис. 3. Силы, действующие на камеры

Выводы: полученную модель можно использовать при моделировании вращающихся теплообменников, в которых для привода используется тепловая энергия.

Литература

1. А.с. № 1254272 СССР, МКЧ F28 D19/04 F23 L 5/02. Ротор генератора / Л.А.Бровкин, В.А.Горбунов, Л.С.Крылова. - № 38530031/24-06; заявл. 11.02.85; опубл. 30.08.1986, Бюл. №12. – 3с.

УДК 66. 041

Е.Н. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент;
А.С. НИКИТИН, М.С. ЦВЕТКОВА,
А.В. АНДРЕЕВ, студ.;
(ИГЭУ) г. Иваново

Определение тепловых потерь печи для обжига лицевого кирпича ЗАО «Норский керамический завод»

Для определения теплотерь в окружающую среду через кладку печи ее поверхность разбивали на 14 участков. Схема печи с границами участков приведена на рис. 1. Температуры на наружных поверхностях кладки печи измерялись инфракрасным пирометром излучения С-

300 и проставлялись на схемах поверхностей печи (рис. 2), где также указаны номера позиций.

Потери тепла по участкам в кВт определялись по формуле:

$$Q_{\text{пот}i} = \alpha_i \cdot F_i \cdot (t_{\text{ср}i} - t_{\text{oc}}) \quad (1)$$

где α_i – коэффициент конвективной теплоотдачи от i -го участка наружной поверхности печи в окружающую среду с учетом лучистой составляющей [1], Вт/(м²·°С).

Для каждого расчетного участка печи значения температур усреднялись. С помощью данных температур и других параметров (размеры участков, температуры окружающей среды) мы находили потери тепла от поверхностей печи в окружающую среду. Также на всех позициях с помощью тепловизора были проведены замеры температур с целью выявления наиболее горячих областей. Наиболее горячие участки на поверхности печи фиксировались на фотографических и тепловизионных снимках.



Рис. 1. Схема деления наружной поверхности печи на участки 1,2,3 – боковые левые, 7,8,9 – боковые правые, 4,5,6 – сводовые, 10,11,12 – подовые, 13,14 – торцевые

На рис. 2 показана схема печи с изображенными на ней заштрихованными участками, температура которых выше 40 на боковой поверхности печи и 60 на своде зимой и летом. Такая схема помогает понять, какие участки требуют изоляции.

Результаты расчета теплотерь приведены в табл.

Таблица. Потери тепла наружными поверхностями печи

№ участков	F, м ²	t _{ср} , °C	t _{окр.ср} , °C	$\Delta t = t_{ср} - t_{окр.ср}$, °C	α_1 , Вт/м ² ·°C	Q, кВт
1 лев	170,28	35,60	23,87	11,73	10,507	20,99
2 лев	238,73	41,93	31,87	10,06	10,739	25,79
3 лев	204,62	31,90	24,83	7,06	9,857	14,26
4 свод	283,51	55,46	32,00	23,46	13,792	91,73
5 свод	397,49	61,44	34,00	27,44	14,335	156,35
6 свод	340,70	63,44	32,60	30,84	14,581	153,20
7 прав	170,28	34,78	23,33	11,45	10,440	20,35
8 прав	238,73	48,20	25,75	22,63	11,785	63,13
9 прав	204,62	40,20	19,10	21,10	11,268	48,65
10 под	283,51	71,95	58,66	13,29	7,950*	29,95
11 под	397,49	121,20	56,23	64,97	9,790*	252,83
12 под	340,70	139,88	54,69	85,19	10,56*	306,50
13 верт. стенки	сумма: 27,69	25,37	20,50	4,87	стенки: 9,181 торец: 9,181	сумма: 1,24
13 свод	20,16	27,60	20,50	7,10	10,766	1,54
14 верт. стенки	сумма: 24,98	25,87	22,00	3,87	стенки: 9,019 торец: 9,019	сумма: 0,87
14 свод	15,12	30,10	22,00	8,1	11,056	1,35
Итого	3358,6					1188,63

* - только лучистая составляющая

По таблице видно, что наибольшие потери тепла происходят на своде печи (участки 5 и 6) и через под печи, который охлаждается воздухом (участки 11 и 12).

Литература

1. Левченко П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности. М.: Высшая школа, 1968, 368 с

О.И. ГОРИНОВ к.т.н., зав. кафедрой;
 О.Б. КОЛИБАБА к.т.н., доцент;
 Р.Н. ГАБИТОВ асп.;
 М.В. ЛОПАТИНА студ.
 (ИГЭУ), г. Иваново

Метод определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя твердых бытовых отходов в процессе термической переработки в реакторе

Процесс уничтожения твердых бытовых отходов (ТБО) посредством термического разложения, как правило, осуществляется в печах шахтного типа (термореакторах), работающих в слоевом режиме. Слой ТБО представляет собой сложную многокомпонентную изменяющуюся в процессе нагрева пористую структуру, обладающую некоторыми эффективными теплофизическими свойствами. При интенсивном нагреве в таких структурах происходят сложные физические и химические процессы, которые могут существенно повлиять на характеристики внутреннего тепло- и массопереноса. Взаимосвязь таких процессов не позволяет использовать традиционные формулы для определения теплофизических свойств пористых тел [1].

Для расчета температурного поля слоя ТБО можно воспользоваться основным дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\text{эф}} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $a_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент температуропроводности слоя ТБО.

Для определения эффективного коэффициента температуропроводности пористой структуры (слоя ТБО) предлагается расчетно-экспериментальный метод, основанный на решении обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) [2], и не требующий знания параметров внешнего теплообмена. Эксперимент сводится к нагреву пористого образца произвольным, но монотонно изменяющимся тепловым потоком с замером кривых изменения температуры обогреваемой поверхности $T(R, \tau)$ и теплового центра $T(0, \tau)$. Обработка эксперимента осуществляется по методу дискретного удовлетворения краевых условий (ДУКУ) [3], в соответствии с которым на некотором отрезке времени τ_k решается система:

$$T\left(R, \frac{\tau_k}{g}\right) - T\left(0, \frac{\tau_k}{g}\right) = \sum_{n=1}^g A_n \cdot \Phi_n\left(\frac{a \cdot \tau_k}{R^2 \cdot g}\right), i = 1, 2..g \quad (2)$$

$$T(R, \frac{\tau_k}{g} \cdot i) = T_0 + \sum_{n=1}^g A_n \cdot \left(\frac{a}{R^2} \cdot \frac{\tau_k}{g} \cdot i \right)^n, \quad i = 1, 2, \dots, g \quad (3)$$

где значения $T\left(R, \frac{\tau_k}{g} \cdot i\right)$ и $T\left(0, \frac{\tau_k}{g} \cdot i\right)$ берутся непосредственно из экспериментальных кривых $T(R, \tau)$ и $T(0, \tau)$.

Решением систем (2) - (3) находится эффективный коэффициент температуропроводности в виде постоянной величины для структуры с известной порозностью. Изменяя порозность и повторяя эксперимент, определяется зависимость эффективного коэффициента температуропроводности от порозности слоя. Задача решалась с использованием программного пакета MathCAD.

По предлагаемому методу можно определить коэффициент эффективной температуропроводности пористой структуры с последующим использованием для расчета температурных полей в процессе термической переработки в реакторах.

Литература

1. **Дульнев Г.Н.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк //Л., Энергия. 1974. -264с.
2. **Алифанов О.М.** Обратные задачи теплообмена / О.М.Алифанов // М., Машиностроение. 1988. - 280 с.
3. **Крылова Л.С.** Проектирование и эксплуатация теплотехнологических установок кузнечно-термического производства машиностроительных заводов: Учебное пособие / Л.С.Крылова // Иваново, ИГЭУ. 2001. – 96с.

УДК 621.438

В.А. ГОРБУНОВ к.т.н., доцент;
О.Ю. НАГОРНАЯ асп.
(ИГЭУ) г. Иваново

Сравнение нейросетевого и регрессионного моделирования для утилизационной турбины ГУБТ-25

Целью работы является сравнение современного нейросетевого моделирования с наиболее известными методами статистического анализа для прогнозирования выработки электроэнергии газовой утилизационной бескомпрессорной турбины ГУБТ-25 ОАО «Северсталь» при изменении различных параметров доменного газа, влияющих на мощность турбины применительно к реальным условиям работы газотурбинной расширительной станции газового цеха ОАО «Северсталь».

Для выбора математического метода по моделированию режимных параметров была исследована информация большого количества экс-

периментальных данных [1] с целью выявления определенных закономерностей и взаимосвязей между варьируемыми параметрами, которые затем можно применить к новым совокупностям данных. Этот процесс, включал три основных этапа: исследование, построение модели и ее проверку. В итоге необходимо получить зависимость искомой функции от переменных.

Основное внимание уделялось поиску решений, на основе которых можно было бы строить достоверные прогнозы. При этом используются не только классические приемы разведочного анализа данных, которые включают основные статистические методы, а также более сложные, специально разработанные методы многомерного анализа, предназначенные для отыскания закономерностей в многомерных данных, но и такие методы, как нейронные сети, которые позволяют строить достоверные прогнозы, не уточняя конкретный вид тех зависимостей, на которых такой прогноз основан.

Нейронные сети являются естественным инструментом для построения эффективных и гибких информационных моделей инженерных систем. Нейронные сети – это класс аналитических методов основанный на идее воспроизведения процессов обучения мыслящих существ и функций нервных клеток. Нейронные сети могут прогнозировать будущие значения переменных по уже имеющимся значениям этих же или других переменных, предварительно осуществив процесс так называемого обучения на основе имеющихся данных [2].

В настоящее время нейросетевые технологии с успехом используются для анализа данных, поэтому необходимо их сопоставить с хорошо разработанными статистическими методами. Для меры точности методов используют среднюю абсолютную относительную ошибку (MAPE), также известную как среднее абсолютное процентное отклонение (MAPD). Ошибка выражает точность в процентах и определяется по формуле:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Z(t) - \hat{Z}(t)|}{Z(t)} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где N – количество значений функции; $Z(t)$ – фактическое текущее значение функции, $\hat{Z}(t)$ – прогнозное текущее значение функции.

Иногда для сравнения качества прогнозов в статистике используется средняя абсолютная ошибка (MAE). Средняя абсолютная ошибка является общей мерой ошибки прогноза при анализе временных рядов и определяется по формуле

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |Z(t) - \hat{Z}(t)|. \quad (2)$$

В статистике для количественной оценки разницы между прогнозируемыми и истинными значениями в качестве одного из способов используется среднеквадратичная ошибка (MSE) или квадратный корень

из среднеквадратичной ошибки RMSE, которые определяются по формулам:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Z(t) - \hat{Z}(t))^2; \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}. \quad (4)$$

Таблица. **Результаты точности прогнозирования мощности турбины**

Критерии определения точности методов	MAPE	MAE	MSE	RMSE
Линейная регрессия	3,726	0,6021	0,6896	0,8304
Множественная регрессия	1,182	0,1952	0,07830	0,2798
Нейросеть (многослойный перцептрон)	1,009	0,1663	0,06423	0,2534

Проведённая оценка точности нейросетевого моделирования по сравнению с линейным (~ 70÷73%) и множественным ((~ 10÷18%) регрессионным моделированием показывает преимущество нейросетевого моделирования при решении задач энергоэффективности (табл.).

Литература

1. **Нагорная О.Ю., Горбунов В.А.** Использование нейросетевого подхода для получения режимных карт работы турбины ГУБТ-25 / О.Ю. Нагорная, В.А. Горбунов // Вестник ИГЭУ. – 2006. – №4. – С. 64–66.
2. **Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок: монография / В.А. Горбунов; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 476 с.

УДК 667.24

В.Н. ДОРОФЕЕВ к.т.н., доцент
(ВлГУ) г. Владимир
В.Ф. НИКИШОВ к.т.н., доцент;
В.Ю. ПРОНИН к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Применение энергоэффективных технологий в жилищно-коммунальном секторе экономики

В современных экономических условиях вопросы ресурсо-энергосбережения в различных отраслях экономики стоят на первом месте; причем происходит активное освоение технических возможностей в данном направлении.

В мировом и отечественном жилищно-коммунальном хозяйстве в настоящее время доминирует два вида потребляемой энергии: горячее водоснабжение и отопление (на их долю приходится около 2/3 суммар-

ного объема потребления энергии); доля приготовления пищи составляет от 10 до 13%, остальное приходится на долю освещения. Если в европейских странах на энергопотребление зданий расходуется 20-22% от общего потребления тепловой энергии, то в России эта величина равна 43-45%.

В России потенциал экономии энергоресурсов (энергосбережения) в жилищно-коммунальном хозяйстве оценивается величиной порядка 68,6 млн. тонн нефтяного эквивалента (т н.э.), также является значительной его величина в строительном комплексе. Применение новых энергоэффективных технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве и в строительной сфере и замещение «грязных» энергоносителей (в частности, органического топлива) на более «чистые», эффективные их виды (солнечная, геотермальная, биоэнергия, энергия ветра и др.) позволят существенно (на 32-41%) сократить общее энергопотребление этого сектора.

Перспективными энергетическими технологиями в существующих и строящихся зданиях являются тепловые насосы и системы солнечных отопительных систем (пассивных и активных), доля которых выросла до 16% от общей установленной мощности.

Технологии тепловых насосов различаются по виду используемых энергоносителей (воздух, вода, горячие отходы), а также по назначению – для нагрева или охлаждения помещений. Тепловые насосы, предназначенные для превращения низкопотенциального тепла в тепло более высоких параметров, могут использовать испаряюще-компрессорный цикл (с электроприводом) или принцип абсорбции тепла с применением газа или горячих отходов в качестве энергоисточника.

В развитых странах системы теплоснабжения (отопления), использующие в качестве сырья биомассу, достигли высокой эффективности и низких уровней эмиссии парниковых газов при применении однородного сухого топлива – древесных опилок или древесных гранул диаметром 6-8 мм (пеллет), изготавливаемых из размельченной и высушенной древесины (отходов деревообработки: опилки, стружки, обрезки; сухих древесных остатков в лесах) путем прессования, а также при соблюдении постоянного режима работы энергоустановок (благодаря устройству резервных емкостей для аккумуляции тепла).

В энергоустановках малой мощности (от 1 до 5 МВт), предназначенных для целей теплоснабжения (в сфере энергообеспечения коммерческого сектора услуг и жилищного сектора), с использованием биомассы (в качестве топлива) широко применяют технологии сжигания в «кипящем» слое; в пылевидном состоянии при комбинированном производстве тепла и электроэнергии, например, в мини-ТЭЦ; в жидком виде (путем впрыскивания топлива) в котлах с постоянной нагрузкой (в комбинации с дополнительными резервуарами горячей воды); в твердом объемном виде с конвейерной загрузкой топлива (с автоматическим выключением конвейеров по мере роста нагрузки).

В результате применения технологических инноваций по использованию альтернативных источников энергии (солнечной, геотермальной, вентиляционных выбросов, биомассы и других) с применением в схемах энергоснабжения зданий конденсационных, теплонасосных, когенерационных и иных комбинированных установок может быть существенно повышена эффективность энергопотребления (при коэффициенте преобразования энергии в теплоту - КПЭ до 0.35-0.4 и более) до 85-93% и выше, например в конденсационных технологиях.

Таким образом, путем развития и внедрения новых энергоэффективных технологий производства, транспорта, распространения и коммерческого использования энергии различными потребителями, при осуществлении замены «грязных» энергоносителей на более чистые, при применении современных альтернативных технологий для обеспечения энергосбережения на энергопотребляющих объектах (в том числе, в строительном и жилищно-коммунальном секторах) появляются реальные возможности улучшения энергопотребления в экономике страны, и тем самым, повышения ее энергетической и экологической безопасности.

УДК 669.162.252

О.И. ГОРИНОВ к.т.н., зав. кафедрой;
Д.А. ДОЛИНИН аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Исследование процесса очистки доменного газа на математической модели в программном модуле ANSYS FLUENT

С целью оптимизации режимов работы газовой очистки требуется определение технически обоснованных норм расхода орошающей воды в зависимости от расхода доменного газа и от других параметров работы оборудования. При этом экономия воды не должна приводить к ухудшению качества очистки газа. Одним из способов моделирования работы газоочистного оборудования является использование программных комплексов вычислительной гидрогазодинамики (CFD).

Разработаны математические 3D - модели полого форсуночного скруббера для очистки доменного газа, а также его отдельных элементов в программном модуле ANSYS FLUENT. Дополнительно была создана математическая модель пробоотборного устройства для оценки его эффективности и для возможного совершенствования. Созданы твердотельные модели эвольвентных форсунок, направленных вверх и вниз (рис. 1), ярусов орошения скруббера, полого форсуночного скруббера (рис. 2) и заборного устройства (рис. 3). В модуле Design Modeler для модели заборного устройства была подготовлена геометрия обла-

сти течения газа. Построение расчетной сетки производилось в модуле Meshing. Дальнейшие расчеты велись в ANSYS FLUENT.

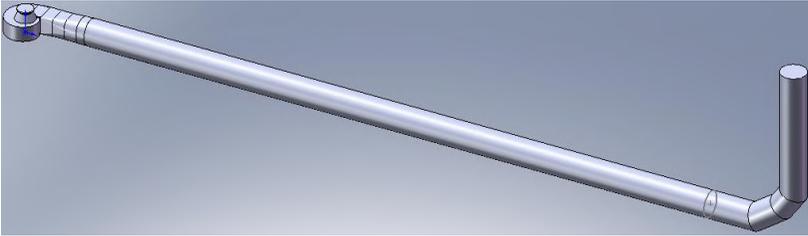


Рис. 1. Внутренний объем форсунки, направленной вверх

На базе разработанной математической модели была изучена работа эвольвентных форсунок, направленных вверх и вниз, проанализированы факелы разбрызгивания воды эвольвентных форсунок и построены их расходные характеристики. Приведено сравнение результатов полученных решением задачи в ANSYS FLUENT с результатами исследований, полученными в демо-версии пакета Flow Vision. Также произведено исследование работы кольца орошения скруббера (рис. 4). Было выявлено взаимное влияние факелов воды друг на друга в поперечном сечении скруббера и получена зависимость степени перекрытия поперечного сечения канала прохождения доменного газа внутри скруббера от расхода воды на кольцо орошения.

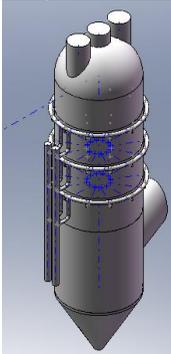


Рис. 2. Модель скруббера

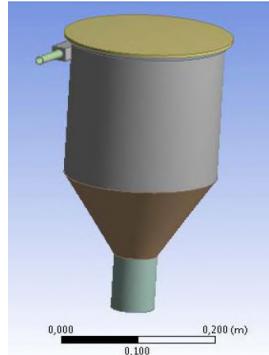


Рис. 3. Трехмерная модель пылеуловителя

Проведен расчет режимов работы скруббера на основании данных эксперимента. В результате получены поля скоростей, поля плотностей, поля концентраций и др. Получена зависимость удельной запыленности доменного газа после скруббера от степени перекрытия фа-

келами воды канала скруббера и зависимость удельной запыленности доменного газа после скруббера от расхода воды на скруббер. По результатам исследований была получена номограмма зависимости степени перекрытия канала скруббера от расхода доменного газа и от расхода воды на орошения скруббера, по которой можно качественно определить степень очистки доменного газа.

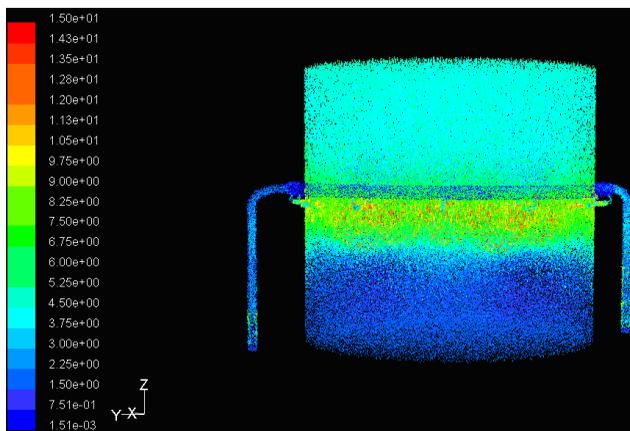


Рис. 4. Распределение скорости газа в продольном сечении модели

Было произведено моделирование движения газа в пылеуловителе с учетом находящихся в газе твердых частиц. Поток доменного газа имеет достаточно сложную трехмерную структуру, обусловленную турбулентностью, наличием твердых включений и капель жидкости. Модуль ANSYS FLUENT позволяет моделировать подобные течения с помощью модели дискретных фаз (Discrete Phase Model - DPM).

На входе в пылеуловитель для газовой фазы задавались скорость и температура. Для твердой фазы (частицы пыли) задавались плотность, массовый расход, размеры частиц и коэффициент распределения. На выходе принималось нулевое давление.

После выполнения расчетов возможна оценка и построение графиков изменения плотности, давления и скорости газа в пылеуловителе. Кроме того, использование DPM позволяет отобразить траектории движения твердых частиц в зависимости от их размера и с учетом взаимодействия между ними (рис. 5).

Полученная модель предназначена для оценки эффективности работы пылеуловителя в зависимости от размеров твердых частиц. Она помогает быстро и наглядно смоделировать движение запыленного газового потока с учетом внесенных в геометрию пылеуловителя изме-

нений. Таким образом, модель может применяться для оптимизации конструкции пылеуловителя.

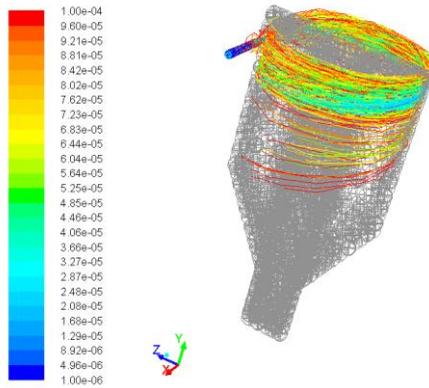


Рис. 5. Траектории движения частиц пыли в зависимости от диаметра

Литература

1. Горинев О.И., Долинин Д.А. Повышение энергетической эффективности мокрой очистки газа в скруббере после доменной печи // VII международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования»: тез. докл. – СПб. 2012. – С. 898-907.

УДК 66. 041

Е.Н. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент;
Н.Е. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент;
М.С. ЦВЕТКОВА, А.С. НИКИТИН,
О.И. ЩЕГОЛЕВА студенты
(ИГЭУ) г. Иваново

Тепловизионное обследование туннельной печи для обжига керамических изделий

В результате проведенных ранее исследований туннельной печи для обжига керамических изделий ЗАО «Норский керамический завод» (г. Ярославль) было выявлено, что существенная часть теплопотерь происходит через участки наружной поверхности кладки печи с повышенной температурой. Причинами появления этих участков могут быть как разрушение внутренних слоев кладки, так и просто нарушение режима работы печи.

Для снижения потерь необходимо идентифицировать места утечки тепла. Такие аномальные по температуре участки наружной поверхности

кладки не определяются визуально, поэтому мы применили тепловизор IRISYS 1011.

Тепловизор IRISYS 1011 позволяет устанавливать ручной или автоматический режим работы. Нами был применен автоматический выбор диапазона температур на тепловизионных снимках.

Одновременно с тепловизионными снимками мы делали фотографические, что упрощало выявление мест расположения участков с повышенной температурой.

На поле тепловизионного изображения можно установить произвольно до 10 точек, в которых будет регистрироваться температура. Мы использовали 9 равномерно распределенных точек, в том числе одну – в центре снимка (соответствующую лазерному целеуказателю, см. рис. 1). Каждая из выделенных точек на тепловизионном снимке обозначена квадратиком своего цвета, таким же цветом кружочками отмечены значения температур в этих точках на вертикальной шкале температур.

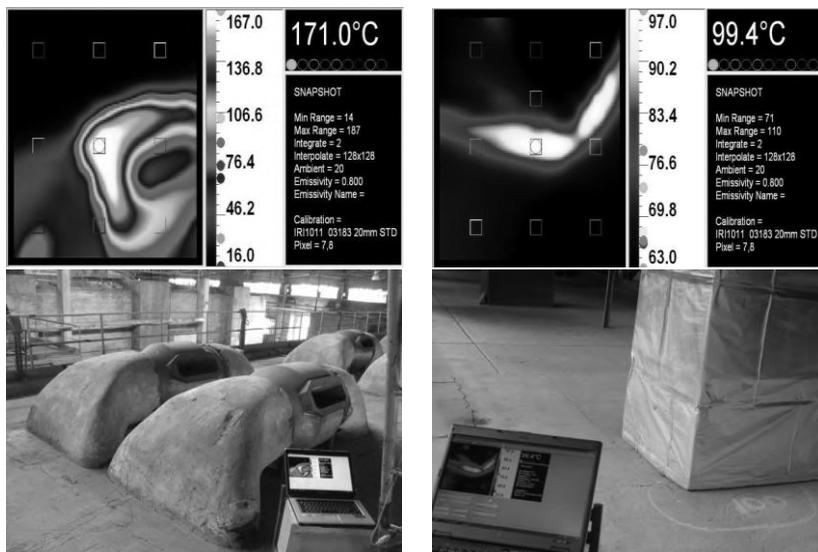


Рис. 1. Фотографическое и тепловизионное изображения участка свода печи.

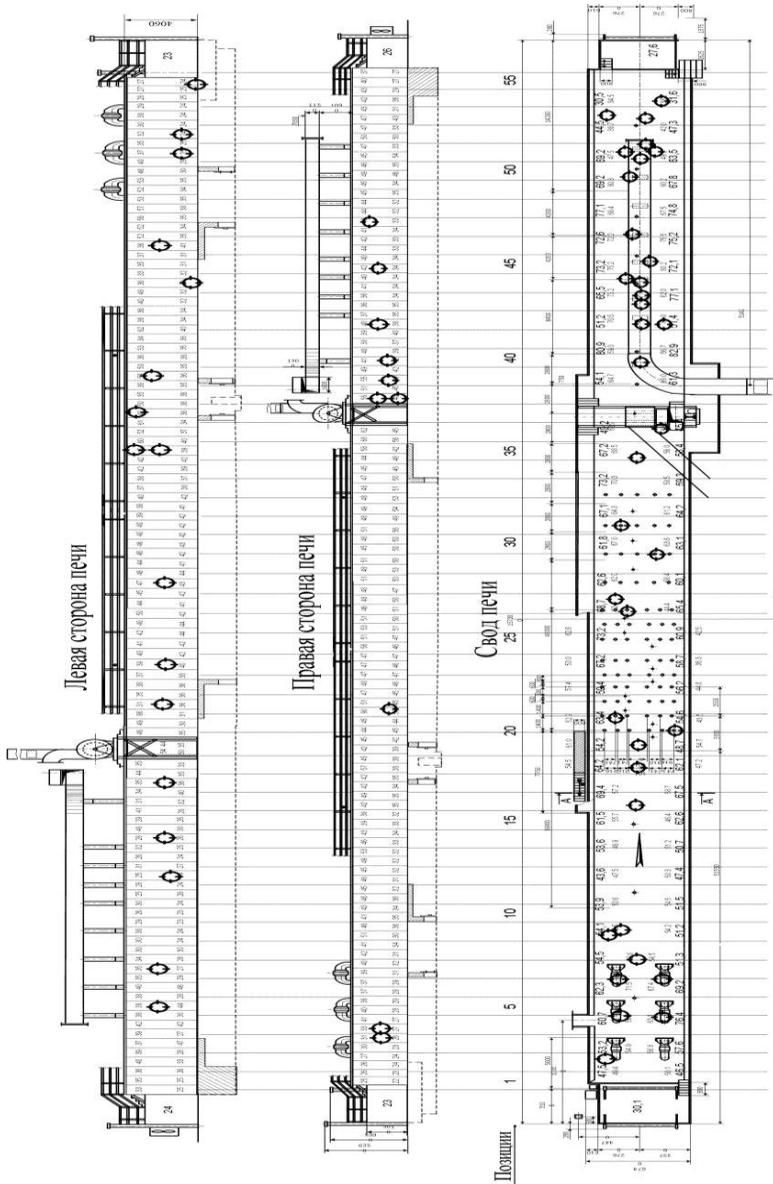


Рис. 2. Расположение аномальных по температуре участков на боковых и верхней поверхностях печи

При поиске аномальных участков в центр тепловизионного снимка помешалась или самая большая, или самая маленькая температура по всему полю. Температура центра тепловизионного снимка изображена в правом верхнем углу. Результаты этих исследований получились в виде набора примерно 80-ти пар тепловизионных и фотографических снимков. На снимках приводились только участки с аномальными температурами с указанием номеров позиций. Следует иметь в виду, что поскольку угол зрения тепловизора достаточно узкий, на фотографическом снимке границы изображения шире. Сравнивая оба вида снимков, необходимо по оранжевой короткой черте идентифицировать на фотографическом снимке центр тепловизионного снимка и по характеру объекта установить примерные границы тепловизионного снимка на фотографическом снимке.

Обнаружены участки стен и свода печи с пятнами повышенной температуры на ровных участках поверхностей, без каких - либо конструктивных узлов. По полученным снимкам с номерами позиций можно определить местоположение аномальных участков, в том числе на ровных поверхностях. По расположению этих участков (рис. 2) с учетом внутренних конструкций следует искать индивидуальные причины таких отклонений (разрушение внутренних слоев кладки, отсутствие теплоизоляции внутри и т.д.).

Выводы

1. Разработана методика применения тепловизора IRISYS 1011 в комплекте с ПК.

2. Получены тепловизионные и фотографические снимки всех участков наружной кладки печи с аномальными температурами, по которым можно планировать ремонт и пути снижения теплопотерь поверхностями

УДК 667.24

В.Н. ДОРОФЕЕВ к.т.н., доцент
(ВлГУ) г. Владимир
В.Ф. НИКИШОВ к.т.н., доцент;
В.Ю. ПРОНИН к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Энергосберегающие технологии в жилых и общественных зданиях

В настоящее время важнейшей задачей в области энергосбережения является снижение объемов энергопотребления и эмиссий парниковых газов в жилищно-коммунальном хозяйстве, что в значительной мере обусловлено применением новых технологий при строительстве жилых и общественных зданий и их изоляции, а также использованием в них

систем отопления, вентиляции и кондиционирования, освещения, водоснабжения и приготовления пищи и др.

Эффективность службы ограждающих конструкций (обмуровки) зданий зависит от уровня их изоляционного обустройства и теплоотдачи стен, окон, потолков, фундамента и пола, подвалов. Инновационные усовершенствования обмуровки обеспечивают возможность снижения потребности зданий в отоплении в 2-4 раза по сравнению со стандартными решениями (с получением экономии в течение короткого отрезка времени).

Модернизация жилых зданий посредством использования современных энергоэффективных технологий (применение новых изолирующих материалов и технических средств в конструкции ограждений) позволяет получить экономию энергии до 80% и сократить издержки на оплату энергии в течение срока их службы.

Большие возможности для энергосбережения заложены в современных конструкциях окон (наличие нескольких слоев стекла, низкотеплопроводящие материалы для рам, использование низкотеплопроводных газов между слоями, специальные покрытия поверхности стекол), обеспечивающих снижение потерь тепла до 20-35% (по сравнению со стандартными двойными и одинарными рамами) и поступление солнечного тепла в здание до 75%. Энергетическая эффективность систем горячего водоснабжения повышается в результате применения новых изоляционных материалов, конденсирующих бойлеров (газовых, с улучшенной изоляцией), тепловых насосов, солнечных водонагревателей (с покрытием тепловой нагрузки на приготовление горячей воды до 60-70% общей потребности).

В современных технологиях создания комфортного микроклимата в помещениях системы воздушного кондиционирования охлаждают, вентилируют и подсушивают внутренний воздух в общественных и жилых зданиях. Энергетическая эффективность воздушных кондиционеров, представленных в наше время на рынке, варьируется весьма существенно: от малоэффективных (с коэффициентом охлаждения на единицу потраченной мощности 1,5 Вт/Вт) до более эффективных (с коэффициентом 6,5 Вт/Вт). К основным направлениям их развития относят использование компрессоров с изменяющейся скоростью, применение новых систем передачи тепла, оптимизация охладителей, контроля их работы и др. По зарубежным стандартам (США, Япония) потенциал повышения энергетической эффективности существующих кондиционеров составляет 30% и выше. В технологии кондиционирования воздуха широкое применение могут найти кондиционеры двойного действия (при сухом и холодном климате), солнечные кондиционеры (при жарком климате с высокой солнечной радиацией), охлаждающие воздух путем его обезвоживания. Среди многих энергоэффективных решений в области кондиционирования воздуха заслуживают внимания решения, основанные на системной интеграции управления энергоиспользованием зданий с одно-

временным учетом спроса на нагрузку как потребителей, так и производителей энергии, так как быстрорастущая (в последние годы) мощность кондиционирования существенно увеличивает пиковую нагрузку энергосистем (в ряде стран с жарким климатом).

В настоящее время в зарубежных странах и в России рассматривают возможности проектирования и строительства жилых и коммерческих зданий (в соответствии со стандартами) с низким (от 60-80 кВт·ч/м² площади для целей отопления и вентиляции) и с “нулевым” (до 15 кВт·ч/м² площади) уровнем энергопотребления и эмиссий углекислого газа (пассивных зданий).

В проектируемых и строящихся (и уже сданных в эксплуатацию) плотных энергоэффективных домах нового поколения (в ряде городов России) заложены современные прогрессивные технические решения, как например, меридиональная ориентация фасада со светопрозрачной конструкцией на стороны света по ходу движения солнца; применение систем вентилируемого и «мокрого» фасада, оконных стеклопакетов с низкоэмиссионными теплоотражающими стеклами, утеплителей («теплая» керамика, ячеистый бетон, пенопласт, базальтовое волокно и другие материалы) в ограждающих конструкциях зданий; приточно-вытяжная вентиляция с рекуперацией (до 60%) тепла выходящего воздуха (в пластинчатых и роторных теплообменниках) для нагрева приточного воздуха и с синхронизированными регулируемым притоком и вытяжкой (воздухообменом) в каждой квартире; автономная система теплоснабжения (с оборудованием АИТ двумя газовыми котлами, вакуумными солнечными коллекторами, теплонасосной установкой (в составе теплового насоса и вертикальных теплообменников, расположенных в грунте); системой накопительных бойлеров для аккумулирования тепловой энергии; обязательный поквартирный учет всех видов поступающей энергии (воды для водоснабжения, тепла для отопления, электроэнергии); установка автоматических терморегуляторов на отопительных приборах.

Таким образом, грамотное применение современных энергоэффективных технологий как зарубежных, так и отечественных позволяет повысить энергетическую эффективность гражданских зданий и обеспечить энергосбережение в ЖКХ и строительстве.

УДК 66. 041

Е.Н. ГНЕЗДОВ к.т.н., доцент;
 М.В. ЛОПАТИНА,
 М.С. ЦВЕТКОВА, А.С. НИКИТИН,
 О.И. ЩЕГОЛЕВА, студ.
 (ИГЭУ) г. Иваново

Определение величины газовых потоков по результатам газового анализа туннельной печи для обжига кирпича

Обжиг кирпича необходимо проводить по заданному технологическому режиму и температуре, так как нарушение режима приводит к браку в изделии и перерасходу газообразного топлива. Холодный воздух, поступающий в рабочее пространство через неплотности в ограждении печи, может снизить температуру, что является недопустимым. Для предупреждения отклонений от установленного режима требуется контролировать величину газовых потоков.

Измерение основных газовых потоков проводились на туннельной печи линии «В» ЗАО «Норский керамический завод» г. Ярославль.

Газовые потоки определялись в местах возможного поступления или отбора газовых сред (рис. 1):

- в подающем воздуховоде (подсос воздуха в контрольный канал из цеха);

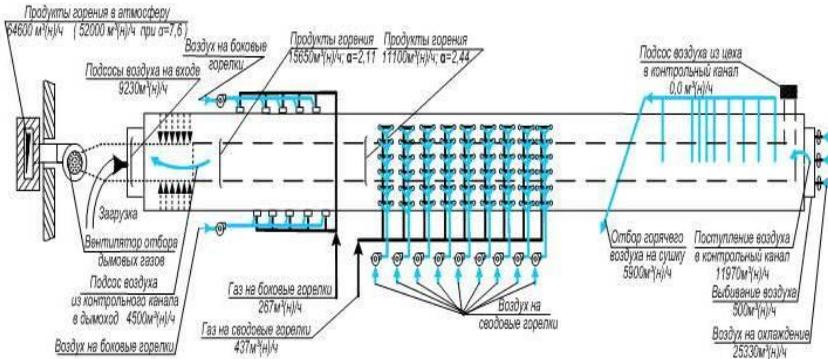


Рис. 1. Схема газовых потоков на печи

- в конце зоны охлаждения (подсос воздуха в контрольный канал из зоны вентиляторов охлаждения кирпича);
- в начале зоны нагрева (отсос воздуха из контрольного канала в дымоход);
- у ворот на входе вагонеток (подсос из цеха в дымоход);
- подача воздуха вентиляторами на охлаждение кирпича;

- выбивания через неплотности у выходных ворот.

Использовались приборы: пневмометрическая трубка ВТИ и микроанометр наклонный ММН-240.

По результатам измерений и расчетов можно сделать вывод, что велики подсосы в зоне нагрева кирпича или в дымовом тракте от печи до дымососа.

Особенностью наших измерений было подробное изучение коэффициента расхода воздуха в зонах подготовки и обжига керамических изделий. Измерения проводились в 9-ти поперечных сечениях рабочего пространства печи (рис. 2.); в каждом сечении газ для анализа отбирался в 6-ти точках: 3 сверху, 3 снизу.

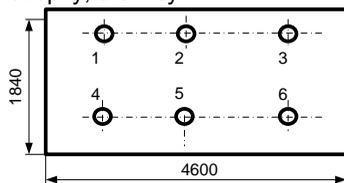


Рис. 2. Схема точек измерения в сечениях печного канала.

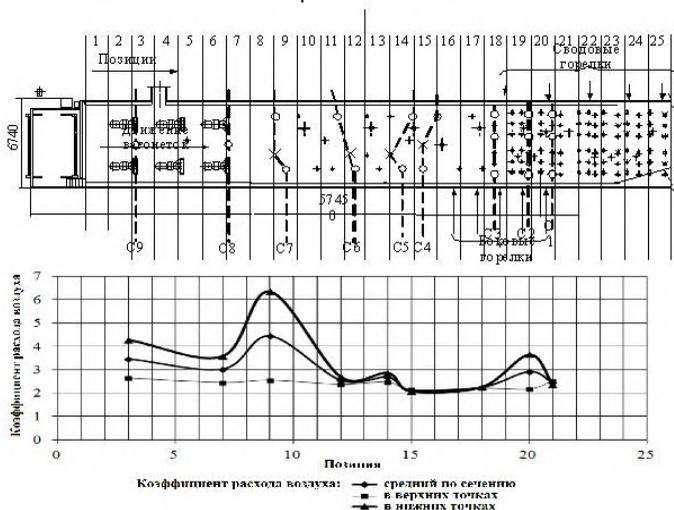


Рис. 3. Схема и результаты измерения коэффициента расхода воздуха по объему печи

Результаты, представленные на графике (рис. 3), показывают, что в зонах сводовых и боковых горелок коэффициент расхода воздуха держится на уровне от 2,0 до 3,0 и только в сечении 7 (позиция 9) есть резкое его увеличение до 6,3 в нижней части рабочего пространства печи, что может свидетельствовать о неплотности ограждения в этом месте.

СЕКЦИЯ «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ»

УДК 681.5:621.311

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

Состояние, проблемы и перспективы развития основных направлений научной школы «Теория и технология АСУТП электростанций»

Современные АСУТП, построенные на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры, относятся к классу территориально-распределенных сложных многофункциональных систем управления. Развитие теории и новой технологии рассматриваемого класса систем управления (в том числе, системообразующие АСУТП электростанций) находится в незавершенной стадии становления (рис.1) [1, 2].

Остаются не разработанными вопросы теоретического обоснования координат сложных технологических объектов управления и соответственно информационного масштаба большой системы. Координаты технологических объектов управления и информационный масштаб системы определяются из опыта, соответственно, имеет место необоснованная, как правило, завышенная стоимость системы, что для АСУТП электростанций является одним из основных определяющих факторов, особенно актуально для новых угольных ТЭС и ТЭС с ПГУ [3].

Известные технические решения контроллерного уровня АСУТП разработаны в середине прошлого века и не отвечают современным требованиям к качеству регулирования, которое существенным образом зависит как от формируемого вектора информации, так и от состояния регулирующей аппаратуры-управляющих систем [4, 5].

Весьма болезненна проблема нестабильного КПД блоков ПГУ при работе в широком диапазоне нагрузок, который существенно критичен как к режиму работы оборудования, так и к внешним факторам, а также проблема учета действия случайных эксплуатационных возмущений. Остаются не разработанными вопросы согласования критериев множества локальных АСР, теории синтеза интеллектуальных функций АСУТП [6-8].

Интегрирующим направлением научной школы является повышение эффективности территориально-распределенных многофункциональных АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры энергоблоков, прежде всего новых угольных ТЭС и ТЭС на основе парогазовых технологий, путем развития теории и новой сквозной («под ключ») технологии сложных систем управления электростанций. Перспективными задачами, решаемыми в рамках общего направления научной школы, являются (рис. 2) [2 -11]:

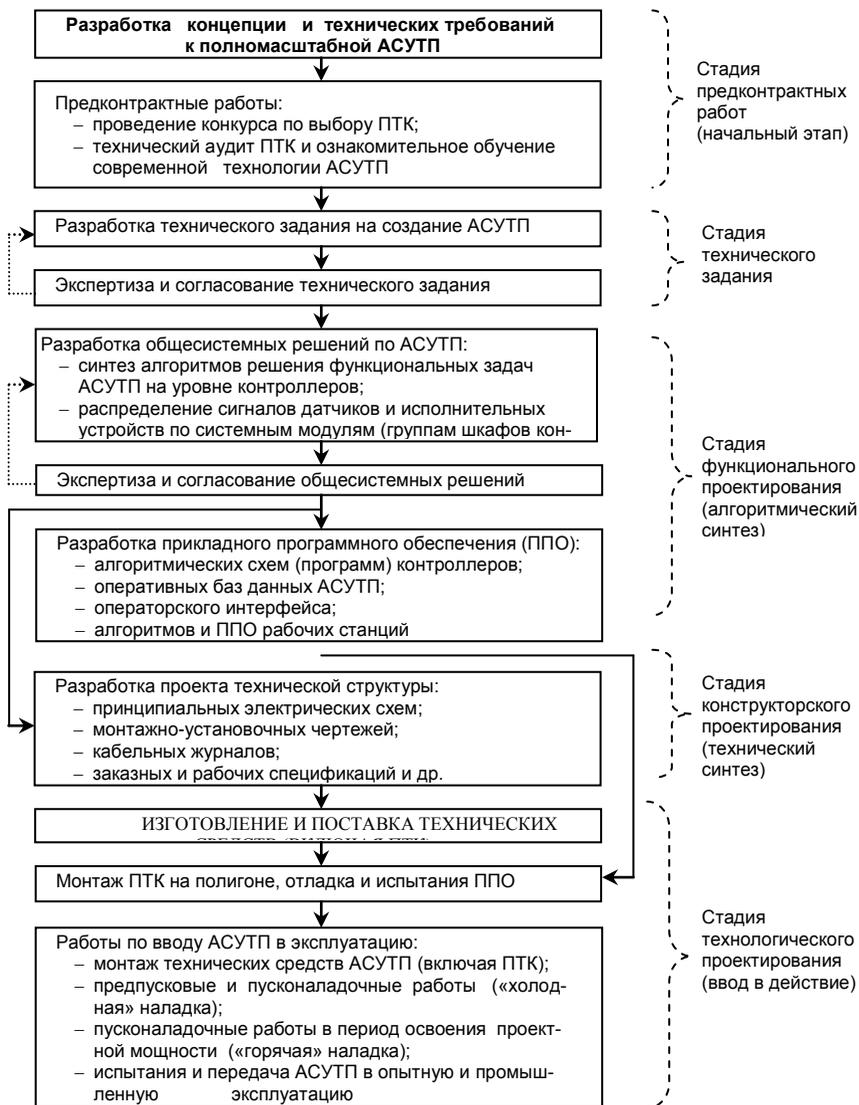


Рис. 1. Основные этапы новой технологии создания АСУТП на базе ПТК

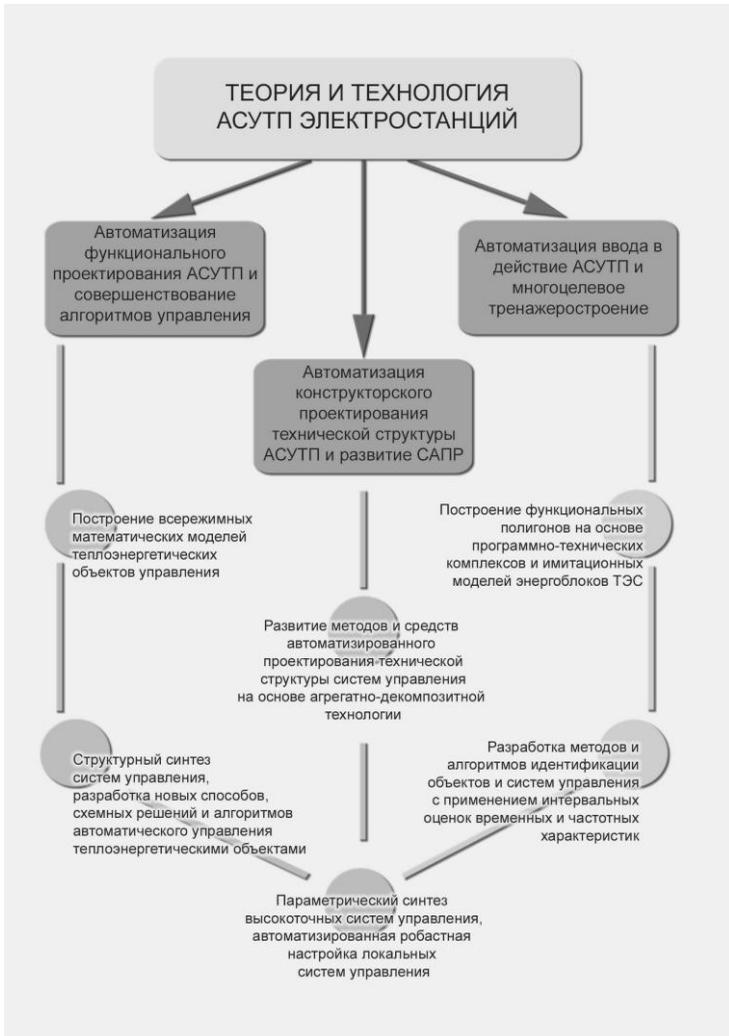


Рис. 2. Задачи научной школы «Теория и технология АСУТП электростанций»

- разработка теории определения (обоснования) управляемых координат технологических объектов, многие из которых не доступны для непосредственного контроля (мониторинга), путем развития методов обобщенного термодинамического анализа эффективности тепломеханического оборудования;

- разработка теории и методов адаптивного управления с эталонными моделями, позволяющие улучшить показатели технической эффективности фундаментальных систем автоматического управления и конкурентоспособность АСУТП (новое поколение локальных систем управления);
- развитие методологии построения нелинейных (всережимных) высокоточных динамических математических моделей оборудования электростанций на основе теории и методов неравновесной термодинамики (феноменологический подход), и использование всережимных динамических моделей реального времени в структуре АСУТП;
- разработка универсальной подсистемы автоматизированного диагностирования (мониторинга) состояния регулирующих клапанов энергоблоков на основе анализа данных архива АСУТП для выявления устранимых и неустраняемых дефектов, повышения информативности оперативного персонала и эффективности автоматизированного управления;
- разработка интеллектуальной (беспоисковой экстремальной) системы оптимизации КПД блока ПГУ на основе использования в структуре системы всережимной математической модели блока;
- разработка методологии системного подхода для согласования множества разнонаправленных локальных критериев в многофункциональной структуре АСУТП путем развития процедур поиска глобального экстремума для многокритериальной многопараметрической системы управления, включающей в себя учет ограничений, накладываемых физическими законами на процессы управления.

Литература

1. **Тверской, Ю.С.** Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов // Теплоэнергетика. – 2010. – №10. – С.37-44.
2. **Технология АСУТП электростанций** / под ред. проф. Ю.С. Тверского // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения». – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – 164 с.
3. **Тверской, Д.Ю.** Обобщенный термодинамический анализ эффективности систем пылеприготовления / Д.Ю. Тверской // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С.39-45.
4. **Тверской, Ю.С.** Исследование и анализ факторов, влияющих на динамические свойства управляющих каналов контроллеров в составе ПТК / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев // Автоматизация в промышленности. – 2003. – №5. – С.5-8.
5. **Тверской, Ю.С.** Регулирующие органы систем управления / Ю.С. Тверской, Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева // Под ред. Ю.С. Тверского / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 184 с.
6. **Тверской, Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого дувания / Ю.С. Тверской. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 256 с.
7. **Тверской, Ю.С.** Методы интервальной оценки частотных характеристик и робастной настройки систем управления / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, Н.А. Агафонова // Под общей ред. Ю.С.Тверского / ГОУВПО «Ивановский государ-

ственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 219 с.

8. **Тверской, Ю.С.** Прикладное обеспечение полигонов АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, А.Н. Никоноров, Д.А. Пронин. – ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 174 с.

9. **Тверской, Ю.С.** «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С. 70-75.

10. **Имитационная** модель пылесистем по схеме прямого вдувания паровых котлов (теоретические основы и технология реализации на полигоне АСУТП) / Ю.С. Тверской [и др.] // Теплоэнергетика. – 2005. – №9. – С. 61-69.

11. **Устройство** подготовки эксплуатационного персонала энергетического оборудования: пат. № 2282248, заявители: Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Голубев А.В., Никоноров А.Н., Харитонов И.Е., заявл. 18.01.2005 № 2005101012, опубл. 20.08.2006. Бюл. № 23.

УДК 621.321

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент,
А.Р. БЕЛЯЕВ, инженер
(ИГЭУ) г. Иваново

Об оценке состояния ЕЭС России

Эффективная организация экономических отношений в сфере электроэнергетики в значительной мере обуславливает бесперебойную, качественную и надежную работу ЕЭС России и технологически изолированных территориальных электро-энергетических систем [1, 2].

Технические свойства энергетических систем определяются высокой скоростью (почти мгновенностью) протекания электромагнитных переходных процессов и невозможностью накопления в экономически значимом количестве основного продукта производства – электрической энергии. ЕЭС России является самостоятельным техническим объектом, поскольку она обладает свойствами, отсутствующими в каждом из составляющих ее элементов. Характерным проявлением таких свойств является живучесть – способность надежно обеспечивать электроснабжение потребителей, несмотря на неработоспособность одного или нескольких объектов электроэнергетики.

Эта особенность системы превращает множество территориально распределенных технических объектов, которые могут находиться на значительном расстоянии друг от друга, в единый функциональный комплекс, все элементы которого влияют друг на друга и взаимодействуют.

Для сохранения и реализации свойств электроэнергетической системы как единого технологического комплекса необходимо:

- при управлении технологическими режимами работы объектов электроэнергетики рассматривать их совместно и принимать управляющие решения в отношении сразу всей совокупности взаимодействующих объектов;
 - включать отдельные объекты в общую систему на основе предварительно выдаваемых технических условий, обеспечивающих возможность синергетического эффекта от взаимодействия объектов.
- Для развития и усиления свойств системности в перспективе необходимо:

- проектировать развитие ЕЭС России как единого технического объекта, обеспечивая скоординированное строительство отдельных объектов генерации и электрических сетей как части общего плана;
- контролировать техническое состояние оборудования объектов электроэнергетики, не допуская непредсказуемого выхода из строя таких объемов генерирующих мощностей и объектов сетевой инфраструктуры, которые могут повлиять на функционирование ЕЭС России в целом.

Организационно-технические мероприятия, обеспечивающие эффективное решение данных задач, реализуются особой инфраструктурной организацией – ОАО «Системный оператор ЕЭС» [3] и с законодательным закреплением его специальной правоспособности.

Однако для более эффективного управления режимами и сохранения запаса устойчивости энергосистем, необходимо уделять внимание не только оценке технического состояния основного тепломеханического и электротехнического оборудования объектов, но и совершенствованию процесса регулирования режима ЕЭС России по частоте, напряжению и перетокам мощности, которое обеспечивает:

- поддержание качества частоты электрического тока;
- обеспечение надежности функционирования энергосистем;
- восстановление плановых обменов мощностью и нормированного качества частоты при возникновении небалансов мощности;
- предотвращение развития аварий, срабатывания автоматической частотной разгрузки (АЧР) и разгрузки энергоблоков при внезапном возникновении небаланса мощности;
- сохранение функционирования электростанций и энергоснабжения потребителей при авариях в энергосистемах путем максимальной мобилизации регулировочной способности всех электростанций аварийного района;
- предотвращение нарушений нормального режима энергосистем ограничением перетоков мощности.

Выполнение этих условий на уровне региональных энергосистем во многом зависит от работы автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) электростанций и электроподстанций, включающих в себя автоматические регуляторы котла, турбины, возбуждения генераторов, синхронных компенсаторов, син-

хронных двигателей, устройства управления режимом работы статических компенсаторов реактивной мощности, устройства регулирования (РПН) трансформаторов при изменении напряжения на шинах генератора и в контролируемых пунктах сети.

На уровне объединенных энергосистем (ОЭС) и ЕЭС России на процесс управления режимом также оказывает влияние работа Централизованных систем (ЦС) и Центральной координирующей системы (ЦКС). На рис. 1 представлена структура иерархической системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ) ЕЭС России, в состав которой входят ЦКС, ЦС, программно-технические комплексы (ПТК) электростанций, осуществляющих регулирование режимных параметров в ЕЭС с помощью групповых регуляторов активной мощности (ГРАМ) на ГЭС и систем автоматического управления мощностью (САУМ) на ТЭС [7].

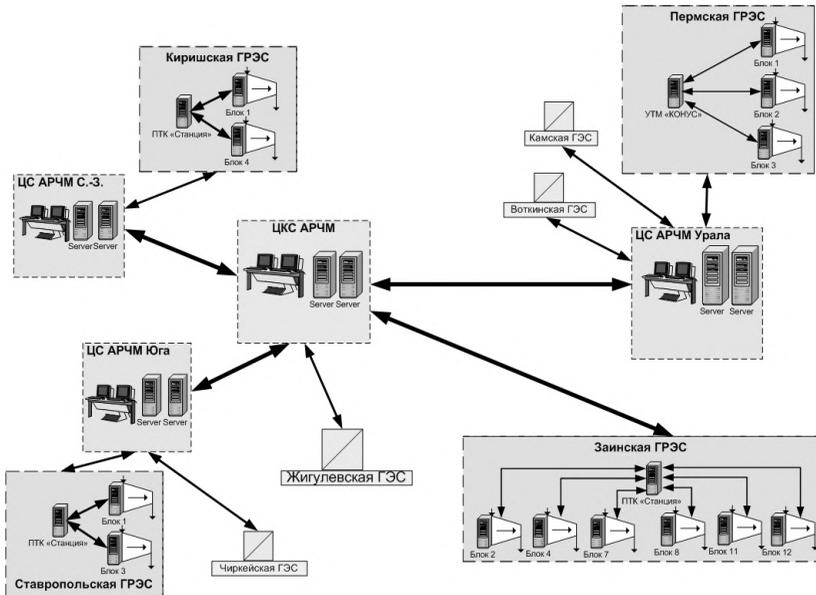


Рис. 1. Структура иерархической системы АРЧМ ЕЭС России [5]

Исходя из вышеизложенного, наиболее перспективным решением задач эффективного управления ЕЭС России является разработка и адаптация математических моделей энергосистем для расчетов и исследования нормальных и переходных режимов, мониторинга статической и динамической устойчивости энергосистемы в реальном времени и ком-

плексной оптимизации электрических режимов по активной и реактивной мощности [4, 5].

Цифровая модель энергообъединения как объекта управления для системы более высокого уровня должна конструироваться из произвольного числа эквивалентных энергосистем, разделенных линиями электропередач [6]. Эквивалентные энергосистемы представляют собой отдельные части энергообъединения с различными динамическими характеристиками. При этом каждая из эквивалентных энергосистем состоит из эквивалентного генератора с несколькими эквивалентными группами турбин. К валу эквивалентного генератора приложена нагрузка вместе с регулирующей мощностью потребителей, генерация эквивалентных групп турбин, а также переток мощности из других энергосистем.

Эквивалентные группы турбин разделяются на несколько регулируемых и одну не регулируемую группу турбин. Регулируемые группы турбин моделируют собой энергоблоки и станции, участвующие в нормированном первичном регулировании частоты (НПРЧ) и автоматическом вторичном регулировании частоты и мощности (АВРЧМ). Не регулируемая группа турбин моделирует все остальные энергоблоки и станции, участвующие в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ).

Используя данный подход, тем не менее, существуют сложности при моделировании, заключающиеся в неравномерности режимно-балансовой ситуации в различных частях Единой энергосистемы России из-за большой ее протяженности и разнотипности оборудования. Поэтому необходимо дополнительно проводить мониторинг переходных процессов с синхронизацией по времени в основных пунктах сети на основе данных системы мониторинга переходных режимов (WAMS).

Кроме того, цифровые модели ОЭС и ЕЭС России могут являться основным инструментом для разработки и исследования алгоритмов управления ЦС и ЦКС АРЧМ ЕЭС России. Это позволит сформировать единство подходов при решении задачи оценки состояния энергосистем, формализовать методики и алгоритмы, тем самым перевести анализ в плоскость рассмотрения объективных факторов и параметров.

Литература

1. **Кудрявый В.В.** Риск преобразований в электроэнергетике / Тез. докл. межд. научн. технич. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2005. – С.15-20.
2. **Копсов А.Я.** Надежность электроснабжения потребителей – приоритетная задача энергетиков московского региона / Тез. докл. межд. научн. технич. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2005. – С.20-27.
3. **Сайт** ОАО «Системный оператор ЕЭС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.so-ups.ru/>.
4. **Сайт** ОАО «Научно-технический центр Единой энергетической системы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ntcees.ru/>.
5. **Сайт** ЗАО «Институт энергетических систем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.enersys.ru/>.

6. **Концепция** регулирования частоты и перетоков в энергообъединении стран СНГ и Балтии. Утверждена Решением Электронетического Совета СНГ от 27 октября 2005 г. № 28.
7. **Приказ** ОАО РАО «ЕЭС России» от 18.09.2002 № 524 «О повышении качества первичного и вторичного регулирования частоты электрического тока в ЕЭС России».

УДК 621.18:62.52

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор;
А.Н. НИКОНОВ, к.т.н., ст. преп.
(ИГЭУ) г. Иваново

О наукоемких этапах технологии создания территориально-распределенных многофункциональных АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры

Создание современных многофункциональных АСУТП осуществляется с применением новой сквозной технологии разработки, проектирования, изготовления, наладки и ввода «под ключ» АСУТП [1, 2].

Наиболее ответственными с точки зрения эффективности разрабатываемой системы являются этапы функционального (алгоритмический синтез) и технологического (ввод в действие и анализ качества) проектирования (рис. 1).

Основное содержание работ на стадии функционального проектирования связано с разработкой алгоритмов реализации наиболее сложных функций АСУТП (автоматическое регулирование, функционально-групповое логическое управление и др.). Принимаемые на данной стадии алгоритмические решения не всегда являются типовыми, отработанными. Поэтому возникает проблема экспериментальных исследований разработанных алгоритмов.

Стадия технологического проектирования (ввод в действие системы) включает в себя: изготовление и поставку технических средств (включая ПТК), проведение полигонных испытаний ПТК, монтаж технических средств АСУТП, предпусковые и пусконаладочные работы, испытания и передачу АСУТП в опытную и промышленную эксплуатацию.

Следует отметить, что полигонные испытания ПТК нацелены на проверку работоспособности программно-аппаратных средств в целом и не распространяются на проверку правильности функционирования собственно алгоритмов контроля и управления.

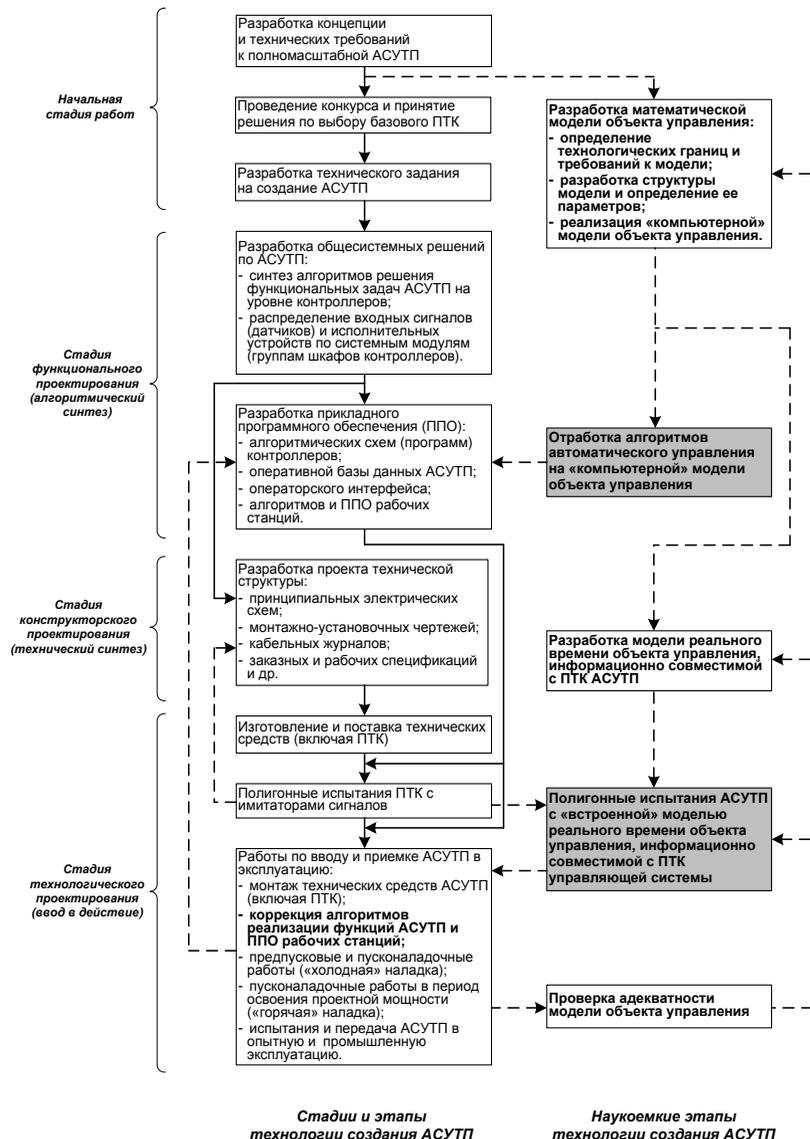


Рис. 1. Современная технология создания АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры (выделены места полигонов в технологии АСУТП)

Высокая вероятность наличия ошибок в большом объеме документации и прикладного программного обеспечения зачастую приводит к необходимости отладки АСУТП на «живом» объекте, что повышает риск повреждения технологического оборудования, увеличивает сроки ввода его в эксплуатацию, тем самым снижая его эффективность.

Для вновь вводимых энергоблоков (например, энергоблоки ПГУ) ситуация дополнительно усугубляется отсутствием достаточного опыта выполнения работ и поставок специалистами отечественных заводо-поставщиков оборудования, а также монтажных, наладочных, проектных и других подрядных организаций. Отечественный и мировой опыт внедрения новых типов энергетического оборудования говорит о том, что их освоение в штатной эксплуатации традиционным путем (постепенной наработкой опыта, методом «проб и ошибок») может затянуться во времени на 5-7 лет и сопровождаться достаточно большими техническими издержками и финансовыми затратами.

Таким образом, решение проблемы, связанной с трудностями обеспечения гарантированного ввода сложных систем управления, поскольку имеют место существенные риски от разного рода экспериментов по отработке алгоритмов управления и соответствующего программного обеспечения на «живом» оборудовании, представляется основной наукоемкой задачей совершенствования сквозной технологии создания АСУТП.

Кроме того, каким бы совершенным не был проектный объем автоматизации, длительная и эффективная работа систем управления зависит от персонала, осуществляющего ввод и эксплуатацию объекта управления. При этом, зачастую, имеет место недостаточное владение оперативным и ремонтным персоналом ТЭС современной технологией создания и эксплуатации АСУТП, как системообразующей структуры энергоблока. Поэтому своевременная (опережающая) подготовка эксплуатационного персонала электростанций является еще одной наукоемкой задачей совершенствования технологии АСУТП.

Эффективным решением отмеченных наукоемких задач является использование специализированных программно-технических средств – полигонов АСУТП [3].

Полигоны АСУТП позволят выполнять отработку сложных алгоритмов управления на ранних стадиях проектирования энергетического объекта и системы управления, а также осуществлять подготовку (переподготовку) различных категорий специалистов по разработке, наладке и эксплуатации АСУТП [4, 5].

Литература

1. **Тверской, Ю.С.** Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов // Теплоэнергетика. – 2010. – №10. – С.37-44.
2. **Технология АСУТП электростанций** / под ред. проф. Ю.С. Тверского // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения». – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – 164с.

3. **Тверской, Ю.С.** «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С. 70-75.
4. **Тверской, Ю.С.** Прикладное обеспечение полигонов АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, А.Н. Никоноров, Д.А. Пронин. – ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 174 с.
5. **Устройство** подготовки эксплуатационного персонала энергетического оборудования: пат. № 2282248, заявители: Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Голубев А.В., Никоноров А.Н., Харитонов И.Е., заявл. 18.01.2005 № 2005101012, опубл. 20.08.2006. Бюл. № 23.

УДК 681.5.017, 681.513.66

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор,
И.К. МУРАВЬЕВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Анализ проблем и особенностей реализации эталонных математических моделей в среде ПТК АСУТП

Современный этап развития электроэнергетики дает АСУТП на базе ПТК новый импульс развития [1,2,3].

Экономическая эффективность энергоблоков и парогазовых установок (ПГУ) в частности, существенно зависит от многих режимных факторов, исследование влияния которых в эксплуатационных условиях практически невозможно, во-первых, по причине существенных рисков, а во-вторых, вследствие невозможности непосредственного контроля многих технологических параметров [5,6].

Решение задачи получения необходимых сведений о состоянии объекта управления может быть получено путем построения и использования всережимных динамических моделей оборудования энергоблоков с последующей интеграцией соответствующих имитационных моделей в среду реального времени ПТК АСУТП. Что позволит совершенствовать АСУТП в направлении интеллектуализации систем автоматизации технологического оборудования [2,3].

Поэтому проблемы «погружения» математических моделей реального времени в вычислительную среду ПТУ АСУТП, исследования особенностей их работы в АСУТП и обеспечения совместной работы модели и объекта актуальны и своевременны.

В качестве интеллектуальной функции понимается некое приложение, используемое на верхнем уровне АСУТП, в роли которого также может быть математическая модель, которая способна параллельно с ходом

технологического процесса (в режиме реального времени) проводить вычисления, анализировать, оценивать, выдавать рекомендации и предсказывать предполагаемое развитие событий (поведение системы) с определенной долей вероятности. При этом математическая модель должна быть в значительной мере универсальной [1], обладать единой структурой и определенной инвариантной частью, которые позволят погружать ее в вычислительную среду ПТК АСУТП для целого класса теплоэнергетического оборудования с минимальной долей надстроек.

Здесь важное место отводится вопросу касающемуся требованиям к построению математических моделей. Таким как [2]: простота реализуемости в системах имитационного моделирования ПТК и универсальными средствами вычислительной техники, открытость структурного построения схемы модели (возможность перехода от упрощенных структур к более полным, учитывающим специфические особенности конкретных установок) [6], перспективность при решении широкого класса задач (управления, диагностики, построения тренажеров, использования их при анализе конструктивно-технологических решений).

Основная трудность моделирования теплоэнергетических объектов состоит в том, чтобы обоснованно выбрать приемлемую степень сложности модели адекватную решаемой задаче и интеграции ее в структуру ПТК.

В настоящей работе реализуется следующий подход (технология) решения задач (рис.1):

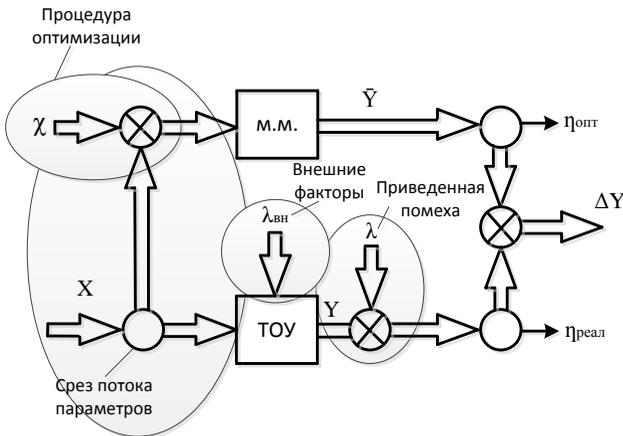


Рис. 1. Технология решения задачи

Этап 1.

Шаг 1. Разработка математической модели.

В основе лежат законы неравновесной термодинамики, что позволяет использовать фундаментальную физико-математическую основу и строго оценить влияние принимаемых допущений на качество результата [6].

Шаг 2. Проверка адекватности математической модели на стадии ее настройки.

Известно, что в большинстве случаев адекватность разработанных моделей проверяют следующим образом [7]. Подают на вход модели (X) тренды, снятые с реального технологического объекта управления (ТОУ). На выходе проводят сравнения результатов модели (\bar{Y}) с выходными трендами ТОУ (Y). Такой подход позволяет получить меру адекватности. Как правило, проверка адекватности модели также взаимно дополняется экспертными оценками специалистов на основании соответствия требованиям, предъявляемым к моделям.

Этап 2.

Шаг 3. Исследование возможных методов передачи информации в модель через шинную систему АСУТП энергоблока посредством инженерной системы в режиме реального времени (ONLINE). Например, для ПТК TELEPERM XP-R – инженерная система ES680, для ПТК «КВИНТ СИ» – рабочая станция «Мезон».

Шаг 4. Настройка нелинейной детерминированной модели объекта на оптимальный режим при заданных внешних условиях.

Шаг 5. Оптимизация режимных параметров объекта по вектору расгласования.

Изложенная технология решения задачи позволяет рассматривать нелинейную динамическую математическую модель объекта как эталонную, настраиваемую на соответствующие режимные условия энергоблока и учитывающую при этом динамические свойства каналов управления.

Литература

1. **Тверской, Ю.С.** О новом классе АСУТП, оснащаемых математическими моделями управляемого технологического оборудования / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: Труды Международ. науч. конф. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – С. 217–220.
2. **Тверской, Д.Ю.** Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации / Д.Ю. Тверской, Ю.С. Тверской // Сб. докл. IV Всеросс. науч. конф. «Управление и информационные технологии». – СПб.: ЛЭТИ, 2006. – С. 230–237.
3. **Куприяновский, В.П.** Энергетика, Smart Grid, интеллектуальные промышленные решения в области энергетики / В.П. Куприяновский, А.Г. Богданов, С.А. Волков, С.А. Снягов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – №4. – С. 12–16.
4. **Тверской, Ю.С.** Имитационная модель пылесистем по схеме прямого вдувания для паровых котлов (теоретические основы и технология реализации в составе АСУ ТП) / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, Д.Ю. Тверской, А.Н. Никоноров, Е.Д. Маршалов // Теплоэнергетика. – 2005. – №9. – С. 61–69.

5. **Тверской, Ю.С.** Математическая модель энергоблока ПГУ-325 и ее использование для расчета КПД установки / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2011. – №5. – С. 12-18.
6. **Тверской, Ю.С.** Создание математической модели и расчет характеристик энергоблока ПГУ / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев // Сборник трудов конференции Моделирование-2012. – Киев, 2012. – С. 297-303.
7. **Тверской, Ю.С.** Локальные системы управления / Учебное пособие // ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 128 с.

УДК 620.9.001.5

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор,
Е.Д. МАРШАЛОВ, к.т.н., ст. преп.
(ИГЭУ) г. Иваново

Разработка адаптивной системы управления с эталонной моделью регулирующей арматуры

В последние годы в энергетике России существенно возросли объемы и интенсивность работ по модернизации систем контроля и управления технологического оборудования тепловых электростанций и внедрению современных АСУТП на базе программно-технических комплексов сетевой иерархической структуры. Общая характерная особенность современного этапа развития АСУТП – это реализация в полном объеме как информационных функций, освоенных ранее традиционными информационно-вычислительными системами, так и управляющих функций, реализующих дистанционное дисплейное (ручное) управление исполнительными устройствами, автоматическое регулирование, логическое (пуск, останов и др.) и аварийное (технологические защиты и блокировки) управление. Современные высокоточные системы управления и АСУТП предъявляют высокие требования к качеству представительности сигналов и позволяют реализовывать эффективные алгоритмы автоматического управления. Поэтому актуальной является задача разработки адаптивной системы управления с эталонной моделью регулирующей арматуры.

В ходе проделанной работы проведены экспериментальные исследования технологического оборудования в целях идентификации каналов регулирования. По полученным оценкам переходных характеристик непараметрическим путем определены параметры настройки регуляторов [1]. Проведены вычислительные эксперименты путем имитационного моделирования АСР как при линейной, так и при нелинейной форме расходной характеристики РО. Подтверждено существенное влияние характеристик регулирующих клапанов на качество работы системы, а именно существенное ухудшение показателей качества переходных процессов.

Известны разные подходы в решении задачи стабилизации показателей качества АСР в условиях неопределенности [2, 3]. Однако все известные подходы направлены на усложнение алгоритма регулирования, что во многих случаях нельзя считать оправданным.

Будем искать решение задачи оптимизации расходных характеристик регулирующих органов в каналах управления движением сред в классе адаптивных систем с эталонной моделью [2–5]. Рассмотрены бесперебойные самонастраивающиеся адаптивные системы управления, в которых процесс отыскания желаемой меры качества работы системы осуществляется с помощью эталонной модели, присутствующей в виде реального стационарного звена, причем работа контуров самонастройки сводится к минимизации некоторой меры ошибки рассогласования движений реальной системы и модели [2].

Основная часть системы рассчитывается из условия устойчивости и оптимальности характеристик для номинальных характеристик объекта и при отсутствии сигнала рассогласования. Нижний контур, включающий в себя модель-эталон проявляет свое действие только в том случае, если характеристики объекта управления отличаются от номинальных. В этом случае проявляется ошибка, на основе которой происходит корректировка степени открытия реального клапана в зависимости от выходного сигнала эталонного РО (рис. 1).

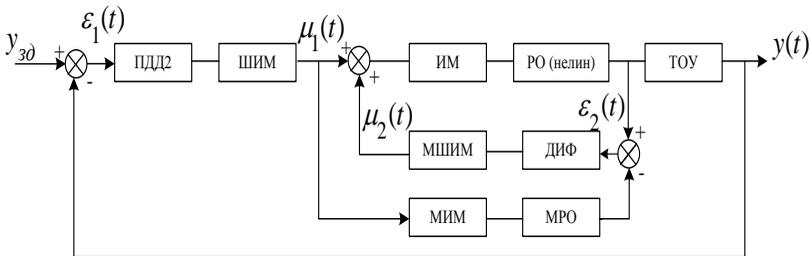


Рис. 1. Расчетная структура адаптивной системы управления с эталонной моделью регулирующей арматуры

Сравним полученные переходные процессы с переходными процессами эталонной АСР с моделью регулирующей арматуры с линейной характеристикой и АСР с моделью регулирующей арматуры с нелинейной характеристикой (рис. 2–3).

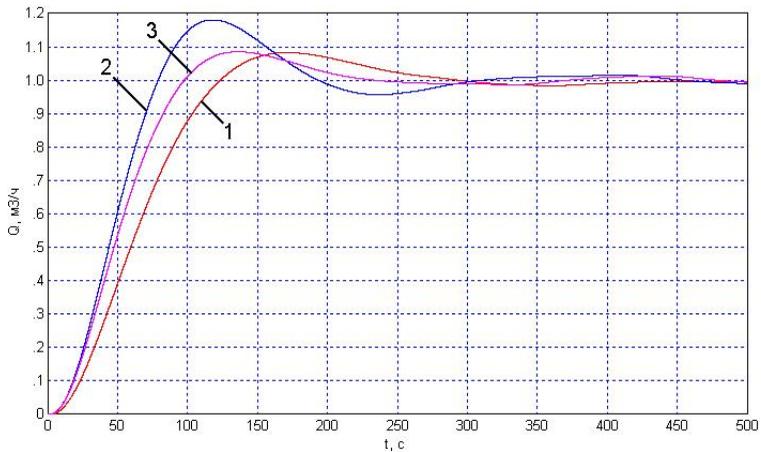


Рис. 2. Переходные процессы изменения расхода коагулированной воды при изменении задания на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$:
 1 – АСР с линейной характеристикой РО; 2 – АСР с нелинейной характеристикой РО; 3 – адаптивная АСР с нелинейной характеристикой РО

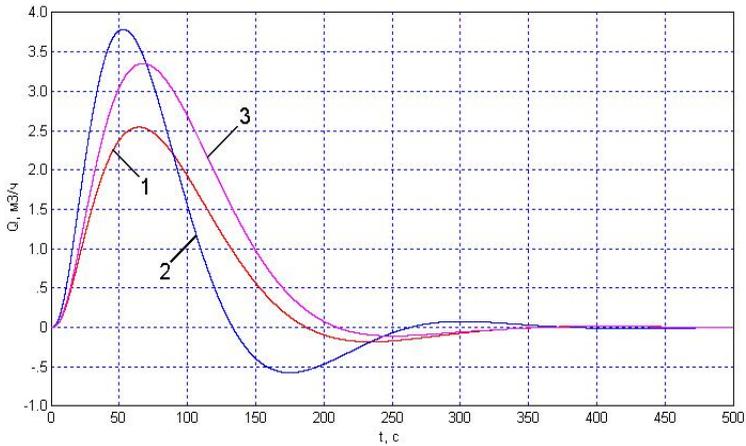


Рис. 3. Переходные процессы изменения расхода коагулированной воды при 10%-м возмущении РО:
 1 – АСР с линейной характеристикой РО; 2 – АСР с нелинейной характеристикой РО; 3 – адаптивная АСР с нелинейной характеристикой РО

Из представленных графиков видно, что предложенный вариант адаптивной системы с эталонной моделью регулирующей арматуры

обеспечивает оптимизацию характеристик регулирующей арматуры путем ее коррекции в реальном времени.

Литература

1. **Тверской, Ю.С.** Методы интервальной оценки частотных характеристик и робастной настройки систем управления / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, Н.А. Агафонова; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 220 с.
2. **Александровский, Н.М.** Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Н.М. Александровский, С.В. Егоров, Р.Е. Кузин; под общ. ред. Н.М. Александровского. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
3. **Аракелян, Э.К.** Оптимизация и оптимальное управление / Э.К. Аракелян, Г.А. Пикина. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 210 с.
4. **Автоматизация** настройки систем управления / В.Я. Ротач [и др.]; под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
5. **Ротач, В.Я.** Адаптация в системах управления технологическими процессами / В.Я. Ротач // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 1. – С. 4–9.

УДК 681.3

Ю.В. НАУМОВ, вед. инженер,
Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н. профессор
(ИГЭУ)

Математическое обеспечение функции диагностирования характеристик регулирующей арматуры в системах управления энергоблоков

В настоящее время большинство создаваемых и существующих тепловых электростанций (ТЭС) оснащаются современными автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры, эффективность которых существенно зависит от уровня используемых функций [1].

При автоматизации технологических объектов управления и создании полномасштабных распределенных АСУТП особые требования предъявляют к регулирующей арматуре [2]. На вид расходной характеристики канала регулирования влияет множество факторов. Некоторые типы регулирующей арматуры имеют существенно нелинейные расходные характеристики из-за конструктивных особенностей.

Несмотря на высокую степень многофункциональности современной АСУТП, функция мониторинга текущего состояния регулирующей арматуры отсутствует. При этом одной из важнейших функций ПТК является непрерывная цифровая регистрация дискретных и аналоговых сигналов, поступающих с датчиков при эксплуатации системы. И формируемые

архивы сигналов потенциально содержат огромное количество полезной информации. Однако существующие программно-инструментальные средства, в большинстве своем оставшиеся неизменными с предыдущего технологического поколения АСУТП, не способны адекватно оценить и обрабатывать архивные массивы данных. В результате происходит снижение эффективности АСУТП.

Поэтому задача разработки программно-методических средств диагностики характеристик регулирующих органов в системах управления энергоблоков по трендам сигналов, архивируемых ПТК, является своевременной и востребованной [2]. Особенно остро проблема диагностики регулирующей арматуры стоит в настоящее время, поскольку при закупках арматуры энергоблоков предпочтение отдается стоимостным критериям [3], что в итоге приводит к увеличению числа дефектов, трудностям в реализации функций управления и к крайне неэффективной работе локальных систем управления в составе АСУТП.

Разработка программно-методического комплекса включает в себя создание методики диагностирования расходных характеристик регулирующей арматуры и разработку нового программно-инструментального средства, основанного на теоретически корректных алгоритмах, учитывающих особенности регистрации, обработки и хранения трендов промышленных сигналов в архиве ПТК.

В настоящей работе для решения задачи оценки статических характеристик РО по трендам архива АСУТП разработан алгоритм двухэтапного взвешенного усреднения по множеству реализаций анализируемого показателя, который может быть сведен к выполнению четырех шагов [4,5].

ШАГ 1. Предварительная обработка экспериментального сигнала регулируемой величины с целью получения выборочных реализаций, соответствующих статическому режиму измерения и удовлетворяющих заданным технологическим ограничениям.

ШАГ 2. Получение оценки статической характеристики путем применения двухэтапного взвешенного усреднения по множеству реализаций анализируемого показателя.

ШАГ 3. Построение статистических оценок на статическую характеристику в виде доверительных интервалов.

ШАГ 4. Сглаживание полученных оценок средних характеристик расхода с помощью линейной или нелинейной аппроксимации.

На рис. 1 приведен пример получения расходных характеристик РО по трендам сигналов, регистрируемых ПТК АСУТП. Эксперимент проведен на основе сигналов расхода питательной воды в барабан низкого давления первого котла-утилизатора и указателя положения регулирующего органа – питательного клапана. Тренды сняты с ПТК энергоблока ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2 филиала ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС». Приведенный клапан относится к группе регулирующих клапанов первого полублока (КУ-1, ГТУ-1). Диагностирование выполняется по трендам сигналов, полученным в режиме штатной эксплуатации оборудования.

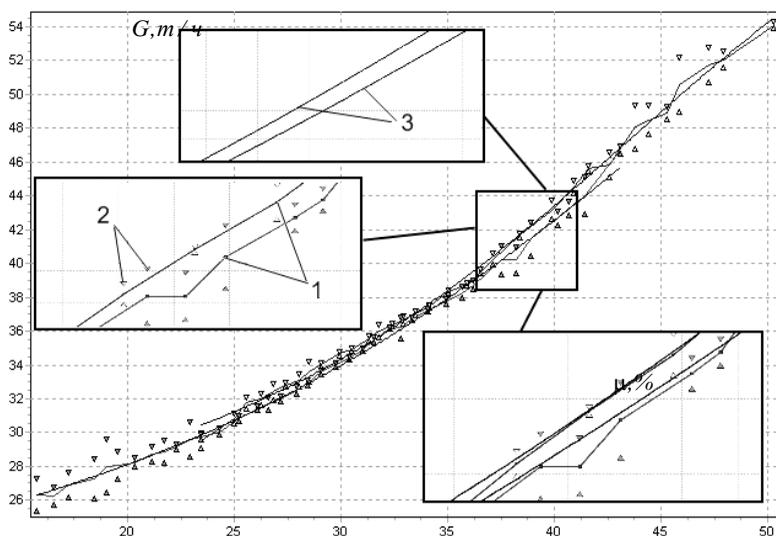


Рис. 1. Построение расходных характеристик регулирующих органов:

- 1 – точечные средние оценки расходной характеристики для положений РО;
- 2 – доверительные интервалы на точечную оценку расходной характеристики;
- 3 – нелинейная аппроксимация точечной оценки расходной характеристики.

В результате диагностирования получены оценки расходных характеристик, на основе которых выявлены основные дефекты или другие проблемные вопросы диагностируемых РК. В случае клапана расхода питательной воды в барабан низкого давления первого котла-утилизатора (рис. 1) наблюдается небольшая нелинейность расходной характеристики и люфт в пределах 1.5%. Излишнего перетяга клапана и начального пропуска не наблюдается. Однако исходные тренды сигналов позволили получить расходную характеристику в рабочем диапазоне хода исполнительного механизма 15%-51%, и для получения характеристики за пределами данного диапазона необходимо проведение дополнительных испытаний.

Результаты диагностирования позволяют сделать вывод, что клапан требует сервисного обслуживания, но поскольку люфт незначителен и других критических проблем не наблюдается, то ремонтные работы по данному клапану не являются первоочередными.

Литература

8. **Тверской, Ю.С.** Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов // Теплоэнергетика. – 2010. – №10. – С. 37-44.

9. **Тверской, Ю.С.** Диагностирование характеристик регулирующей арматуры в системах управления энергоблоков / Ю.С. Тверской, Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, С.А. Бушмакин, М.Ю. Соловьев, И.Е. Харитонов, Ю.В. Наумов // Теплоэнергетика. – 2012. – №2. – С. 51-57.
10. **Какузин, В.Б.** Обзор рынка энергетической арматуры. – М.: Филиал ОАО "Инженерный центр ЕЭС" – фирма ОРГРЭС, 2007.
11. **Агафонова, Н.А.** Аппроксимация характеристик регулирующих органов нелинейными по параметрам моделями / Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, Ю.В. Наумов // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 4. – С. 65–69.
12. **Агафонова Н.А.** Интервальные оценки характеристик объектов управления на основе архивных трендов сигналов, регистрируемых ПТК АСУТП / Н.А. Агафонова, Ю.В. Наумов, С.А. Таламанов // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: Труды Междунар. науч. конф. «CONTROL–2008». – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 144-148.

УДК 681.5.017

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор,
А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент,
А.А. ЯБЛОКОВ, аспирант
(ИГЭУ) г. Иваново

Математическая и имитационная модели паровой турбины К-1000-60/3000 энергоблока АЭС

В настоящее время абсолютное большинство функционирующих и вновь строящихся тепловых и атомных электростанций (ТЭС и АЭС) страны оснащаются современными автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры. При этом ПТК служит системообразующей основой единой информационно-технологической среды АСУТП и энергоблока. Для современной АСУТП характерны охват широкого класса технологического оборудования и реализация средствами ПТК всех основных функций системы (как информационных, так и управляющих) Совершенствование алгоритмического обеспечения сложных функций, таких как работа энергоблока в переменных режимах, оптимизация этих режимов, позволяет вскрыть резервы повышения маневренности энергоблоков ТЭС и АЭС. Задача повышения маневренности особенно актуальна для АЭС в связи с ростом их удельной доли в общей структуре генерирующих мощностей и необходимостью привлечения мощных энергоблоков для участия в регулировании общественных параметров [1, 2].

Проведение экспериментальных исследований на реальном оборудовании достаточно трудоемко и связано с эксплуатационными рисками нарушений нормального режима энергоблока. В настоящей работе зада-

ча решается путем проведения вычислительных экспериментов на математической модели паровой турбины К-1000-60/3000 (рис. 1).

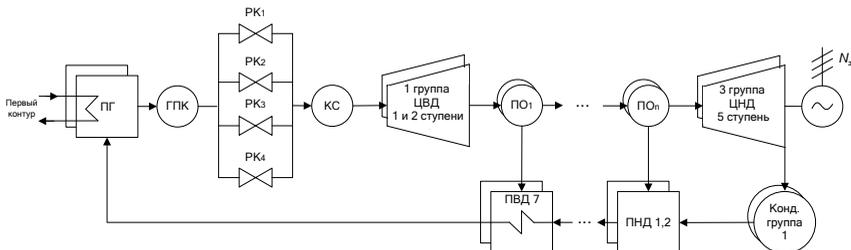


Рис. 1. Расчетная технологическая схема модели паровой турбины К-1000-60/3000: ГПК – главный паровой коллектор, РК - регулирующий клапан, КС – камера смешения, ЦВД – цилиндр высокого давления, ПО – паровой объем, ПВД – подогреватель высокого давления, ПГ – парогенератор

Основная трудность моделирования состоит в том, что необходимо не только разработать математическую модель, адекватную решаемой задаче, но и обоснованно выбрать приемлемую степень сложности модели для интеграции в структуру ПТК. В связи с этим при разработке модели был произведен переход от модели с распределенными параметрами к модели с сосредоточенными параметрами.

При выводе уравнений, описывающих процессы в паровой турбине, принимались следующие допущения:

- 1) основная масса металла сосредоточена в окрестностях рассматриваемых камер отбора, т.е. теплообмен между рабочим телом и металлом происходит в паровом объеме;
- 2) передача тепла за счет теплопроводности в металле ротора и статора пренебрежимо мала;
- 3) в режиме работы турбины под нагрузкой потери мощности на трение в подшипниках и вентиляционные потери значительно меньше внутренней мощности турбины и не оказывают заметного влияния на изменение угловой частоты вращения.

Проточная часть паровой турбины представлена последовательно условных элементов, в которые входят группы ступеней рабочих лопаток и промежуточные паровые объемы, соответствующие камерам отборов или камерам межцилиндровых пространств (рис. 1). Тепловой процесс в j -ом паровом объеме представляется следующим образом: пар из предыдущего $j-1$ парового объема с давлением $p_{пУЭПТ(j-1)}''$ и энтальпией $h_{пУЭПТ(j-1)}''$ проходит через группу ступеней в рассматриваемый паро-

вой объем. Затем в этом объеме происходит теплообмен между паром и металлом и отвод пара в отбор, и последующий отсек турбины [3].

Особенность разработанной математической модели паровой турбины заключается в учете внешних возмущений со стороны подогревателей низкого, высокого давлений и конденсаторных групп, динамики изменения энтальпии пара в паровом объеме [4].

Разработанная математическая модель паровой турбины включает уравнения, описывающие процесс расширения пара в проточной части турбины, уравнения динамики ротора и активной мощности электрогенератора.

Внутренняя мощность турбины равна сумме мощностей цилиндров турбины:

$$N_{ПТ} = N_{ЦВД} + N_{ЦНД1} + N_{ЦНД2} + N_{ЦНД3} + N_{ЦНД4}. \quad (1)$$

Внутренняя мощность цилиндра равна сумме мощностей отсеков цилиндра. Мощность отсека определяется по формуле:

$$N_{омс} = D_{омс} \Delta h_{омс} \eta. \quad (2)$$

Условный элемент паровой турбины описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_{пгспт(j)}}{dt} &= \frac{(D'_{нзэпт(j)} - D''_{нзэпт(j)} - D_{нопт(j)})}{\rho''_{пгспт(j)} \cdot V_{нопт(j)} \cdot \beta_{пнопт(j)}}, \\ D'_{нзэпт(j)} &= \gamma_{нзэпт(j)} \cdot \sqrt{\frac{(\rho''_{пгспт(j)})^2 - (\rho''_{пгспт(j+1)})^2}{\rho''_{нзэпт(j)} \cdot \upsilon''_{нзэпт(j)}}, \\ D_{нопт(j)} &= \psi_{рк(j)} \cdot \bar{F}_{рк(j)} \cdot \sqrt{\rho_{нопт(j)} \cdot (\rho_{нопт(j)} - \rho_{пов(j)})}, \\ \frac{d}{dt} (\rho''_{нзэпт(j)} \cdot h''_{нзэпт(j)}) &= h''_{пгспт(j)} \cdot D'_{пгспт(j)} - h''_{нзэпт(j)} \cdot D''_{нзэпт(j)} - h_{нопт(j)} \cdot D_{нопт(j)} - Q_{п-мзэпт}, \\ \frac{dT_{мсмпт(j)}}{dt} &= K_{мсмпт(j)} \cdot (\bar{D}_{нзэпт(j)})^{0.8} \cdot (\theta''_{нзэпт(j)} - T_{мсмпт(j)}) - K_{воздмсмпт(j)} \cdot (T_{мсмпт(j)} - \theta_{впт}), \\ \frac{dT_{мпомпт(j)}}{dt} &= K_{мпомпт(j)} \cdot (\bar{D}_{нзэпт(j)})^{0.8} \cdot (\theta''_{нзэпт(j)} - T_{мпомпт(j)}), \\ h''_{пгспт(j)} &= h'_{нзэпт(j)} - (h'_{нзэпт(j)} - h''_{пгспт(j)} (p''_{пгспт(j)}, s'_{нзэпт(j)})) \eta_{пгспт(j)}, \\ p''_{нзэпт(j)} &= p''_{пгспт(j)} - \frac{k_{нопт(j)} - 1}{k_{нопт(j)} \cdot \upsilon''_{пгспт(j)}} \cdot \frac{Q_{п-мзэпт(j)}}{D'_{нзэпт(j)}}, \\ Q_{п-мзэпт(j)} &= [K_{\alpha,мсмпт(j)} \cdot (\theta''_{нзэпт(j)} - T_{мсмпт(j)}) + K_{\alpha,мпомпт(j)} \cdot (\theta''_{нзэпт(j)} - T_{мпомпт(j)})] \cdot (\bar{D}_{нзэпт(j)})^{0.8}, \\ Q_{впт(j)} &= K_{\alpha,в,мсмпт(j)} (T_{мсмпт(j)} - \theta_{впт}), \end{aligned} \right.$$

где p – давление, D – расход, h – энтальпия, ρ – плотность, V – объем, υ – удельный объем, β – коэффициент сжимаемости, γ – коэффициент расхода в паровой объем, ψ – коэффициент расхода через регулирующий клапан, F – степень открытия РК, Q – теплота; T – температура металла, θ – температура пара, K – коэффициент идентификации теплообмена, s – энтропия, η – КПД, k – коэффициент изоэнтропии.

Статическая точность разработанной математической модели проверена путем сравнения расчетных параметров имитационной модели с параметрами, указанными в эксплуатационных документах.

Литература

1. **Тверской Ю.С., Таламанов С.А.** Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2010. №10. С.37-44.

2. **Бельский А.А., Чаховский В.М.** Оценка технической возможности и экономической целесообразности работы АЭС с ВВЭР в маневренных режимах за счет использования тепловых аккумуляторов энергии во втором контуре // РОСЭНЕРГОАТОМ: ежемесячный журнал атомной энергетики России. 2010. URL: <http://rosenergoatom.info>.

3. **Рабенко В.С., Киселев А.И.** Имитационная математическая модель турбоустановки // Вестник ИГЭУ. 2002. Вып. 1. С.86-96.

4. **Инструкция** по эксплуатации турбоагрегата К-1000-60/3000. 03.SA.ПЭ.0001.44. ФГУП Концерн «Росэнергоатом» филиал «Калининская атомная станция», 2008 г. – 198 с.

УДК 681.5.015

А.Н. НИКОПОВ, к.т.н., ст. преподаватель
(ИГЭУ) г. Иваново

Моделирование многофазного теплообменника как обобщенного структурного элемента теплоэнергетического объекта управления

Основным элементом компоновки любого парового котла является теплообменник. Трубчатый теплообменник представляет собой пакет из параллельно включенных труб, внутри которых течет теплоноситель, а снаружи к трубам подводится или отводится тепло.

В общем случае теплоноситель в теплообменнике может находиться в однофазном (жидкость или пар) или двухфазном (пароводяная смесь) состояниях. Однако на протяжении всего теплообменника или отдельного элементарного участка теплоноситель может менять своё состояние. Так, в барабанном котлоагрегате теплоноситель в различных состояниях может присутствовать в экономайзере, опускных и подъемных трубах. При этом алгоритмы расчета коэффициента теплоотдачи и падения давлений для однофазного и двухфазного теплоносителей существенно отличаются [1].

Общепринятым при моделировании подходом является разбиение многофазного теплообменника таким образом, чтобы в каждом элементарном участке теплоноситель находился в строго определенном состоянии. Однако такое разбиение не позволяет учитывать смещение точек

вскипания и полного испарения, характерное для циркуляционных контуров барабанных котлов и испарительных участков прямоточных котлов.

Очевидно, что чем больше количество участков, на которое разбивается теплообменник, тем выше точность получаемой модели. Однако при этом возрастает объем модели, что влечет за собой увеличение времени ее расчета. Поэтому количество элементарных участков теплообменника является существенным фактором для адекватности модели и ограничительным фактором для возможности расчета модели в режиме реального времени. Следовательно, разработка модели теплообменника (элементарного участка) с всережимным состоянием теплоносителя позволит уменьшить количество элементарных участков, на которые разбивается теплообменник, не снижая точность модели.

Для учета всех возможных состояний теплоносителя в пределах одного элементарного участка необходимо знать точки вскипания и полного испарения теплоносителя. Эти точки в линейном приближении могут быть определены из допущения равномерности теплого потока по длине участка теплообменника и, следовательно, допущения, что энтальпия теплоносителя меняется по линейному закону (рис. 1) [2].

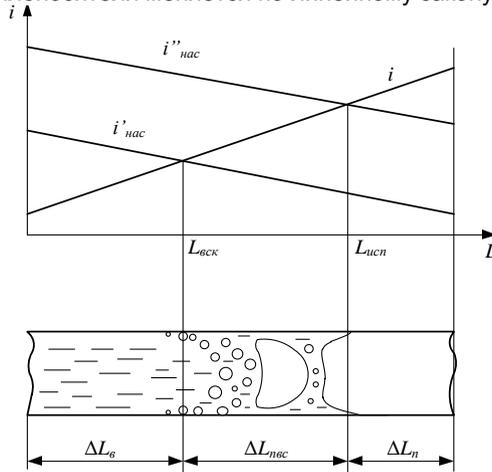


Рис. 1. Изменение энтальпии теплоносителя по длине теплообменника:

$L_{вск}$ – приблизительная точка вскипания; $L_{исп}$ – приблизительная точка полного испарения; $\Delta L_{в}$ – протяженность зоны теплообменника, заполненной водой; $\Delta L_{пс}$ – протяженность зоны теплообменника, заполненной пароводяной смесью; $\Delta L_{п}$ – протяженность зоны теплообменника, заполненной паром; $i'_{нас}$ – энтальпия воды в состоянии насыщения; $i''_{нас}$ – энтальпия пара в состоянии насыщения

В реальных условиях и при правильном разбиении наличие сразу трех зон в рамках одного участка практически невозможно. В случае отсутствия какой-либо

зоны происходит совмещение точек вскипания или испарения с точками входа или выхода рассматриваемого элементарного участка.

Следует отметить, что во всережимной модели теплообменника не учитывается зона недогрева, в которой парообразование происходит в пристенной области, где температура среды достигла температуры насыщения, но отсутствует в ядре потока ввиду его недогрева. Данную зону практически невозможно учесть при использовании модели с сосредоточенными параметрами, которая не учитывает распределение температур по сечению трубы. Таким образом, точке вскипания соответствует точка начала развитого кипения.

Разработанная в результате развития нелинейная динамическая модель теплообменника отличается всережимным состоянием теплоносителя в пределах одного элементарного участка, что позволяет учитывать смещение границ перехода фазовых состояний, а также позволяет более свободно подходить к разбиению теплообменника на элементарные участки, не обращая внимания на фазовые состояния теплоносителя [3].

Литература

1. **Лабунцов, Д.А.** Механика двухфазных систем: учеб. пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 384 с.
2. **Кондрашин, А.В.** Технологические основы управления теплоэнергетическими процессами / А.В. Кондрашин. – М.: «Испо-Сервис», 2004. – 316 с.
3. **Тверской, Ю.С.** Прикладное обеспечение полигонов АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, А.Н. Никоноров, Д.А. Пронин. – ФГБОУВПО «ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 174 с.

УДК 681.5

Е.С. ЦЕЛИЩЕВ, д.т.н., профессор, ген. директор,
А.В. ГЛЯЗНЕЦОВА, специалист
(ИГЭУ, ЗАО «СиСофт Иваново») г. Иваново

Применение методов агрегативно-декомпозиционной технологии для автоматизации проектирования АИИСКУЭ

Проектирование сложных электротехнических систем, к которым относятся электрические станции и подстанции, – процесс сложный и трудоемкий. Одним из этапов проектирования таких систем является формирование технической проектной документации, на основе которой впоследствии выполняются монтажные и пусконаладочные работы по вводу проектируемого объекта в эксплуатацию.

Большой объем документации и требования к ее качеству обуславливают применение систем автоматизированного проектирования. Сегодня в России применяются как отечественные, так и зарубежные САПР, в основе которых лежат различные технологии проектирования. *Агрега-*

тивно-декомпозиционная технология (АДТ) проектирования, реализованная в современной российской САПР AutomatiCS, традиционно применялась для проектирования систем контроля и управления. Однако универсальность разработанных в рамках этой технологии методов позволила применить их также для проектирования автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ) электрической подстанции.

АДТ-технология предусматривает два основных этапа создания проекта:

- разработка *единой модели проекта* (ЕМП);
- формирование проектных документов.

Под единой моделью проекта понимается виртуальная модель проектируемой системы, представляющая собой совокупность элементов и связей между ними. Все элементы и связи обладают множествами параметров, необходимых для отображения в проектных документах.

Для создания модели проекта АИИСКУЭ и получения комплекта проектных документов были использованы следующие методы:

1) **Метод выбора схем электрического подключения.** Суть метода заключается в выборе оптимальной схемы из базы данных и знаний в соответствии с исходными требованиями к каналам учета и последующего автоматического выполнения следующих проектных процедур:

- добавления в проект всех элементов и связей, входящих в состав выбранной схемы (для каналов учета такими элементами являются: счетчик, испытательная коробка, переключатель цепей напряжения и т.д.);
- присвоения элементам позиционного обозначения;
- присвоения связям уникальных маркировок.

Для проектирования каналов учета исходными данными являются: характеристики точек учета (вид учета: коммерческий/технический); характеристики измерительных трансформаторов тока и напряжения (0.2s, 0.5s; 0.2, 0.5); данные о распределении счетчиков по шкафам; метрологические характеристики элементов канала учета (класс счетчика: 0.2s, 0.5s).

2) **Метод подключения к многоканальным приборам** (блокам питания, модулям контроллеров, пр.). Исходные данные для автоматического выполнения подключения представляют собой информацию о предварительном распределении сигналов по отдельным каналам. В соответствии с этим методом автоматически выполняются следующие процедуры: импорт исходных данных в проект; выборка элементов, подключаемых к одному прибору; добавление в проект требуемого типа прибора; подключение связей к соответствующим каналам согласно исходным данным; присвоение приборам позиционных обозначений.

При проектировании АИИСКУЭ в проект автоматически добавляются элементы схемы резервного питания: автоматические выключатели, клеммы с расцепителями и т.д. Кроме непосредственно добавления

элементов, данный метод позволяет вносить изменения в проект, автоматически переключая связи между каналами приборов в случае изменения исходных данных.

3) **Метод построения клеммников.** Сложный, комплексный метод, который разработан для автоматического добавления в проект клеммных соединителей различных видов. Исходными являются данные о распределении приборов по шкафам. Метод заключается в последовательном автоматическом выполнении следующих проектных процедур и операций:

- добавление исходных данных элементам/связям проекта, которые должны участвовать в построении клеммников;
- выделение множества связей, соответствующих требованиям процедуры построения клеммников;
- добавление клеммы для каждой связи, принадлежащей данному множеству;
- объединение клемм в отдельные клеммники в соответствии с исходными данными о распределении приборов по шкафам;
- обработка клеммников: присвоение позиционного обозначения, добавление резервных клемм, подключение экранов кабелей.

Также этот метод позволяет автоматизировать процесс перестроения клеммников при изменении исходных данных (например, из-за переноса прибора из одного шкафа в другой).

При проектировании АИИСКУЭ были получены следующие результаты применения данного метода:

- добавление в проект и организация заданной структуры клеммников: тока и напряжения, информационных клеммников, клеммников питания, сигнализации;
- организация правильной структуры связей напряжения в пределах шкафа счетчиков и добавление в проект клеммников напряжения;
- добавление клеммам характеристик, соответствующих параметрам их подключений;
- добавление в проект элементов, состав которых зависит от сформированной структуры клеммников: DIN-рейки, концевые стопоры, таблички и т.д.

4) **Метод формирования кабелей.** Производится сбор информации обо всех элементах/связях проекта с целью выявления связей, которые необходимо объединить в кабель. Далее выполняется определенная последовательность автоматизированных/автоматических проектных процедур по добавлению и обработке кабелей. Для проекта АИИСКУЭ автоматически были выполнены следующие действия:

- добавление в проект кабелей;
- добавление параметров кабелей в соответствии с типами коммутируемых сигналов;
- добавление информации о сигналах в кабелях;
- добавление позиций кабелей.

5) **Метод документирования по шаблону.** Метод позволяет заранее определить набор элементов/связей, порядок их вывода в документ, организацию построения таблиц или графических файлов и, в соответствии с заданными настройками, выполнить автоматическое формирование многостраничного документа. С помощью этого метода был получен комплект графических и табличных документов: схема учета, перечень каналов учета, принципиальные электрические схемы шкафов счетчиков, схемы подключения кабелей к рядам зажимов, перечни оборудования шкафов, кабельный журнал, перечень основного оборудования АИИСКУЭ, перечень сигналов, задание заводу (таблица соединений, таблица подключения, перечень оборудования, схема заполнения шкафа) и пр.

6) **Метод интеграции графических документов с моделью проекта.** Метод организации структуры графических документов, позволяющий поддерживать постоянную динамическую связь документов с единой моделью проекта. Суть метода заключается в периодической проверке актуальности данных, отображаемых в документах, и их автоматическом обновлении в случае внесения изменений в модель проекта (проверка выполняется каждый раз при открытии документа, либо по отдельному запросу). При этом может изменяться не только текстовая информация (значения параметров), но и графическая (например, замена графического блока при изменении типа отображаемого элемента). Кроме этого, осуществляется "обратная связь" документов с моделью проекта: при изменении данных в графическом документе происходит одновременное изменение в модели проекта и, как следствие, во всех графических документах.

Методы были использованы при выполнении реального проекта АИИСКУЭ подстанции 500 кВ.

Литература

1. **Технология** проектирования тепловых электростанций и методы ее компьютеризации / Е.С. Целищев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 234 с.
2. **Целищев Е.С., Глязнецова А.В.** AutomatiCS 2011 – разрабатывать КИПиА просто и эффективно. Часть 1: Это действительно САПР // САПР и графика. – 2012. – № 4. – С. 76-81.
3. **Целищев Е.С., Глязнецова А.В.** Разработка методов повышения эффективности формирования клеммных соединителей при проектировании монтажной части систем автоматики // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 5. – С. 68-75.

Анализ возможности повышения эффективности работы газотурбинной установки

Задача экономичного использования топлива в современных условиях развития энергетики связана с широким применением газотурбинных технологий. Парогазовые установки с КПД 50-55% уже составляют значительную часть современной энергетики. Разработка и производство газотурбинных двигателей и парогазовых установок стало одной из основных отраслей промышленности в наиболее развитых индустриальных странах мира.

Задача оптимизации режимов работы газотурбинной установки (ГТУ) является актуальной научно-технической задачей. Решение задачи возможно проведением экспериментальных исследований. Испытания непосредственно на действующем оборудовании весьма сложны, трудоемки, дорогостоящи и экономически невыгодны и связаны с нарушением нормального режима эксплуатации объекта. Оптимальным решением задачи видится проведение предварительных исследований на динамической модели ГТУ, функционирующей в режиме реального времени в составе полигонной версии АСУТП [1].

Для определения оптимальных режимов работы ГТУ, была разработана модель, состоящая из модели компрессора, модели камеры сгорания, модели газовой турбины [2]. Прототипом модели является газовая турбина ГТЭ-110 производства НПО «Сатурн» Подсистема управления ГТУ, воздействующая на подсистему модели, включает в себя основные регуляторы мощности ГТУ и температуры газов за турбиной. Проведены предварительные испытания по оптимизации режимов на экспериментальной установке – полигонной АСУТП.

Регулирование нагрузки газовой турбины в диапазоне 100-60% осуществляется изменением расходов воздуха через компрессор с помощью входного направляющего аппарата (ВНА) и топлива регулирующим топливным клапаном (РКТ) при примерно постоянной температуре выхлопных газов. В диапазоне нагрузок 0-60% мощность ГТУ изменяется только за счет изменения расхода топлива при полностью прикрытом ВНА. Температура выхлопных газов при этом прямо зависит от мощности и расхода топлива.

Проведены эксперименты при различных режимах работы ГТУ. Для каждого из режимов при выходе на значение температуры газов 520⁰С за турбиной найдены значения КПД (рис.1). Работа газовой турбины возможна и при других значениях температуры. При этом, нижний предел температуры соответствует технологическому ограничению работы

паровой турбины и составляет 440°C , дополнительно снижается КПД котла утилизатора. Верхний предел соответствует технологическому ограничению работы котла утилизатора и составляет 570°C [3].

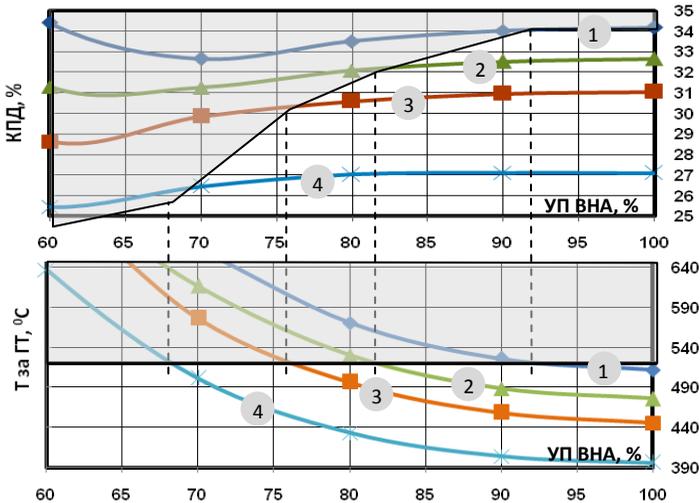


Рис. 1. Зависимость КПД и температуры газов за турбиной от положения ВНА:
1 – 110МВт, 2- 95 МВт, 3- 82,5 МВт, 4 – 60 МВт

Поддержание ВНА на постоянном значении не обеспечивает эффективную работу газотурбинной установки. При небольших колебаниях температуры наружного воздуха это может быть оправдано, однако целесообразно разработать дополнительную систему регулирования с поддержанием постоянной температуры газов за турбиной (рис.2).

Характеристики газовой турбины связывают ее «выходные» параметры: мощность, температуру газов за турбиной, с определяющими регулирующими воздействиями: расходом топлива G_T и углом поворота ВНА α , и температурой наружного воздуха T_n .

Проведено исследование схемы регулирования ГТУ, в которой расходом топлива поддерживается мощность, а коррекция по температуре газов за турбиной осуществляется расходом воздуха.

Результаты исследования схемы регулирования показали, что при постоянном поддержании температуры газов за турбиной 520°C можно добиться поддержания КПД на постоянном уровне в районе 34,2% при изменении температуры наружного воздуха в диапазоне $-30\div 20^{\circ}\text{C}$.

Максимальный КПД ГТУ без учета КПД всей установки достигается при полном открытии ВНА. Однако ограничений технологических с учетом по температуре газов за турбиной и оптимальности работы всего блока КПД ГТУ снижается.

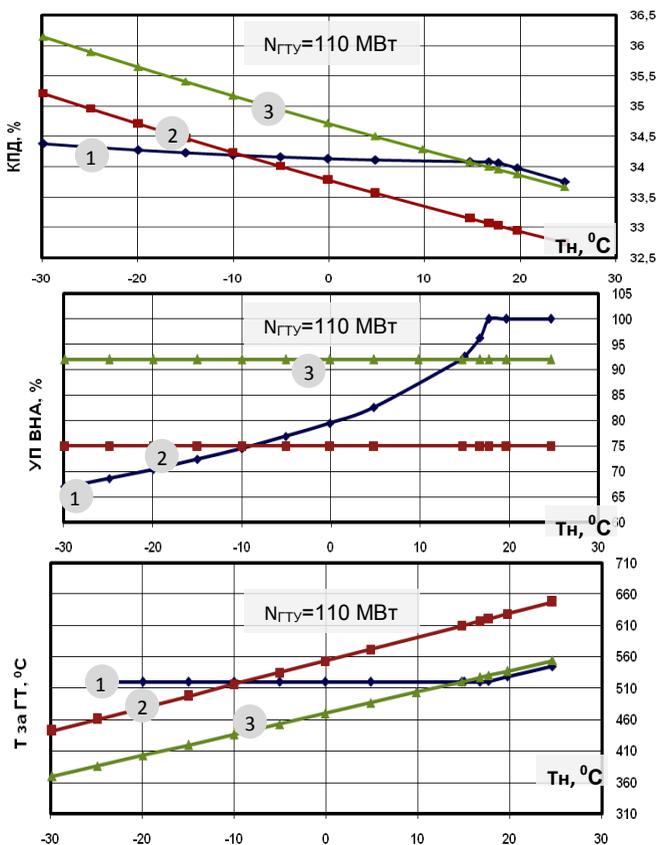


Рис. 2. Влияние температуры наружного воздуха на КПД, положение ВНА и температуру газов за ГТ: 1 – при регулировании температуры за турбиной; 2 – при постоянном открытии ВНА 75%; 3 – при постоянном открытии ВНА 92%

Литература

1. **Тверской Ю.С., Голубев А.В., Никоноров А.Н.** «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления / Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С.70-75.
2. **Обуваев А.С.** Разработка и исследование аналитической модели энергоблока ПГУ-450. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2011.
3. **Колосова Ю.С., Голубев А.В.** Разработка модели газотурбинной установки блока ПГУ-325 // Наука и инновации в технических университетах: материалы Шестого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С.24-26.

УДК 621.52:621.438

Е.А. ПОЛУЭКТОВА,
Н.А. ПОЛУЭКТОВА, А.В. БАТУРОВ м.н.с.
(ОАО «ВТИ») г. Москва

Разработка автомата пуска ГТУ ДЯ59Л ПЛЭС «Северное сияние»

В 2012 году сотрудниками ОАО «ВТИ» была выполнена модернизация системы контроля и управления (СКУ) газотурбинной установки (ГТУ), установленной на плавучей электростанции (ПЛЭС) «Северное сияние». СКУ была введена в эксплуатацию более 40 лет назад и устарела как морально, так и физически. Основная задача модернизации заключалась в разработке и реализации алгоритмов автоматического пуска – автомата пуска.

Газотурбинная установка ДЯ59Л мощностью 12 МВт является трехвальным турбоагрегатом, работающим по простому термодинамическому циклу. В состав ГТУ входят: двухступенчатый компрессор высокого (КВД) и низкого (КНД) давления, камера сгорания (КС), турбины высокого (ТВД) и низкого (ТНД) давления и турбина генератора (ТГ). Тип топлива – природный газ.

Модернизация СКУ ГТУ была выполнена на базе контроллера General Electric RX3i, техническое и программное обеспечение которого позволило реализовать основные информационные, управляющие и вспомогательные функции управления.

В объем модернизации входила замена всех основных исполнительных устройств систем топливоподачи и продувки ГТУ, таких как дроссельный кран, стоп-кран, дренажный кран и т.д.

При реализации СКУ были установлены автоматизированные рабочие места (АРМ), на дисплей которых выводятся видеogramмы дистанционного управления и регулирования процессами ГТУ.

Технологией ГТУ предусмотрены два алгоритма пуска: холодная прокрутка, заключающаяся в проверке работы маслосистем и пускового устройства, и запуск – вывод двигателя на частоту вращения холостого хода. Пусковые режимы являются быстротекущими процессами, в которых участвуют несколько технологических систем. Для каждой схемы пуска специалистами ОАО «ВТИ» была разработана пошаговая программа с минимальным участием оператора: от него требуется только выбор алгоритма пуска. Пошаговые программы начинаются с проверки готовности всех систем ГТУ к пуску.

Пошаговая программа «Запуск» осуществляет автоматический вывод двигателя ГТУ на холостой ход за 3-5 минут, посредством последовательного выполнения следующих операций:

- заполнение маслом маслосистем двигателя и генератора,

- включение пускового устройства, разворот ротора КНД (860 об/мин) и его раскрутка до частоты вращения 1550 об/мин и подключение системы топливоподготовки,

- возникновение искры и стабилизация процесса горения в КС,

- выход КНД на частоту вращения 2400 об/мин и ТГ – 1800 об/мин и отключение пускового устройства.

Дальнейшая раскрутка ТГ до холостого хода, принятие нагрузки и синхронизация с энергосистемой осуществляется регулятором оборотов ТГ, который был реализован при модернизации СКУ ГТУ.

Регулятор изменяет расход топливного газа, воздействуя на дозирующий клапан, расположенный на трубопроводе подачи основного топлива в КС.

Регулятор оборотов ТГ работает в двух режимах: пусковом и базовом. Пусковой режим представляет собой ступенчатое нагружение. В этом режиме регулятор работает по ступенчатому графику, параметры которого рассчитываются по режимной карте в зависимости от температуры наружного воздуха. При работе в этом режиме предусмотрен запрет на раскрытие дозирующего клапана при повышении температуры газов за ТВД более 230 С.

В базовом режиме регулятор оборотов поддерживает заданную частоту вращения турбины генератора, меняя расход топлива. В этом режиме предусмотрено автоматическое и дистанционное управление регулятором.

На рис. 1 представлен график нагружения, включающий два этапа: запуск и выход на холостой ход. Из него видно, что при работе модернизированной СКУ процесс нагружения ТГ происходит плавно и стабильно.

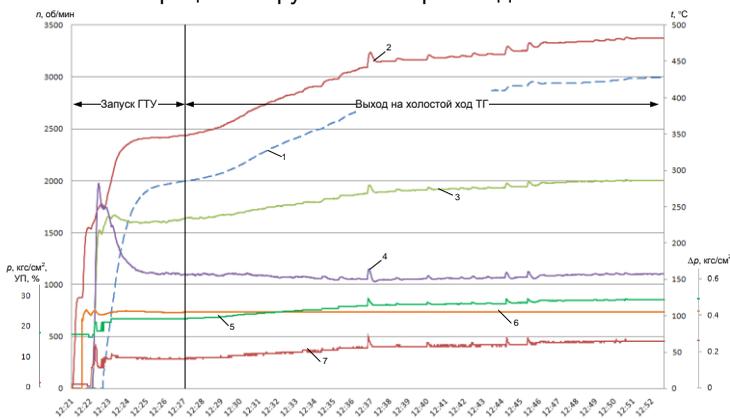


Рис. 1. График нагружения ГТУ (20.07.2012 г)¹:

- 1 – Обороты ТГ (n), 2 – Обороты КНД (n), 3 – Температура газа за ТВД (t),
- 4 – Температура воздуха за КВД (t), 5 – Указатель положения дозирующего клапана (УП), 6 – Давление топливного газа (p), 7 – Перепад давления топливного газа и воздуха (Др)

¹ При построении графиков использовалась размерность, принятая на ПЛЭС.

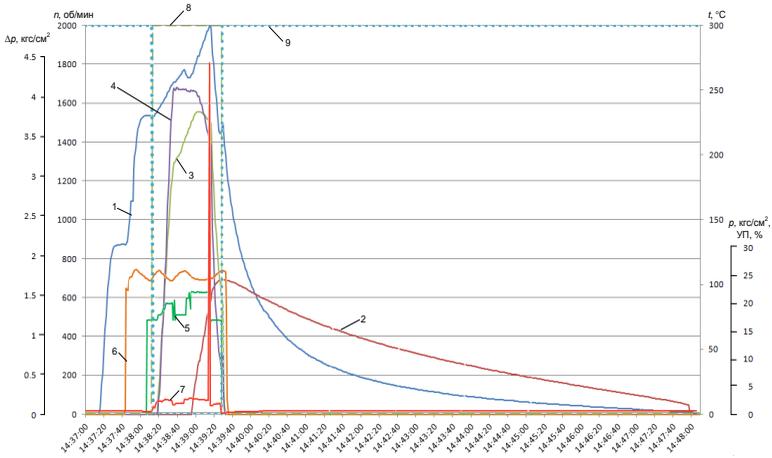


Рис. 2. Работа защиты на ГТУ (22.07.2012 г):
 1 – Частота вращения КНД, 2 – Частота вращения ТГ,
 3 – Температура газа за ТВД, 4 – Температура воздуха за КВД,
 5 – Указатель положения дозирующего клапана, 6 – Давление топливного газа,
 7 – Перепад давления топливного газа и воздуха, 8 – Состояние стоп-крана
 (открыт/закрыт), 9 – Состояние дренажного крана (открыт/закрыт)

Также в СКУ ГТУ были реализованы алгоритмы автоматического останова и технологических защит.

В процессе эксплуатации ГТУ с модернизированной СКУ возникли условия для срабатывания технологической защиты: увеличение перепада давления топливного газа и воздуха до 0,45 МПа. В результате сработала соответствующая защита и ГТУ остановилась. На рис. 2 представлены графики изменения основных технологических параметров в данной ситуации.

Заключение

Модернизация СКУ ГТУ ДЯ59Л ПЛЭС «Северное сияние» на базе контроллера GE RX3i позволила перейти на качественно новый уровень управления.

В настоящий момент автомат запуска ГТУ введен в эксплуатацию, пуск до холостого хода двигателя при работе модернизированной СКУ ГТУ был осуществлен более 15 раз, пуск, нагрузка и синхронизация с энергосистемой – более 10 раз.

Внедрение модернизированной СКУ позволило улучшить маневренные характеристики ГТУ. В частности, раскрутка ТГ до холостого хода (3000 об/мин), нагрузка и синхронизация с энергосистемой в настоящее время осуществляются за 30 минут, тогда как ранее это требовалось более 10 часов.

Исследование системы автоматизированного пуска паровой турбины Т-250/300-240

В настоящее время весьма актуальна проблема автоматизации и совершенствования технологий пуска энергетических блоков, так как повышаются требования к маневренности энергоблоков, надежности энергосбережения в условиях роста неравномерности графиков нагрузки энергосистем. В пусковых режимах энергоблока оператору приходится контролировать большое число параметров и показателей состояния оборудования. В нестационарных и аварийных режимах, ограничивающих уровень нагрузки энергоблока, внезапный характер возникающих ситуаций, малый запас времени и необходимость одновременного выполнения большого числа различных операций чрезвычайно затрудняет работу оператора, снижает качество эксплуатации и, как следствие, эксплуатационную надежность оборудования [1].

Для современных паровых турбин как объектов управления регулирующим воздействием является изменение расхода пара через турбину, а ведущими показателями – разности температур в корпусных деталях и роторах, характеризующих их термонапряженное состояние и определяемых режимами их прогрева. Таким образом, ограничивающими факторами пуска являются главным образом тепловые расширения. Расчетные значения ведущих показателей определяют скорость пуска турбины, а их превышение может приводить к появлению трещин на поверхности деталей турбины, снижению ее остаточного ресурса и к аварийным ситуациям [2].

Автоматизация ручных операций позволит уменьшить негативное влияние ошибочных или неточных действий оператора на процесс управления. Автоматизированная система управления пуском паровой турбины позволит:

- повысить надежность работы оборудования, предотвратить возможные аварийные ситуации и повреждение оборудования за счет быстрой реакции на изменение параметров технологического процесса;
- повысить экономичность работы оборудования, сократить пусковые потери из-за уменьшения длительности пусков (предотвращение деформаций цилиндров);
- сократить численность оперативного эксплуатационного персонала (снизить риски, возникающие за счет человеческого фактора).

Инструментом для исследования системы пуска является экспериментальная установка, функционирующая в лаборатории «Полигон АСУТП электростанций» кафедры систем управления [3], на базе кото-

рой была разработана имитационная модель автоматизированного пуска паровой турбины Т-250/300-240 в программе имитационного моделирования.

Математическая модель турбоустановки включает: модель парового тракта турбины, обеспечивающую расчет параметров пара за группой ступеней турбины и расходов пара в каждом отсеке; математическую модель динамики ротора турбоагрегата, обеспечивающую расчет частоты вращения ротора и электрической мощности на клеммах турбогенератора; математическую модель динамики температур ротора и статора при прогреве турбины; математическую модель динамики температур металла корпусов цилиндров; математическую модель тепловых расширений турбины, обеспечивающую расчет относительных расширений роторов; математическую модель быстродействующей редуцирующей охлаждающей установки (БРОУ); элементы системы управления, регулятор скорости набора оборотов, клапаны и задвижки.

Имитационная модель позволяет воспроизвести все основные этапы пуска паровой турбины, включающие в себя: этап разворота - от «толчка» ротора турбины до выхода на номинальную частоту вращения; работу на холостом ходу до включения турбогенератора в сеть; взятие начальной нагрузки до достижения номинальной нагрузки.

Испытания на модели проводились для пуска турбины из холодного состояния. В качестве результатов испытаний представлены графики частоты вращения турбины в соответствии с графиком-заданием пуска и графики изменения температур металла ЦСД (рис. 1).

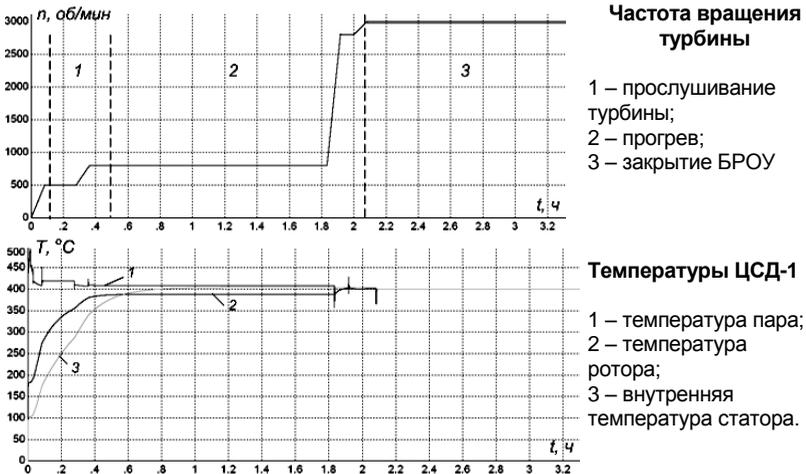


Рис. 1. Графики изменения параметров при пуске турбины

В процессе разворота производятся выдержки, при которых частота вращения остается неизменной. Эти выдержки необходимы для равномерного прогрева ротора и корпуса турбины для удержания в допустимых пределах температурных напряжений в роторе и корпусе. После подачи пара в турбину делаются выдержки на 500 и 800 об/мин для удаления из корпуса турбины образующегося конденсата и прослушивания турбины с целью обнаружения возможных задеваний. Критические частоты валопровода следует проходить быстро, не давая развиваться интенсивным колебаниям [4-6].

Повышение частоты вращения ротора до номинальной осуществляется по графику-заданию пуска сравнительно небольшими расходами пара. Соответственно невелики и коэффициенты теплоотдачи от пара к металлу, обуславливаемые относительной скоростью течения пара и его плотностью. С увеличением расхода пара при выходе на номинальную частоту вращения прогрев турбины интенсифицируется как за счет увеличения коэффициентов теплоотдачи от пара к металлу, так и вследствие роста температуры пара в турбине [6].

При пуске турбины часть пара отводится через БРОУ в конденсатор. БРОУ открыто при разгоне турбины от 0 до 3000 об/мин. При достижении турбиной 3000 об/мин БРОУ закрывается.

Разработанный пусковой регулятор скорости набора оборотов контролирует скорость турбины до подъема давления, выхода на номинальные параметры работы турбины и до включения основного регулятора частоты вращения турбины. После выхода на номинальную частоту вращения турбогенератор синхронизируют и включают в сеть с взятием начальной нагрузки. В процессе дальнейшего нагружения регулирующие клапаны турбины постепенно открываются в соответствии с изменением расхода пара через турбину таким образом, чтобы давление пара за котлом поддерживалось на номинальном уровне.

Литература

1. **Голубев, А.В.** Особенности отладки и испытаний алгоритмов управления нестационарными режимами работы энергоблоков / А.В. Голубев // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып.4. – с.69-71.
2. **Быков, Э.Б.** Особенности разработки алгоритмического обеспечения автоматов пуска высокоманевренных паровых турбин большой мощности / Э.Б. Быков, И.И. Туркин, Л.Б. Баскаков // Автоматизация производства. – 2007. – №5. – с.40-42.
3. **Тверской, Ю.С.** «Полигон электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – с.70-75.
4. **Плоткин, Е.Р.** Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков / Е.Р. Плоткин, А.Ш. Лейзерович. – М.: Энергия, 1980. – 192 с.
5. **Паровые** и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов / А.Г. Костюк [и др.]; под ред. А.Г. Костюка. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 560 с.
6. **Лейзерович, А.Ш.** Технологические основы автоматизации пусков паровых турбин / А.Ш. Лейзерович. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 175 с.

Анализ состояния АСАРБ в аспекте реализации на современных ПТК АСУТП энергоблоков

Повышение мощности блочных установок выдвигает в числе общих задач обеспечение маневренного управления блоком в режимах, требующих быстрого и глубокого изменения нагрузки. Подобная необходимость может возникнуть в результате нестационарных и аварийных режимов в электрических сетях либо появления внутренних неисправностей, ограничивающих уровень нагрузки блока.

Быстрая разгрузка блока в этих случаях является эффективным мероприятием, позволяющим избежать отключения оборудования технологическими защитами и создать условия для быстрого повторного нагружения после устранения неисправности. В ряде аварийных ситуаций, связанных с работой энергосистемы, возникает необходимость перевода блоков в режимы холостого хода, нагрузки собственных нужд или малой нагрузки [1].

Проблемой аварийных разгрузок блоков начали заниматься в 70-х годах прошлого века. Эта задача была успешно решена организациями ВТИ и ОРГРЭС для ряда опытных энергоблоков: пылеугольного блока 300 МВт, блока 160 МВт, пылеугольного блока 210 МВт и др. Для исследования режимов и отработки технологического алгоритма разгрузки производились сбросы нагрузки с ручным и автоматическим переводом блоков на нагрузку собственных нужд. При этом в работах рассматривались различные варианты разгрузки блока – разгрузка до 70%, 50%, 30% и нагрузка собственных нужд [2-5].

В связи с низким уровнем алгоритмизации и надежности технических средств автоматизации, а также с необходимостью выполнения большого количества экспериментальных исследований на технологическом объекте данные работы являлись единичными и не получили широкого распространения.

Использование многофункциональных полигонов с имитационными моделями технологического оборудования, функционирующими в режиме реального времени, а также более высокий уровень автоматизации современных энергоблоков позволяют успешно решить такие сложные и наукоемкие задачи, как автоматизация пусковых и аварийных режимов [6].

Внедряемые на энергоблоках ПТК включают все необходимые средства для создания АСУТП с максимальным использованием их современного потенциала. В их состав входят контроллеры, информационно-вычислительные рабочие станции, средства мониторинга, сетевые компоненты и САПР для проектирования систем управления.

Например, входящая в ПТК «Квинт» мощная система автоматизированного проектирования (САПР) помогает за короткое время выполнить инжиниринг АСУТП любой степени сложности. Такой элемент САПР, как виртуальный контроллер, позволяет, на базе персональных компьютеров, создавать виртуальные АСУТП, включающие рабочие станции, контроллеры и модель объекта, и использовать их для наладки системы и обучения персонала. Использование современных наработок производителей ПТК позволяет строить полигонные АСУТП для реализации сложных задач управления.

В качестве экспериментальной установки полигоны АСУТП позволяют выполнять исследовательские (экспериментальные) работы, направленные на совершенствование сложных наукоемких функций систем управления. В связи с этим целесообразно их использование для разработки и исследования задач автоматической системы аварийной разгрузки блока (АСАРБ) [7].

Работа системы аварийной разгрузки блока существенно зависит от маневренности блока (большого сброса нагрузки за короткий период времени), которая при этом зависит от скорости изменения главных управляющих воздействий: изменение расхода пара на турбину (МУТ), изменение расхода пара на сбросе в конденсатор (БРОУ), изменение расхода питательной воды (РПК). От времени полного хода данных регулирующих клапанов напрямую зависит скорость сброса нагрузки блока в аварийной ситуации. Внезапный характер возникающих ситуаций, малый запас времени и необходимость одновременного выполнения большого числа различных операций, которые должны быть четко скоординированы, требуют использования для решения задачи специализированной АСАРБ.

Для исследования работы системы аварийной разгрузки блока до собственных нужд необходимо разработать укрупненную имитационную модель блока, включающую в себя: модель котлоагрегата; модель турбоагрегата; модель запорной и регулирующей арматуры блока.

Основным критерием при анализе АСАРБ является возможность поддерживать заданную скорость вращения ротора турбины при основном возмущающем воздействии - отключении генератора от сети. В связи с этим, исследование возможности реализации системы АСАРБ сводится к определению быстродействия системы регулирования паровой турбины, при котором обороты турбины не выходят за критические отметки (технологические защиты). Задачей итоговых испытаний на стенде является анализ технологических особенностей реализации АСАРБ и исследование возможности выдачи согласованных управляющих воздействий отдельных систем автоматического регулирования в аварийных ситуациях.

Использование полигонов АСУТП как испытательных стендов позволяет решить проблемы отладки отдельных алгоритмов системы управления и комплексной проверки правильности функционирования подсистемы АСАРБ АСУТП.

Литература

1. **Волков, О.Г.** Автоматизация режимов аварийной разгрузки блока 300 МВт / О.Г. Волков, Н.И. Давыдов, М.А. Лившиц // Теплоэнергетика. – 1971. – №6. – С.17-22.
2. **Мнусских, М.Е.** Результаты испытания автоматической системы аварийной разгрузки энергоблока 300 МВт / М.Е. Мнусских // Теплоэнергетика. – 1976. – №8. – С.29-33.
3. **Лившиц, М.А.** Автоматизация энергоблока с комбинированной циркуляцией среды в парогенераторе при нормальной работе и аварийных разгрузках / М.А. Лившиц, В.Н. Дубов, В.П. Думнов // Теплоэнергетика. – 1977. – №5. – С.50-53.
4. **Мальгавка, В.В.** Результаты внедрения автоматической системы аварийной разгрузки энергоблока (АСАРБ) мощностью 160 МВт / В.В. Мальгавка, В.П. Власов, С.Н. Данилов // Теплоэнергетика. – 1975. – №7. – С.27-28.
5. **Новиков С.И.** Алгоритмическое обеспечение АВСН / С.И. Новиков, А.И. Галанова // Вестник ИГЭУ. - 2011. – Вып. 1.
6. **Тверской, Ю.С.** «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С.70-75.
7. **Голубев, А.В.** Особенности отладки и испытаний алгоритмов автоматического управления нестационарными режимами работы энергоблоков / А.В. Голубев // Вестник ИГЭУ. – 2010. – №4. – С.69-71.

УДК 620.9.002.56

Е.Д. МАРШАЛОВ, к.т.н., ст. преп.,
И.А. РЯБИКОВ, студент,
И.С. ХОХЛОВ, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

Опыт исследования динамических характеристик датчиков температуры

Современный уровень развития энергетических и других промышленных установок характеризуется интенсификацией технологических процессов, использованием агрегатов большой единичной мощности. Количество измеряемых параметров на одном агрегате в настоящее время исчисляется тысячами. Надежность средств измерений и информационно-управляющих систем во многих случаях определяет надежность агрегата в целом. Без знания достоверных значений параметров и автоматического контроля над ними невозможно управлять процессом или агрегатом. Не менее важную роль играют измерения при проведении научных исследований и их автоматизации [1, 2].

Последнее десятилетие характеризуется стремительным внедрением микропроцессорной техники не только во вторичные измерительные приборы, но и в первичные преобразователи, размещаемые непосредственно на технологических объектах. В микропроцессорных

(интеллектуальных) средствах измерения коренным образом меняются функциональные возможности по обработке, преобразованию и представлению результатов измерений [1].

Температура, наряду с объемом и давлением, является одной из трех основных величин, характеризующих состояние вещества. Измерение температуры занимает 80 % в объеме промышленных измерений, поскольку значение температуры в большинстве случаев определяет качество произведенной продукции, эффективность ведения технологических процессов, безопасность работы оборудования и прочее [2, 3].

Непосредственное измерение температуры невозможно. В метрологическом аспекте температура является величиной, не подчиняющейся закону аддитивности. Поэтому для измерения температуры необходимо иметь не только единицу измерения, но и шкалу, в которой температура определена через какую-либо подчиняющуюся закону аддитивности величину, связанную с температурой функциональной зависимостью (например, ЭДС, сопротивление и т.п.).

Термопреобразователи сопротивления (ТС) относятся к числу наиболее распространенных преобразователей температуры, используемых в целях измерения и регулирования [2, 4]. Платиновые термопреобразователи сопротивления (ТСП) используются для измерения температуры в широком диапазоне и являются наиболее распространенным типом ТС. Это объясняется тем, что ТСП имеют высокую точность измерения температуры (при невысоких температурах выше, чем у термоэлектрических преобразователей), высокий температурный коэффициент сопротивления и высокую стойкость к окислению.

В промышленности наиболее распространенной является 3-х проводная схема подключения ТС к измерительным приборам. Она обеспечивает значительно более точные измерения, за счет того, что появляется возможность измерить отдельно сопротивление подводящих проводов и вычесть его из суммарного измеренного сопротивления.

Поэтому в исследованиях использованы термопреобразователи сопротивления ТС-1088 и ТС-1388 предназначенные для измерения температуры жидких, твердых, газообразных и сыпучих сред и содержащие платиновый чувствительный элемент с номинальной статической характеристикой (НСХ) 100П. Длины монтажной части взяты: 500, 400, 320, 250, 200 мм, диаметры монтажной части: 10, 8, 6 и 4 мм. Класс допуска всех термопреобразователей В, что соответствует пределу допускаемого отклонения сопротивления от НСХ $\pm(0,3 + 0,005|t|)$ °С. Предварительно все термопреобразователи прошли поверку в аккредитованной лаборатории.

В процессе проведения исследований датчики температуры погружались в предварительно нагретую воздушную среду в калибраторе температуры эталонном КТ-650. КТ-650 предназначен для воспроизведения температуры в диапазоне от +50 до +650 °С. КТ-650 применяют в качестве рабочего эталона при поверке и калибровке термопреобразователей сопротивления и преобразователей термоэлектрических с различными статическими характеристиками преобразования, а также термопреобразователей с унифицированным выходным сигналом. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения температуры составляет $\pm(0,05 + 0,0006(t))$ °С.

Конструктивно КТ-650 выполнен в виде моноблока. Основными функциональными частями являются термостатирующий блок и измеритель-регулятор температуры прецизионный. В качестве термопреобразователя в канале регулирования температуры основного блока используется высокостабильный платиновый термопреобразователь сопротивления. Термостатирующий блок имеет форму цилиндра, выполненного из бронзы, и защищен сверху и снизу охранными дисками, выполняющими функцию тепловых экранов. В термостатирующем блоке имеются 11 каналов глубиной 190 мм. Диаметры каналов: 4,5; 5,5; 6,5; 8,5; 10,5 мм.

Термопреобразователи сопротивления соединялись по 3-х проводной схеме подключения многожильным медным экранированным кабелем в изоляции из стеклонитки и фторопласта КММФЭ с измерительным прибором, в качестве которого выбран регистратор многоканальный технологический РМТ-59.

РМТ-59 предназначен для измерения, регистрации и контроля температуры и других неэлектрических величин, преобразованных в электрические сигналы силы и напряжения постоянного тока или активное сопротивление. Данные измерений, состояние реле, состояние дискретных входов, текущее время сохраняются в энергонезависимой памяти. Периодичность записи данных настроена на шаг в 1 секунду, которого достаточно для регистрации тепловых процессов, обладающих значительной инерционностью.

Просмотр накопленных в РМТ-59 данных осуществлен с персонального компьютера в специализированном программном средстве DataViewStudio. В процессе обработки данных использованы также программы Microsoft Office Excel и VisSim (рис. 1).

В настоящее время выполнен ряд исследований динамических характеристик платиновых термопреобразователей сопротивления в воздушной среде и получены значения времени термической реакции при изменении диаметра монтажной части датчика. В дальнейшем планируется исследовать динамические характеристики датчиков температуры в других средах, в первую очередь в воде, а также влияние скорости движения потока.

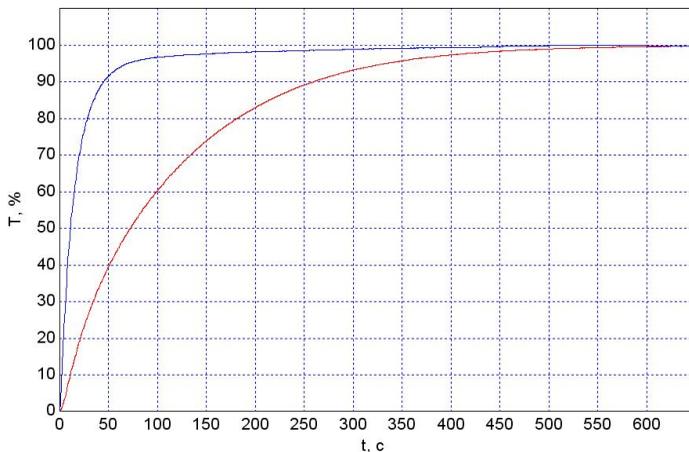


Рис. 1. Пример динамических характеристик ТСП

Литература

6. **Теплотехнические** измерения и приборы: Учебник для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С.Чистяков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 460 с.
7. **Преображенский, В.П.** Теплотехнические измерения и приборы: [учебник для вузов] / В.П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
8. **Гордов, А.Н.** Основы температурных измерений / А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А.Г. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.
9. **Электрические** измерения неэлектрических величин: [учебное пособие для вузов] / А.М. Турчин [и др.]; под ред. П.В. Новицкого. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.

УДК 681.536

Е.В. ЗАХАРОВА, к.т.н., доцент
М.С. ВЬЮГИНА, студент,
А.А. СОКОЛОВА, студент
(ИГЭУ) г. Иваново

К разработке математического обеспечения АСУТП нагрева металла в печах периодического действия

Использование теплового потока, поглощенного металлом, в качестве наблюдаемой и управляемой координаты при нагреве металла в печах периодического действия [1] позволяет исключить неопределенность, связанную с переменным во времени тепловосприятием металла и существенно упростить задачу управления нестационарным объектом.

При организации управляющего воздействия в эффективной полосе пропускания объекта влияние нестационарных свойств объекта на качество процесса управления может стать пренебрежимо малым.

Получение информации о количестве окалины, образующейся на поверхности металла в процессе нагрева [2] позволяет решать в темпе протекания технологического многокритериальные задачи экономически оптимального управления нагревом металла.

Рассматривается задача синтеза экономически оптимального управления нагревом металла.

АСУТП реализует двухуровневый алгоритм управления [3]: на верхнем уровне решается задача экономически оптимального нагрева металла, в ходе решения определяются температурный режим печи и соответствующее ему оптимальное теплопоглощение металла; на нижнем уровне осуществляется стабилизация оптимального теплопоглощения (рис. 1).



Рис. 1. Двухуровневая система управления нагревом металла

На верхнем уровне решается задача оптимизации, которая формулируется следующим образом: необходимо найти закон изменения теплопоглощения металла, при котором металл будет переведен из начального состояния t_0 в конечное, при этом интеграл

$$I = \gamma_1 \int_0^{\tau_g} F[t(R, \tau), \tau] d\tau + \gamma_2 \int_0^{\tau_g} \frac{B_a(\tau)}{Mn} d\tau \quad (1)$$

примет минимальное значение; где γ_1 и γ_2 - коэффициенты, определяющие стоимость затрат на нагрев 1 т металла, руб/т; n - число заготовок; M - масса заготовок, т; F - количество окалины, образующейся на поверхности металла в процессе нагрева; $B_a(\tau)$ - расход топлива. Задача решается с использованием принципа максимума.

Нижний уровень системы управления нагревом металла представляет собой дискретную систему стабилизации оптимального теплопоглощения, и в качестве задания на нем используется найденное

на верхнем уровне расчетным путем оптимальное теплопоглощение $q(\tau)$. Синтез системы стабилизации оптимального теплопоглощения предусматривает реализацию алгоритма регулирования, который обеспечивает максимальное прохождение регулирующего воздействия в объект при снижении текущего теплопоглощения до заданного возникает ошибка, которая поступает на логический блок с релейным выходом, выполняющий функции дискретного модулятора. Сигнал с дискретного модулятора поступает на исполнительное устройство, которое осуществляет включение в работу горелочного устройства. Текущее теплопоглощение измеряется тепломером [3], который представляет собой физическую модель процесса нагрева металла и устанавливается на уровне нагреваемого металла.

В процессе нагрева система осуществляет дискретное увеличение расхода топлива от начального B_0 до B_{max} . Величина дискретного воздействия ΔB составляет 15-25% от B_{max} и ограничена снизу технологическими возможностями системы отопления, сверху – допустимой скоростью роста температуры поверхности металла.

Литература

1. **Бровкин Л.А., Захарова Е.В.** Устройство для измерения теплового потока. Авт. свид. № 1089435. – «Открытия, изобретения, промышл. Образцы, товарные знаки», 1984, № 16, с. 140.
2. **Захарова Е. В., Девочкина С.И.** «Изв. вуз. Черная металлургия», 1987, № 2, с. 97-100.
3. **Захарова Е. В., Галанова У.Д., Морозов А.А.** Устройство для определения толщины окалины. Патент №118748 U1, опубл. 27.07.2012.

УДК 681.5.015

В.В. ДАВЫДОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ) г. Иваново

Перспективы развития автоматизированной системы поквартирного учета тепловой энергии, затраченной на отопление

В настоящее время вопрос квартирного учета тепловой энергии, затраченной на отопление жилых помещений, весьма актуален по следующим соображениям. Применяемая в настоящее время у нас в стране система квартирной оплаты за отопление основана на тарифе с одного квадратного метра жилой площади является устаревшей и не отражает реального теплоснабжения каждым квартиросъемщиком, т.к. не учитывает реальные тепловыделения теплообменных аппаратов и теплотери каждой квартиры и дома в целом, а именно: тип здания (кирпичное,

железобетонное), толщина наружных стен, характер внешней теплоизоляции, расположение квартиры в доме, внутренние источники тепловыделений, тип и качество радиаторов в помещении, температуру воздуха в помещении, вентиляционные потери, температуру наружного воздуха и ряд других факторов, определяющих реальное теплоснабжение каждой квартирой и зданием в целом. Кроме того, существующая система расчетов за потребленное тепло не учитывает даже продолжительность отопительного сезона, которая бывает различной каждый год. Непонятно, как учитываются теплотери в тепловых сетях, стоимость ремонтов тепловых сетей, стоимость топлива на электростанциях и многие другие факторы, влияющие на стоимость одной гигакалории тепловой энергии. Указанные факторы объясняют, почему существующая оценка потребленного тепла отдельными квартиросъемщиками по существующей системе нормативного теплоснабжения с одного кв. метра жилой площади не отражает фактического теплоснабжения и не стимулирует мероприятия по экономии тепловой энергии.

Современные автоматизированные системы учета тепловой энергии, затрачиваемой на отопление, появились более 20 лет назад (электронные теплосчетчики). Работа этих счетчиков основана на измерении расхода горячей воды $G_{пр}$ и $G_{обр}$, температуры теплоносителя в прямом и обратном трубопроводе ($t_{пр}$ и $t_{об}$), давления теплоносителя в прямом и обратном трубопроводе ($P_{пр}$ и $P_{об}$). Количество потребленной тепловой энергии на отопление $Q_{пот}$ легко рассчитывается по уравнению теплового баланса $Q_{пот} = G_{пр} \cdot C_{пр} : t_{пр} - G_{обр} \cdot C_{о} \cdot t_{об}$, где $C_{пр}$ и $C_{о}$ – теплоемкости горячей воды в прямом и обратном трубопроводе: $C_{пр} = F(P_{пр}, t_{пр})$; $C_{о} = F(P_{об}, t_{об})$.

Конструкции и стоимость теплосчетчиков в основном различаются методом измерения и конструкцией датчика давления и температуры. Основная приведенная погрешность теплосчетчиков составляет 2-4%. На первом этапе установки автоматизированных систем поквартирного учета теплоснабжения на отопление (АСКУТ) ограничиваются установкой общедомового теплосчетчика.

Для теплогенерирующих компаний и большинства жителей многоквартирных домов такой учет достаточно точно и объективно отражает реальное теплоснабжение жилых зданий. Распределение затрат на тепло производится между жильцами (квартирами) одного дома и может быть произведено пропорционально занимаемой жилой площади с учетом общедомовых затрат тепла в подъездах и других площадях общего пользования (тепловых пунктах, ремонтных мастерских и др.) с помощью введения соответствующих коэффициентов. Кто должен заниматься таким учетом? Соответствующие службы (кооперативы), занимающиеся продажей и установкой теплосчетчиков, а также их эксплуатацией и ремонтом под контролем теплогенерирующих компаний и тепловых сетей, обеспечивающих поставку тепловой энергии потребителям в соответ-

ствии с существующими нормативными документами и тарифами, т.е. специалисты.

Тарифная политика в системе теплоснабжения жилых зданий является отдельным и весьма проблемным вопросом, который многократно обсуждался как в местной, так и в центральной печати. Отсутствие возможности должного контроля за этой политикой со стороны наиболее заинтересованных в этом людей – квартиросъемщиков – привело к тому, что за последние 10 лет стоимость тарифов за отопление выросла более, чем в 10 раз, а стоимость 1 Гкал тепла приближается к стоимости аналогичной единицы в наиболее развитых в индустриальном отношении странах (США, Франции, Германии и др.).

Постоянное повышение тарифов на тепловую энергию наиболее болезненно сказывается на бюджете малообеспеченных слоев населения, т.е. пенсионеров, инвалидов, многодетных семей, бюджетников, проживающих в средней и северной части нашей страны. Острота проблемы в том, что более половины квартирной платы на отопление, и берется эта плата круглый год, а не только в отопительный сезон. Справедливости ради надо сказать, что многие из указанных категорий малообеспеченных граждан получают льготы от городских властей, но в целом это проблемы не решает. Необходимо ограничить рост тарифов на тепловую энергию и другие энергоресурсы в соответствии с прямыми указаниями Президента РФ В.В.Путина в границах официальной инфляции в стране. Только в этом случае имеет смысл заниматься автоматизированным учетом и экономией тепловой энергии в сфере ЖКХ.

Для реализации **первого этапа** автоматизированного учета, заключающегося в покупке, установке и обслуживании *общедомовых теплосчетчиков*, необходимы определенные затраты (1500-2000 руб. с квартиры). Откуда взять эти средства, которые, кстати, окупаются за 1-1,5 года за счет экономии тепловой энергии на 20-30% по сравнению с существующей системой учета. Эти средства могут быть выделены из накоплений, имеющихся на счетах по ремонту многоквартирных домов, субсидий городских властей, ипотек банков на льготных условиях, ссуд, предоставляемых заинтересованными специализированными организациями, занимающимися покупкой, монтажом, эксплуатацией и ремонтом теплосчетчиков.

Однако, введение общедомовых счетчиков тепловой энергии не решает проблемы поквартирного учета теплоснабжения в целом. **На втором этапе** внедрения АСКУТ необходима установка *квартирных теплосчетчиков* и автоматизированной системы сбора и обработки информации с этих счетчиков. Квартирные счетчики могут быть менее точными, погрешность измерения 4-5 % от потребленного тепла. Их стоимость и монтаж при массовом производстве не будет превышать 1500-2000 руб. с квартиры.

Какие преимущества дает установка поквартирных счетчиков?

1. Потребитель будет знать и платить за реально потребленное тепло.

2. На цифровом табло теплосчетчика кроме количества тепла, полученного от каждого отопительного прибора, будет выводиться информация о температуре помещения и средней температуре отопительного прибора.

3. с помощью автоматизированной системы сбора и обработки информации будет рассчитываться и выдаваться потребителю квитанция о расчетах за потребленную тепловую энергию в течение месяца и отопительного сезона с учетом общедомовых расходов тепла (отопление подъездов, тепловых пунктов, подводных трубопроводов и общедомовых помещений).

4. Наличие поквартирных счетчиков тепловой энергии позволит оценить эффективность мероприятий по теплосбережению (остекление балконов и лоджий, уплотнение окон и дверей, монтаж теплозащитных пленок и жалюзи, установка теплозащитных наружных покрытий и др.).

5. Наличие электронных квартирных теплосчетчиков позволит последовательно перейти к решению задач автоматического регулирования температуры помещений и программного регулирования температуры в помещениях квартиры, что несомненно выгодно с точки зрения экономии тепловой энергии и создания комфортных условий для квартиросъемщиков.

Ясно, что максимальный экономический эффект автоматизированная система поквартирного учета тепловой энергии, затраченной на отопление, даст в том случае, если все квартиры данного дома будут подключены к этой системе. Опыт внедрения систем учета расхода горячего и холодного водоснабжения показывает, что потребуется большая разъяснительная работа подтверждение экономического эффекта. Заниматься этим должны научные работники, разработчики и специалисты фирм-производителей систем учета.

Наиболее просто эта проблема решается для новых многоквартирных домов: стоимость теплосчетчиков включается в стоимость квартиры и составляет ~ 0.2-0,4% от стоимости квартиры с дальнейшим сроком окупаемости этих затрат в течение года. Для основной части жилого фонда внедрять такие системы целесообразно постепенно, по мере проведения капитального ремонта дома и замены устаревшего отопительного оборудования. При этом новые радиаторы должны быть оснащены соответствующими датчиками температуры с установкой квартирных теплосчетчиков. Эту работу должны проводить специализированные фирмы, гарантирующие качественную установку и ввод в эксплуатацию отопительного оборудования, АСКУТ, их надежную работу и обслуживание.

В настоящее время в нашей стране системы поквартирного учета потребления тепловой энергии практически не производятся. Имеется определенный опыт установки таких систем зарубежными фирмами, например, фирма «Danfoss» оборудовала своими системами микрорайон «Жулебино» г. Москвы [3], система показала высокую эффективность

энергосбережения (~30% экономии тепловой энергии). Возникает вопрос: могут ли такие системы быть разработаны и внедрены в нашей стране и заполнить весьма значительный и эффективный сегмент рынка услуг для нашего населения? Ответ: безусловно – да!

На кафедре систем управления Ивановского государственного энергетического университета в 2005г. были проведены научно-исследовательские работы [1,2] по созданию метода и средств технической реализации системы АСКУТ, не уступающей лучшим зарубежным разработкам.

Литература

1. **Давыдов В.В.** Патент RU№2287789 G01K «Способ поквартирного учета расхода тепловой энергии». 20.11.2006.- Бюл. №32.
2. **Давыдов В.В.** Автоматизированная система поквартирного учета тепловой энергии, затрачиваемой на отопление. Технология АСУТП электростанций/ Под ред. д.т.н., проф. Тверского Ю.С.: Труды междунар. научн-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения».- Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005.
3. **ЗАО «Данфосс»**, Проект «Интеллектуальный дом» в Мкр Жулебино, г. Москва. www.danfoss.ru

УДК 62.50

Р.Ф. ХАМАТХАНОВ, студент,
Р.Р. МУСТАФИН, студент,
Л.А. БАГАУТДИНОВА, студент,
А.С. ХАКИМУЛЛИНА студент
(КГЭУ) г. Казань

Интерактивные электронные технические руководства

Электронное представление информации об изделии уже давно стало нормой на мировом рынке высокотехнологичной продукции.

Еще в начале 80-х годов в автоматизированных системах эксплуатации изделий сложной техники появились программно-методические комплексы, называемые интерактивными электронными техническими руководствами (ИЭТР) и предназначенные для обучения обслуживающего персонала, проведения регламентных работ, диагностики неисправностей в энергетике.

Интерактивные электронные технические руководства (ИЭТР) - это программные продукты, в которых представлен структурированный комплекс взаимосвязанных технических данных, содержащих сведения по устройству, описанию принципов работы, правилам использования, обслуживания и ремонта, а также другую информацию.

В настоящее время ИЭТР всё более активно внедряется на предприятиях различных отраслей промышленности, в конструкторских

бюро, учебных центрах, ремонтных организациях как гражданской, так и оборонной направленности.

Характерным свойством такой документации является ее интерактивность, т.е. возможность потребителя получать необходимые сведения о процессах и процедурах в форме прямого диалога с компьютером, удовлетворяющий требованиям ИЭТР к техническим средствам и общесистемному программному обеспечению.

В настоящее время разработка ИЭТР для изделий является актуальной задачей. Это обусловлено количеством и сложностью оборудования в виде наукоемких изделий. Насыщенность изделий средствами автоматизации, электронно-вычислительной техникой требуют повышенного внимания к квалификации обслуживающего персонала. Еще одной особенностью вопроса создания ИЭТР придает то обстоятельство, что отечественные производители высокотехнологичных энергетических изделий, поставляющие свои изделия на внешний рынок, вынуждены сопровождать ее электронной версией документации, выполненной по международным стандартам. Очевидно, что поставка за рубеж готового изделия с большим объемом традиционной бумажной документации существенно снижает его конкурентоспособность, поскольку делает невозможным взаимодействие с автоматизированными системами материально-технического снабжения. Потребитель должен поддерживать большой архив бумажной документации, затруднены процедуры сервиса, заказа запасных частей и т.д. Для производителей сложной машинотехнической продукции использование ИЭТР взамен бумажной документации позволяет существенно сократить время и затраты на разработку технических руководств, а также с минимальными затратами проводить последующее обновление и коррекцию документации.

ИЭТР включает в себя базу данных (БД) и электронную систему отображения (ЭСО).

База данных - организованное управляемое хранилище технической информации.

База данных ИЭТР это хранилище всей информации об изделии. Она имеет структуру, позволяющую пользователю быстро получить доступ к нужной текстовой и графической информации, а также данным в мультимедийной форме (аудио- и видеоданные).

ЭСО необходима для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем. Информация в ИЭТР может быть дана в виде текста, графических изображений, 3D-моделей, анимации, аудио- и видеороликов. Использование аудио- и видеоданных позволяет наглядно показать выполнение любой операции, по обслуживанию или ремонту изделия. При помощи анимации можно увидеть работу систем и механизмов, недоступную на видео.

Основные элементы ИЭТР описаны как российскими так и зарубежными нормативными документами.

Среди данных документов следует выделить стандарты MIL-M-87268 "Интерактивные электронные технические руководства: Общее содержание, стиль, формат, требования к средствам обеспечения диалогового режима общения с пользователем" и MIL-D-87269 "Обновляемая и редактируемая база данных для поддержки интерактивных электронных технических руководств". В России действуют следующие аналоги данных стандартов: с Р 50.1.027-2001 по Р 50.1.31-2001.

В соответствии с стандартом Р 50.1.030-2001 выделяют несколько классов ИЭТР, каждый из которых характеризуется определенной функциональностью и стоимостью реализации:

Класс 1 - индексированные цифровые изображения страниц

ИЭТР данного класса представляет собой набор изображений, полученных сканированием страниц документации. Страницы индексированы в соответствии с содержанием, списком иллюстраций, списком таблиц и т.п.

Класс 2 - линейно-структурированные электронные документы

ИЭТР данного класса представляет собой совокупность текстов в формате SGML. Оглавление ИЭТР содержит ссылки на соответствующие разделы технического руководства. ИЭТР может содержать перекрестные ссылки, таблицы, иллюстрации, ссылки на аудио- и видеоданные.

Класс 3 - иерархически-структурированные электронные документы

В ИЭТР этого класса данные хранятся как объекты внутри хранилища информации, имеющего иерархическую структуру. Дублирование многократно используемых данных предотвращается системой ссылок на однократно описанные данные.

Класс 4 - интегрированные ИЭТР

В дополнение к функциям ИЭТР класса 3, ИЭТР данного класса обеспечивает возможность прямого интерфейсного взаимодействия с электронными модулями диагностики изделий. ИЭТР класса 4 позволяет наиболее эффективно проводить операции по поиску неисправностей в изделии, локализации сбоев, подбору запасных частей.

Из представленных классов ИЭТР наибольший интерес с точки зрения информативности и сложности создания представляет ИЭТР 4 класса. При дальнейшем развитии информационных технологий возможно появление ИЭТР следующих классов

В России, несмотря на большие затраты, связанные с внедрением информационной системы, владельцы крупных и средних предприятий понимают необходимость и огромную важность перехода на новый уровень управления предприятием или производством. Не взирая на множество неудачных попыток внедрения информационных систем, многие компании по всему миру серьезно задумываются о создании системы для улучшения своей деятельности. Скорее всего, это вполне оправдано, так как при разумном профессиональном подходе к внедрению информационной системы, можно создать инструмент для более эффективного управления бизнесом.

Разработан электронный комплекс, который может служить интерактивным техническим руководством для ремонта и обслуживания теплотехнического оборудования, а именно паровой турбины. На данный момент ведется работа по созданию и внедрению расширения 3D моделей, а также параллельно ведется создание тренажеров имитирующих функционирование изделия.

Литература

1. **Корнеев И.К., Ксандопуло Г.Н., Машурцев В.А.** Информационные технологии в управлении. – М.: 2009 – 224 с.
2. **Колесников С.Н.** Бизнес процесс реинжиниринг и внедрение автоматизированных систем управления. 2006 – 6 с.
3. **Колесников С.Н.** Стратегии бизнеса: управление ресурсами и запасами / С.Н. Колесников. – М.: Статус-Кво 97, 2009 – 402 с.
4. **Норенков И.П., Кузьмик П.К.** Информационная поддержка наукоемких изделий. – М., изд. МГТУ им. Баумана, 2007 – 320 с.
5. **Саронов А.А.** Современный подход к информационно-технической поддержке эксплуатанта / А.А. Саронов, С.Н. Кольцов, В.В. Бакаев / CALS технологии – ключ к обеспечению успеха предприятий на внутреннем и внешнем рынках: тез. докл. науч.-техн. конф. – М., 2002. – С. 43-46.

УДК 681.5:621.18

М.А. АЛЕКСЕЕВ, к.э.н., директор
К.Ю. АШМАЕВ, начальник цеха ТАИ
И.В. РУДЕНКО
(Ивановские ПГУ) г. Комсомольск

Опыт эксплуатации АСУТП энергоблока ПГУ-325

Филиал «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация» – одна из первых электростанций в стране, основу производственного комплекса которой составляет парогазовая установка мощностью 325 МВт отечественной разработки. В ее создании принимали участие крупнейшие российские производители энергетического оборудования – ОАО «НПО Сатурн», ОАО «Силовые Машины», ОАО «Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск».

АСУТП энергоблоков станции и общестанционного оборудования разработана ЗАО «Интеравтоматика» [1]. Основой системы управления является комплекс ТПТС51, созданный ФГУП «ВНИИА им. Н.Л.Духова».

Автоматизация вспомогательного оборудования выполнена с применением контроллеров Siemens SIMATIC S7. Взаимодействие систем организовано с помощью специального устройства сопряжения «Gateway».

Все линии связи систем являются резервированными.

Для управления котлами Е-50 котельной также внедрена АСУТП на базе контроллеров Siemens SIMATIC S7.

На энергоблоках широко применяются локальные системы автоматизации. Так в виде локальных АСУТП выполнено управление системами шариковой очистки конденсаторов паровых турбин, системами подготовки сжатого воздуха, автоматизированными системами газового пожаротушения и контроля загазованности теплосвукоизолирующих укрытий газотурбинных установок.

В отдельном ряду локальных АСУТП стоят системы виброконтроля и вибродиагностики газотурбинных установок ИТ14 производства ООО Научно-производственное предприятие «Измерительные технологии». Эти системы предназначены для решения специфических задач, и их обслуживание имеет свои особенности.

Взаимодействие локальных АСУТП с блочными организовано посредством обмена дискретными и унифицированными аналоговыми сигналами. Логика технологических защит, блокировок, пошаговых программ управления оборудованием реализована полностью в АСУТП энергоблоков и вспомогательного оборудования.

В АСУТП одного только энергоблока №1 обрабатывается 2444 аналоговых сигнала, 5247 дискретных сигналов. В ней реализовано 209 технологических защит, 587 технологических блокировок, имеется 25 пошаговых программ управления оборудованием.

В «Ивановских ПГУ» создание АСУТП энергоблока №1 шло одновременно с формированием коллектива цеха ТАИ. Люди, приходившие в коллектив, сразу же включались в работу в команде. Изучался проект АСУТП, анализировались принятые проектировщиками решения. Специалисты цеха ТАИ принимали непосредственное участие в наладке измерительных каналов, внедрении и опробовании алгоритмов, настройке автоматических регуляторов. Основную работу при этом выполняли специалисты наладочных организаций, но тесное сотрудничество позволило работникам цеха ТАИ быстро освоить основные приемы эксплуатации внедряемых АСУТП. Такой подход к организации работы цеха ТАИ на этапе внедрения новой АСУТП показал очень высокую эффективность.

Сейчас очевидно, что АСУТП на базе комплекса ТПТС51 является надежной системой автоматизации, достаточно простой в обслуживании и отвечающей требованиям, предъявляемым к АСУТП энергоблоков тепловых электростанций. Подтверждением этому служит то, что АСУТП ТПТС51 установлена на многих российских энергообъектах, а «прародитель» ТПТС51 – комплекс TELEPRM XP производства Siemens AG успешно эксплуатируется уже в течение многих лет на тепловых и атомных электростанциях за рубежом.

Вместе с тем, АСУТП на базе комплекса ТПТС51 имеет ряд недостатков в полной мере проявившихся при наладке системы и ее эксплуатации. Периодически возникали проблемы недостаточного быстро-

действия системы шин цифрового обмена. Также возникали сбои системной шины и модулей управления интерфейсами при резком повышении трафика. Задержки во времени прохождения сигнала между модулями и между модулями и операторскими терминалами достигали нескольких секунд.

Опыт показал, что необходимо уделять большое внимание системам цифрового обмена, используемым в АСУТП. Системная шина ТПТС51, шина терминалов системы контроля и управления верхнего уровня OM650 построена с использованием коммутаторов OSM и ESM и конвертеров серии OMC и SCALANCE производства Siemens AG. Эта аппаратура имеет весьма эффективные средства самодиагностики, которые необходимо использовать как можно более полно. Это позволяет практически полностью исключить возникновение сбоев в работе АСУТП по неочевидным причинам и помогает существенно быстрее устранять сбои в работе систем. При проектировании АСУТП энергоблока №2 проектировщиками – ЗАО «Интеравтоматика» – был учтен этот опыт.

Особенной и важной задачей АСУТП является автоматическое регулирование. Эксплуатация АСУ в условиях реального производственного процесса имеет свои особенности, требующие контроля качества регулирования.

В условиях эксплуатации оборудования энергоблоков электростанции имеют место многочисленные неконтролируемые случайные возмущения, искажающие информацию о текущих параметрах, существенные изменения характеристик объекта, многомерность и многосвязность каналов систем регулирования.

Неадекватность (весьма приближенное соответствие модели реальному объекту) используемых при расчетах математических моделей ведет к тому, что многие методы повышения качества регулирования, известные из теории автоматического управления, не дают желаемого эффекта в промышленных условиях.

Технические руководства по наладке систем автоматического регулирования, например, не содержат пригодных к работе рекомендаций по коррекции настроек при наличии типичных нелинейных особенностей исполнительных механизмов (выбега, люфтов), или по выбору соотношения между параметрами фильтров высокочастотных помех, выбираемыми настройками и зоной нечувствительности [2].

Решения, как правило, принимаются интуитивно при наладке АСУТП. Часто, для того, чтобы получить параметры настройки тех или иных регуляторов, необходимо организовать и провести в реальных условиях эксперимент с выводом оборудования из нормального режима работы, причем, иногда на длительное время.

В результате, регуляторы чаще всего имеют «всерезимные» «ослабленные» (робастные, грубые) настройки, позволяющие за счет снижения качества (иногда существенного) сохранить общую работоспособность систем регулирования при изменяющихся режимах работы

технологического оборудования. Иными словами, целью такого «ослабления» (загрубления) настроек является желание ослабить взаимное влияние контуров регулирования и, тем самым, обеспечить минимально необходимый запаса устойчивости при возможных изменениях режима работы оборудования.

В заключении можно отметить, что эксплуатация большого количества различных подсистем взаимодействующих между собой в составе АСУТП блоков электростанции, имеет определенные трудности. С другой стороны, такое построение системы управления позволяет гибко решать вновь появляющиеся производственные задачи, внедрять новые функции, повышая эффективность работы АСУТП в целом.

Для успешной эксплуатации АСУТП, от коллектива, обслуживающего систему на электростанции, требуется глубокое знание обслуживаемой АСУТП, понимание стоящих задач и постоянное стремление к достижению наилучшего результата.

Литература

13. **Биленко В.А., Черномзав И.З., Артанов С.В.** и др. Опыт разработки и внедрения АСУТП ПГУ-325 Ивановской ГРЭС // Электрические станции. – 2009. – №2. – С. 25-35.

14. **Тверской, Ю.С.** Диагностирование характеристик регулирующей арматуры в системах управления энергоблоков / Ю.С. Тверской, Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, С.А. Бушмакин, М.Ю. Соловьев, И.Е. Харитонов, Ю.В. Наумов // Теплоэнергетика. – 2012. – №2. – С. 51-57.

УДК 681.5:621.18

О.Ю. ГУРЫЛЕВ, к.т.н., директор,
А.Я. МЫС, нач. цеха ТАИ,
Н.Н. КОЧЕТКОВА, инженер
(Калининградская ТЭЦ-2) г. Калининград

Опыт эксплуатации программно-методического комплекса диагностирования регулирующих клапанов «AutoStation» на Калининградской ТЭЦ-2

Калининградская ТЭЦ-2 – теплоэлектроцентраль с парогазовым бинарным циклом. Станция находится в Калининградской области, самом западном регионе России, который полностью отделен от остальной территории страны сухопутными границами иностранных государств. Пуск первого энергоблока станции установленной мощностью 450 МВт состоялся 28 октября 2005 года.

В ходе эксплуатации энергоблока возникла необходимость в диагностировании регулирующих клапанов (РК). Руководством было принято решение о создании комплекса по диагностированию РК автома-

тизированным способом. Разработка программного обеспечения по обработке данных, формированию отчета и анализу расходных характеристик была выполнена специалистами Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина [1].

Так в 2006-2007 гг была проведена работа по установке и наладке программы AutoStation «Автоматизированное диагностирование регулирующих клапанов энергоблока ПГУ-450 и общестанционного оборудования Калининградской ТЭЦ-2». В ходе работы был сформирован архив трендов сигналов, полученных как в режиме штатной эксплуатации, так и в результате экспериментальных испытаний по специально разработанным и утвержденным программам. Необходимость в специальных испытаниях определялась для каждого клапана по результатам штатного диагностирования или по технологическим соображениям с целью оценки работы клапана в требуемом диапазоне по степени его открытия (в предельном случае – в диапазоне 0–100 % УП). Итогом проведенной работы явилось создание альбома расходных характеристик РК с указанием на проблемные места, а именно наличие люфта, дребезг указателя положения, малый регулирующий диапазон и т.п. Так же были выданы рекомендации по необходимости и периодичности диагностирования клапанов энергоблока и общестанционного оборудования.

Особое внимание хотелось обратить на то, что с введением в эксплуатацию программно-методического комплекса AutoStation появилась возможность выполнять диагностику РК, находящихся постоянно в работе, отвечающих за стабильность технологического процесса, например, таких как РПК ВД КУ (регулирующий питательный клапан высокого давления котла-утилизатора), РПК НД КУ (регулирующий питательный клапан низкого давления котла-утилизатора). Вторым важным преимуществом AutoStation является открытость программного обеспечения, что позволяет эксплуатирующему персоналу самостоятельно адаптировать программный продукт под вновь вводимое оборудование. Так инженерами станции выполнена работа по расширению базы анализируемых регуляторов в связи с вводом в эксплуатацию энергоблока №2.

На Калининградской ТЭЦ-2 ежегодно составляется и утверждается график периодической проверки регулирующих клапанов. В ходе работы отслеживается тенденция изменения характеристик РК и выдаются рекомендации службе технического обслуживания станции для проведения очередной ревизии клапана либо о его замене. Так, например, крайней работой по данной теме явился ремонт затвора регулирующего расход химически очищенной воды к эжектору вакуумного деаэратора, у которого был выявлен люфт более 10% (рис.1). После осмотра арматуры и замены механических составляющих клапана величина люфта уменьшилась в 2 раза (рис.2). Так же за время эксплуатации основного и вспомогательного технологического оборудования произведена не одна замена регулирующей арматуры.

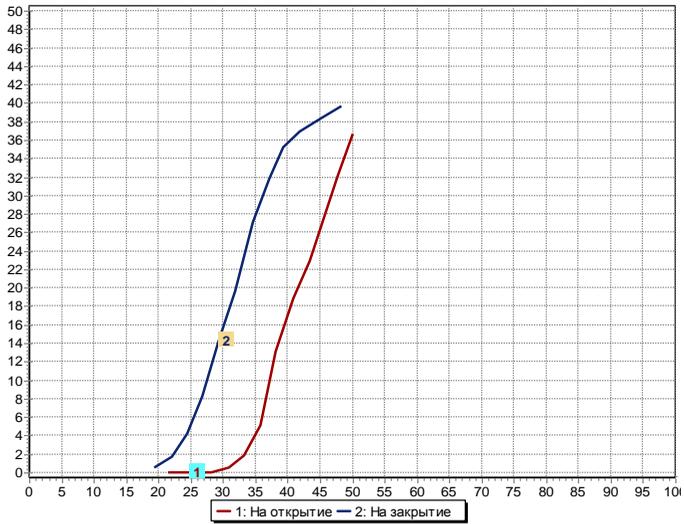


Рис. 1. Расходная характеристика РК ОВ ЭЖ ВАК Д 00NDF26AA101 на основе данных за период: 18.02.2013 – 18.02.2013

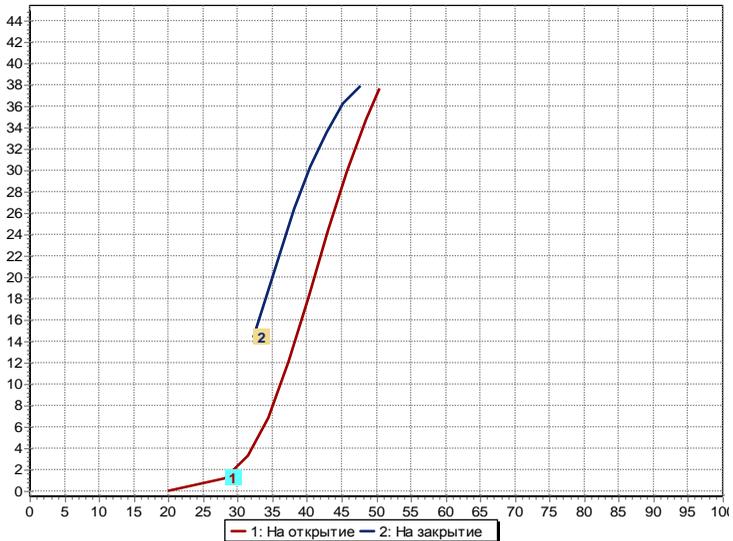


Рис. 2. Расходная характеристика РК ОВ ЭЖ ВАК Д 00NDF26AA101 на основе данных за период: 06.03.2013 – 06.03.2013

Подводя итог вышеизложенному можно отметить, что программный продукт AutoStation является завершенным и в настоящее время «заточенный» под оборудование Калининградской ТЭЦ-2, со стороны инженеров АСУ ТП, непосредственно занимающихся работой с данной программой, нарекания к функционированию и полноте выполняемых функций отсутствуют.

Литература

15. **Тверской, Ю.С.** Диагностирование характеристик регулирующей арматуры в системах управления энергоблоков / Ю.С. Тверской, Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, С.А. Бушмакин, М.Ю. Соловьев, И.Е. Харитонов, Ю.В. Наумов // Теплоэнергетика. – 2012. – №2. – С. 51-57.

УДК 621.18 - 5

Г.Т. КУЛАКОВ, д.т.н., профессор,
С.А. ПОДЖАРОВ, аспирант
(БНТУ), г. Минск

Метод оптимизации динамической настройки регуляторов впрысков с использованием феномена золотого сечения

Качество регулирования температуры перегретого пара существенно влияет на долговечность пароперегревателя и экономичность работы парогенератора.

Широкое распространение получили двухконтурные системы автоматического регулирования (САР) с дифференцированием промежуточного сигнала. Расчет параметров динамической настройки таких систем основан на декомпозиции двухконтурной САР на две одноконтурные. Расчет параметров динамической настройки дифференциатора осуществляется по передаточной функции инерционного участка пароперегревателя, представленный инерционным звеном первого порядка с запаздыванием, например по методу полной компенсации в частном виде БНТУ[1]. При этом расчет параметров оптимальной динамической настройки регулятора производят по методу частичной компенсации (МЧК) на базе передаточной функции опережающего участка пароперегревателя с учетом коэффициента передачи дифференциатора.

Вместе с тем физически более точно отражает динамику пароперегревателя передаточная функция инерционного звена n -ого порядка с одинаковыми постоянными времени. Для этого случая предлагаем метод оптимизации динамической настройки регуляторов впрысков на основе использования феномена золотого сечения [2]. Для определе-

ния оптимальных при отработке крайнего внешнего возмущения параметров динамической настройки дифференциатора с использованием чисел ряда золотого сечения за целое принимается обобщенная постоянная времени, равная произведению nT_0 . При расчете параметров динамической настройки регулятора на оптимальную отработку внутренних возмущений вместо традиционных коэффициентов Вышнеградского равных 2,539 и 1,853 в формулах МЧК предложено использовать коэффициенты 2,618 и 1,382 соответственно, уточненные согласно ряда чисел правила золотого сечения. Это привело к существенному повышению отношения коэффициента передачи регулятора по времени его интегрирования, что улучшило качество регулирования.

Моделирование переходных процессов было проведено для регулятора впрыска парогенератора БКЗ–420–140 НГМ МТЭЦ–4. Моделирование выполнено с использованием передаточной функции инерционного участка пароперегревателя в виде инерционного звена четвертого порядка с постоянной времени $T_0 = 39,5$ сек. Если при отработке скачка задания системы, оптимизированной традиционным методом, максимальная величина перерегулирования составило 25% при степени затухания переходного процесса $\Psi = 0,71$, то при использовании предлагаемого метода максимальная величина перерегулирования составляет 2,5% при степени затухания $\Psi = 1$. При этом оптимальная величина времени дифференцирования равнялась $0,618nT_0$.

При отработке внутренних возмущений максимальная динамическая ошибка регулирования не превышает 7% при степени затухания $\Psi = 1$.

Отработка крайнего внешнего возмущения осуществляется с максимальной динамической ошибкой регулирования, не превышающей 40% от величины возмущения при степени затухания, равной $\Psi = 1$ вместо $\Psi = 0,67$ при традиционном методе расчета. Таким образом, предложенный метод расчета, параметров оптимальной динамической настройки регуляторов впрысков, позволяет существенно улучшить качество регулирования по сравнению с традиционными методами.

Литература

1. Кулаков Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: Учеб. Пособие. – Мн.: УП «Технопринт». 2003.
2. Сороко Э.М. Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем: введение в общую теорию гармонизации систем. – М.: «Академия Тринитаризма». 2006.

СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ»

УДК 621.928

МИЗОНОВ В.Е., профессор,
СОЛОПАНОВА К.А., аспирант,
БАРАНЦЕВА Е.А., профессор,
(ИГЭУ) г. Иваново
H. BERTHIAUX, prof., C. GATUMEL, Dr.-Eng.
(Ecole des Mines d'Albi, France)

Некоторые задачи оптимизации периодического смешивания сегрегирующих компонентов

При смешивании сыпучих материалов часто возникает необходимость смешать компоненты, склонные к сегрегации друг относительно друга, причем доля сегрегирующего ключевого компонента в смеси может быть достаточно велика (до 50%). Целью настоящей работы является формальный поиск путей повышения качества таких смесей, которые, однако, потом могут найти аппаратную реализацию. Основой моделирования является теория цепей Маркова, где матрица переходных вероятностей P является образом смесителя, а вектор состояния S – образом распределения ключевого компонента в смесителе. Сначала положим, что весь склонный к сегрегации компонент в начальный момент находится наверху смеси, как это обычно и бывает при традиционной загрузке смесителя периодического действия. При приведении частиц в подвижное состояние начинается их диффузионное перемешивание, характеризуемое симметричной вероятностью переходов d , асимптотически обеспечивающее при отсутствии сегрегации равномерную смесь. При наличии сегрегации частицы ключевого компонента имеют направленную вниз конвективную составляющую переноса, характеризуемую переходной вероятностью v .

Кинетика процесса описывается рекуррентным матричным равенством

$$S_{k+1} = P S_k, \quad k=1, \dots \tag{1}$$

где k – номер временного перехода.

В линейных моделях принимается, что матрица P постоянна и имеет вид (пример для пяти ячеек-состояний)

$$P = \begin{bmatrix} 1-v-d & d & 0 & 0 & 0 \\ d+v & 1-v-2d & d & 0 & 0 \\ 0 & d+v & 1-v-2d & d & 0 \\ 0 & 0 & d+v & 1-v-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & d+v & 1-d \end{bmatrix}. \tag{2}$$

В работе [1] показано, что асимптотическое распределение будет равномерным, если сумма элементов в каждой строке равна единице. Очевидно, что матрица (2) удовлетворяет этому условию только если $v=0$, то есть при отсутствии сегрегации. При ее наличии получение смеси с равномерным распределением компонентов невозможно даже теоретически. Однако оно станет возможным, если внести в матрицу следующую корректировку

$$P = \begin{bmatrix} 1-v-d & d & 0 & 0 & v \\ d+v & 1-v-2d & d & 0 & 0 \\ 0 & d+v & 1-v-2d & d & 0 \\ 0 & 0 & d+v & 1-v-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & d+v & 1-d-v+v \end{bmatrix}, \quad (3)$$

физический смысл которой состоит в отборе доли v сегрегирующего компонента из нижней ячейки и переноса ее наверх смеси. Естественно, что такой процесс может быть реализован только тогда, когда есть эффективный способ отделения сегрегирующего компонента от основного на дне смесителя (например, разделение компонентов по крупности).

Реальный процесс смешивания является нелинейным, так как вероятности v конвективного переноса зависят от содержания компонента в ячейке, в которую происходит переход. В первом приближении эту нелинейность можно описать зависимостью

$$v_{jk} = v_0(1 - S_j + 1k), \quad (4)$$

которая предполагает, что предельное содержание компонента в ячейке равно единице. В этом случае матрица P имеет вид

$$P_k = \begin{bmatrix} 1 - v_1^k - d & d & 0 & 0 & v_c \\ d + v_1^k & 1 - v_2^k - 2d & d & 0 & 0 \\ 0 & d + v_2^k & 1 - v_3^k - 2d & d & 0 \\ 0 & 0 & d + v_3^k & 1 - v_4^k - 2d & d \\ 0 & 0 & 0 & d + v_4^k & 1 - d - v_c \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где v_c – вероятность циркуляционного переноса и может быть названа скоростью циркуляции.

Если оценивать качество смеси среднеквадратичным отклонением содержания ключевого компонента σ , то задача состоит в том, чтобы найти скорость циркуляции v_c , при которой $\sigma_k = \sigma_{kopt}$ имеет минимальное значение. На рис.1 показано влияние скорости циркуляции на предельно достижимое значение $\sigma_k = \sigma_{kopt}$ для разных скоростей сегрегации v .

Как и следовало ожидать, можно подобрать такую скорость циркуляции, при которой возможно достижение равномерной смеси, несмотря на наличие сегрегации (на оси ординат – предельно достижимые $\sigma_k = k_{opt}$ при отсутствии циркуляции).

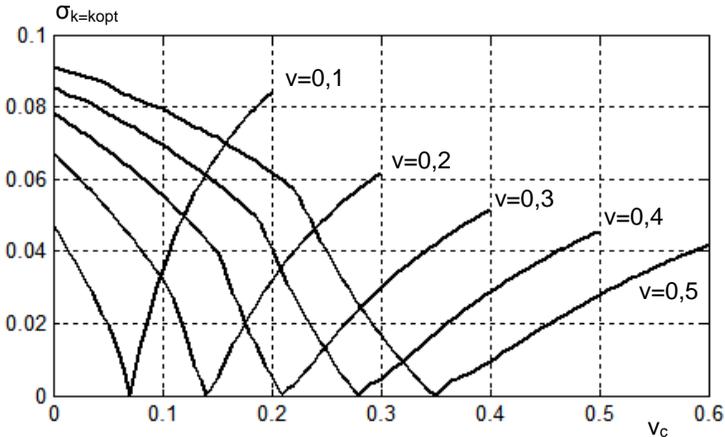


Рис.1. Влияние скорости циркуляции на предельное качество смеси при различных скоростях сегрегации ($d=0,1$)

Численные эксперименты показали, что величина оптимальной скорости циркуляции практически не зависит от вероятностей диффузионного переноса d , а само оптимальное значение v_c линейно возрастает с ростом v .

Существование принципиальной возможности оптимального решения позволяет перейти к его аппаратной реализации в различных вариантах. Например, в вибрационном смесителе при разной крупности компонентов может быть эффективной установка в нижней части периодического смесителя вибросита, подрешетный продукт которого (сегрегирующий компонент) подается элеватором в верхнюю часть смесителя. При этом следует заметить, что в реальных условиях кинетика смешивания будет зависеть от временной задержки перехода из нижней ячейки в верхнюю, что не учтено в описанной выше модели и является предметом ее дальнейшего развития.

Литература

1. Мизонов, В.Е. Зайцев В.А., Волинский В.Ю., Бобков С.П. Моделирование, расчет и оптимизация тепломассообменных процессов в текстильной промышленности. Монография // ГОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Иваново, 2010. – 204 с.

САХАРОВ А.А., аспирант,
 МИЗОНОВ В.Е., профессор,
 ЕЛИН Н.Н., профессор,
 ЛЕЗНОВА Н.Р., доцент
 (ИГЭУ, ИГАСУ) г. Иваново

Моделирование двумерной теплопроводности в составной стенке с фазовыми переходами

Одномерная модель теплопроводности для расчета термического сопротивления ограждающих конструкций зданий не является достаточно информативной, поскольку, например, не может описать промерзание угловых стыков стен, а также тепловое состояние в окрестности закладных деталей. Ниже описана ячеечная модель двумерной теплопроводности с фазовыми переходами в составной области сложной конфигурации, пример которой показан на рис.1а.

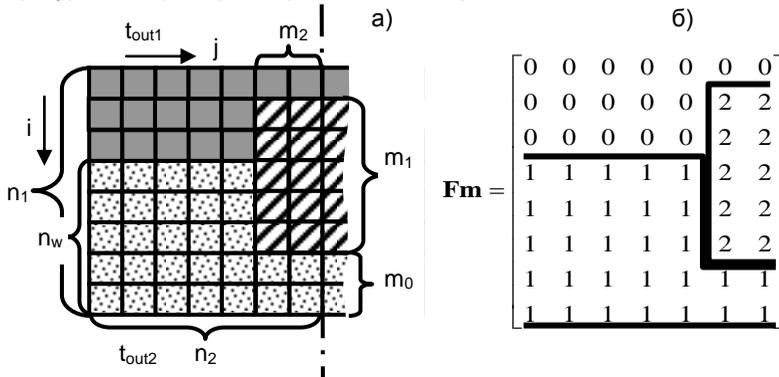


Рис.1. Ячеечная модель составной стенки (а) и ее матрица формы (б)

Разобьем исследуемую область на прямоугольную сетку квадратных ячеек со стороной Δx , выделив на этой сетке ячейки, принадлежащие внешней окружающей среде (0), стенке (1) и закладной детали (2). Конфигурация рассматриваемого элемента может быть представлена матрицей формы, показанной на рис.1б. Областям 1 и 2 приписаны свои теплофизические свойства: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность, причем свойства области 1 характеризуются двумя наборами этих свойств – для материала стенки с содержащейся в ней капельной влагой и с замерзшей влагой, причем граница между этими зонами заранее неизвестна. Эволюция теплоты в ячейках описана рекуррентным матричным равенством

$$Q^{k+1} = P_Q(Q^k + \Delta Q_e^k \pm \Delta Q_{ph}^k), \quad (1)$$

где \mathbf{Q}_{k+1} и \mathbf{Q}_k – векторы последующего и текущего распределения теплоты по ячейкам, $\Delta \mathbf{Q}_{ek}$ – вектор теплоты, передаваемой крайним ячейкам стенки и закладной детали от окружающей среды путем теплоотдачи, $\Delta \mathbf{Q}_{phk}$ – вектор теплоты фазового перехода, имеющий ненулевое значение в той ячейке, где этот переход происходит, \mathbf{PQ} – матрица теплопроводности для теплоизолированной по периферии зоны моделирования. Кроме того, процесс характеризуется вектором содержания замерзшей влаги в ячейках \mathbf{Mk} . Векторы состояния формируются из соответствующих матриц при их сквозной нумерации по столбцам.

Правила построения переходной матрицы \mathbf{PQ} для среды с меняющимися свойствами подробно описаны в [1]. Ее элементы $PQ_{i,j}$ показывают доли теплоты, переносимой в течение одного временного перехода из ячейки j в ячейку i . Особенностью предлагаемой модели является корректировка вектора температуры в тех ячейках, где начинается фазовый переход (замерзание влаги), расчет количества образовавшегося льда и замену теплофизических свойств в ячейках, где фазовый переход завершился (замерзла вся влага).

Рекуррентная матричная процедура (1) вместе с правилами построения входящих в нее величин полностью описывает тепловой процесс в ограждающей конструкции в окрестности закладной детали, включая промерзание стенки. Расчеты выполняются на базе универсального вычислительного алгоритма, особенно удобного для реализации в среде MATLAB. Он позволяет легко учитывать конфигурацию детали и другие конструктивные особенности процесса.

На рис.2 показаны некоторые результаты численных экспериментов, демонстрирующих работоспособность модели. Это поле температуры и конфигурация зоны промерзания в кирпичной стенке при различном расположении стальной закладной детали. При отсутствии закладной детали стенка промерзает на глубину в 4 внешних ячейки (около 22 см). Это видно в левых частях всех графиков промерзания, удаленных от закладной детали. При погружении детали на 1/3 длины (рис.2а) в ее окрестности зона промерзания углубляется и расширяется, охватывая нижний торец детали. При таком расположении деталь имеет относительно большую поверхность охлаждения низкотемпературной окружающей средой и за счет высокой теплопроводности «распространяет холод» внутрь стенки. При дальнейшем погружении детали в стенку (рис.2б) ситуация сохраняется, но меняется количественно: под нижним торцом детали промерзает уже один ряд ячеек вместо двух. Она меняется принципиально, когда деталь погружена в стенку полностью (рис.2в).

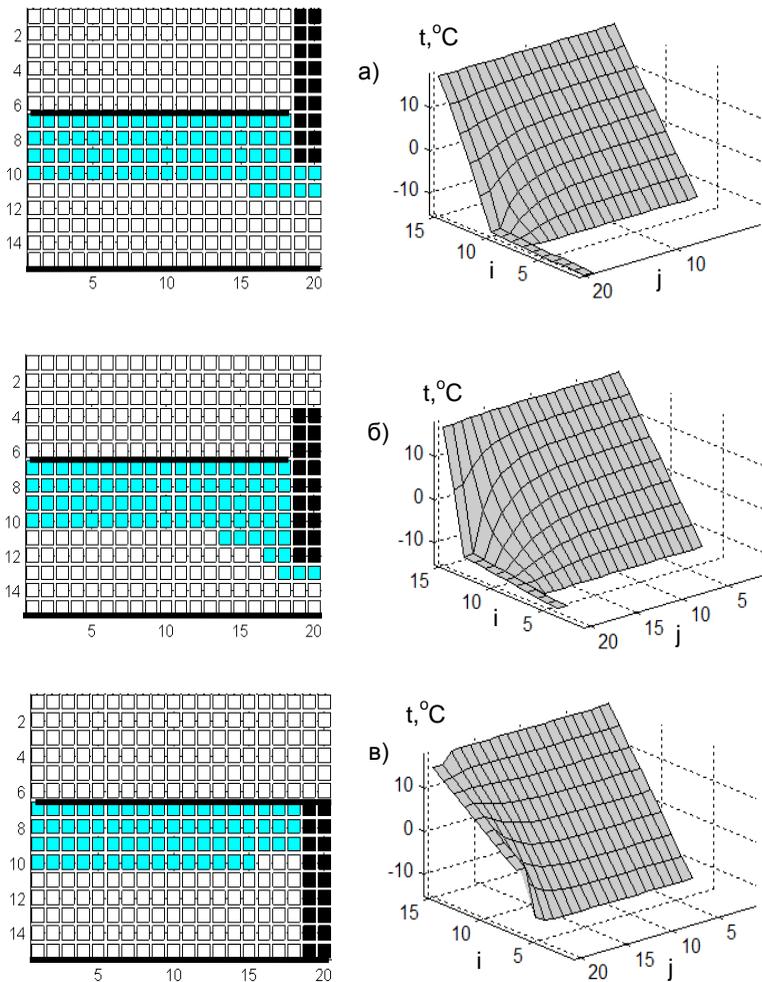


Рис.2. Поле температуры и конфигурация зоны промерзания в кирпичной стенке (светлые квадраты) при различном расположении стальной закладной детали (черные квадраты): $t_{out1} = -15 ^\circ\text{C}$; $t_{out2} = +18 ^\circ\text{C}$; $L = 0,5 \text{ м}$

Здесь она соприкасается одинаковыми торцовыми поверхностями с холодной и теплой окружающей средой, но поскольку температура теплой стороны выше, то теплота хорошо распространяется к наружной части стенки, прогревая примыкающую к ней зону, в результате чего зона промерзания немного сокращается. Приведенные на тех же рисунках установившиеся поля температуры полностью подтверждают картину зон промерзания.

Литература

1. **Алюян Р.М.**, Федосов С.В., Мизонов В.Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Иван. гос. архит.-строит. ун-т; Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2011. – 256 с.

УДК 620.19

И.И. ДРИГАНОВИЧ, аспирант,
В.Е. МИЗОНОВ, проф., Н.Н. ЕЛИН, профессор,
Н.Р. ЛЕЗНОВА, доцент
(ИГЭУ, ИГАСУ) г. Иваново

Моделирование ионообменных процессов в сферическом зерне ионита

Рассматривается задача о диффузии примеси в сферическое зерно ионита и ее улавливании там путем ионообменной реакции. Если зерна ионита в аппарате находятся в состоянии кубической упаковки, то путем показанной на рис.1 процедуры можно окружить зерно сферическим слоем эквивалентного диаметра и свести задачу к осесимметричной (аналогичная процедура может быть проделана для гексагональной упаковки, а опытным путем – для любой случайной).

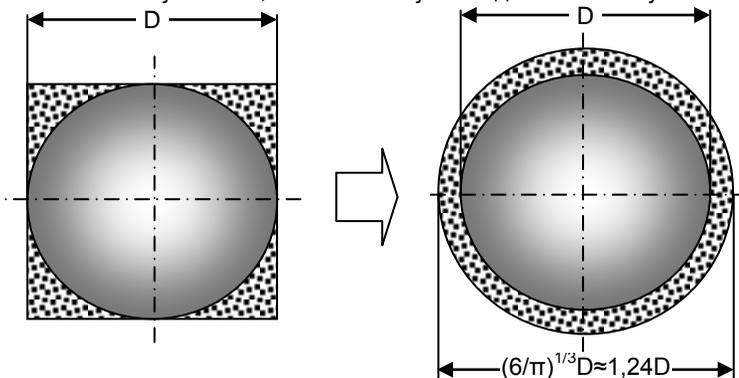


Рис.1. К процедуре сведения расчетной схемы к осесимметричной

Для описания процесса разработана ячеечная модель, в которой зерно и окружающий его слой жидкости разбиты по радиусу на m ячеек – шаровых слоев одинаковой радиальной толщины Δr , где слои $1, \dots, m_1$ принадлежат зерну, а слои m_1+1, \dots, m – окружающей жидкости. Распределение примеси по ячейкам описывается вектором-столбцом \mathbf{C}_{im} , а его эволюция – рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{C}_{imk+1} = \mathbf{PC}(\mathbf{C}_{imk} - \Delta \mathbf{C}_{imk}), \quad (1)$$

где $\Delta \mathbf{C}_{imk}$ – вектор поглощения примеси ионитом на каждом временном переходе k , \mathbf{PC} – матрица диффузии в многослойном шаре.

Правила построения такой матрицы описаны в работе [1] и могут иллюстрироваться следующим ее фрагментом

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} \dots & 0 & \dots & \dots \\ \dots & d_1 \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_{j-1}}\right)^2 & 0 & \dots \\ \dots & 1 - d_1 \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_{j-1}}\right)^2 - d_1 \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_{j-1}}\right)^2 & d_1 \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_j}\right)^2 & \dots \\ \dots & d_1 \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_{j-1}}\right)^2 & 1 - d_1 \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_j}\right)^2 - d_2 \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_j}\right)^2 & \dots \\ \dots & 0 & d_2 \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_j}\right)^2 & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

записанным для границы между ячейками, где происходит скачок диффузионного параметра от d_1 в ядре до d_2 в жидкости.

Для дальнейшего построения модели допустим, что постоянная скорости прямой реакции много больше постоянной скорости обратной реакции, в результате чего кинетика реакции может быть описана простым дифференциальным уравнением

$$\frac{d\mathbf{C}_{im}}{dt} = -K\mathbf{C}_{im}\mathbf{C}_i \quad (3)$$

и вытекающим из него рекуррентной разностной схемой

$$\mathbf{C}_{im}^{k+1} = \mathbf{C}_{im}^k - K\mathbf{C}_{im}^k \cdot \mathbf{C}_i^k \Delta t, \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_i^{k+1} = \mathbf{C}_i^k - K\mathbf{C}_{im}^k \cdot \mathbf{C}_i^k \Delta t, \quad (5)$$

где K – постоянная скорости реакции, \mathbf{C}_i – вектор концентрации ионов, Δt – продолжительность временного перехода. Упрощенное представление реакции ионного обмена не вносит каких-либо ограничений в саму модель, так как в численную процедуру решения легко может быть встроена кинетика реакции любой сложности.

Равенства (1)-(5) полностью описывают кинетику процесса, если известны его параметры: скорость реакции ионного обмена и коэффициенты диффузии примеси в окружающей зерно жидкости, и в жидкости, содержащейся в порах зерна ионита. На рис.2 показан пример моделирования процесса в виде графиков эволюции распределения по радиальным ячейкам примеси и готовых к обмену ионов ионита при различных комбинациях диффузионных параметров

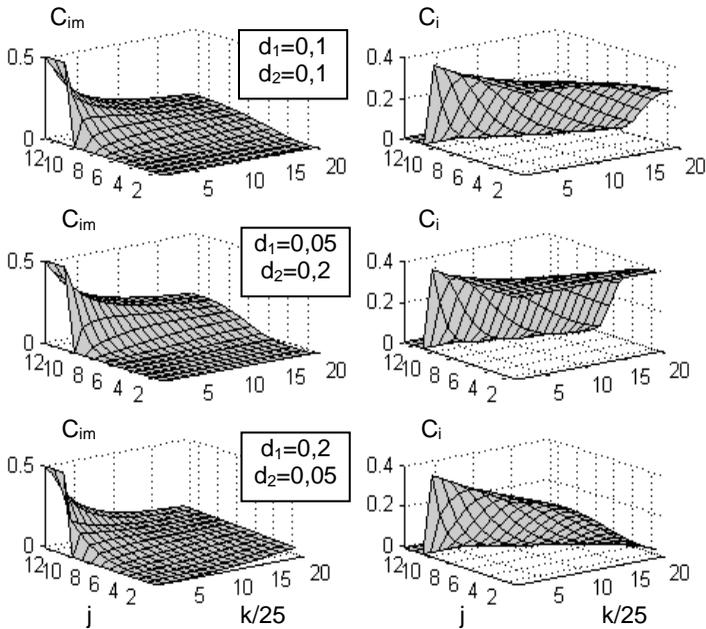


Рис.2. Эволюция содержания примеси в растворе и ионов в ионите при различных параметрах диффузии

При $d_1=d_2=0,1$ примесь достаточно медленно проникает внутрь зерна ионита. За 500 временных переходов значительная часть ионов в ядре зерна остается неиспользованной. Ситуация становится еще хуже, если скорость диффузии в окружающей жидкости повышается, а внутри зерна уменьшается ($d_1=0,05$, $d_2=0,2$). Здесь за 500 переходов ядро зерна еще не принимает участия в реакции ионного обмена. Если же увеличивается скорость диффузии внутри зерна ($d_1=0,2$, $d_2=0,05$), то за те же 500 переходов реагируют почти все ионы ионита, а концентрация примеси снижается практически до предельно возможной при данных начальных концентрациях. ПО известному распределению концентраций легко перейти к их

средним значениям в окружающей жидкости и в зерне, которыми обычно оперируют в традиционных методах расчета, заведомо вносятся эти заметную погрешность, так как перенос идет по локальным, а не средним значениям потенциалов переноса.

Литература

1. **Зайцев В.А.**, Мизонов В.Е., Елин Н.Н. Моделирование, оптимизация и расчет тепловых процессов (Опыт использования ячеечных моделей): Монография; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2012. -200 с.

УДК 666.86

Н.Н. ЕЛИН, профессор,
А.В. ПОПЕЛЫШКО, аспирант,
В.А. МЫЛЬНИКОВ, доцент
(ИГАСУ, Норильский индустриальный институт)

Моделирование замерзания неподвижной жидкости в сечении трубопровода

Настоящая работа является составной частью моделирования тепловых процессов в длинных трубопроводах наружной прокладки, работающих при низких отрицательных температурах, например, в условиях Крайнего Севера. В этой части рассматривается задача замерзания жидкости в сечении трубопровода при аварийной или плановой остановке ее подачи, когда важно знать располагаемое время для выполнения ремонтных работ. Предлагаемое решение задачи сведено к решению уравнения осесимметричной теплопроводности в круговом домене с фазовыми переходами (замерзание жидкости в трубопроводе) с разными теплофизическими свойствами, меняющимися по границе фазового перехода. Поскольку задача является существенно нелинейной, была разработана ячеечная модель для ее численного решения. Из плоского кругового сечения выделен угловой сектор, разбитый по радиусу на совокупность колец-ячеек с малой одинаковой радиальной шириной и для него составлена матрица теплопроводности, учитывающая разные теплофизические свойства ячеек и фазовые переходы [1]. Не останавливаясь на записи основных уравнений модели, сводящейся к рекуррентному матричному алгоритму, приведем некоторые результаты моделирования, демонстрирующие работоспособность модели (рис.1,2).

На рис.1 показана эволюция распределения температуры в жидкости и продвижение вглубь трубы фронта промерзания при скачкообразном снижении окружающей температуры от +5 до -20оС. Горизонтальные площадки на графике температуры соответствуют фазовым переходам, когда остывания внутренних ячеек не происходит до тех

пор, пока полностью не замерзла вода во внешних ячейках.

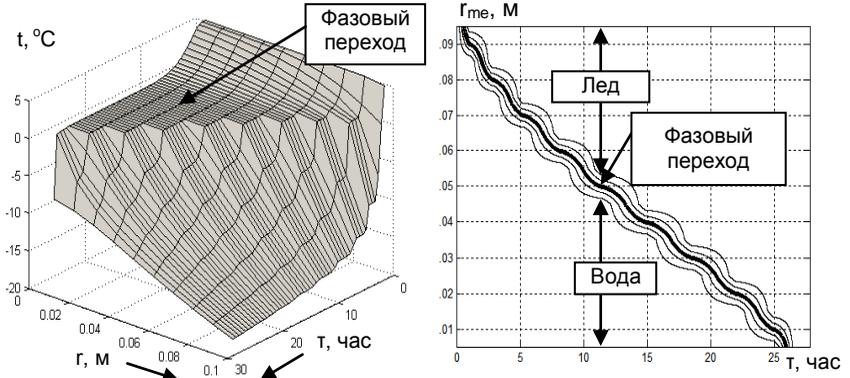


Рис.1. Эволюция распределения температуры и продвижение фронта замерзания при скачкообразном снижении температуры окружающей среды

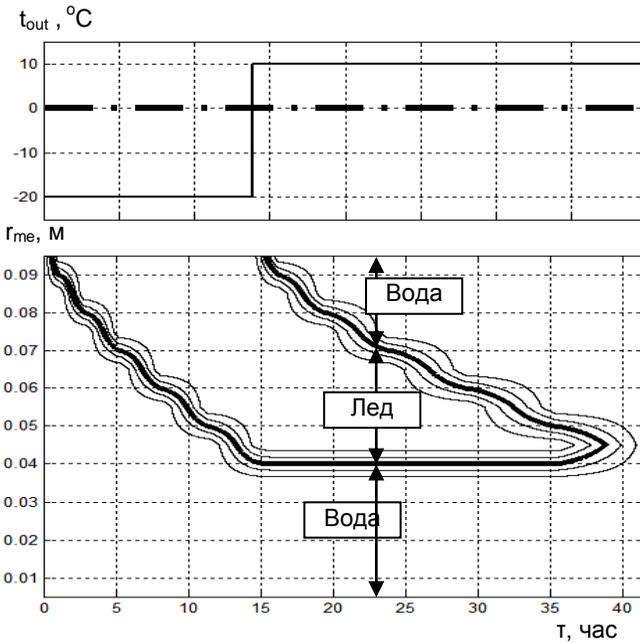


Рис.2.. Продвижение фронта замерзания при переменной температуре окружающей среды

На рис.2 показано продвижение фронта замерзания при скачке окружающей температуры сначала до -20°C , а затем до $+10^{\circ}\text{C}$ (верхний график). Оттаивание жидкости начинается с периферии, и полый цилиндр льда сокращается с внешнего радиуса. Таким образом, модель может описывать как прямые, так и обратные фазовые переходы.

Литература

1. **Зайцев В.А.**, Мизонов В.Е., Елин Н.Н. Моделирование, оптимизация и расчет тепловых процессов (Опыт использования ячеечных моделей): Монография; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2012. -200 с.

УДК 666.86

В.В. КОСТАРЕВ, аспирант,
В.Е. МИЗОНОВ, профессор
(ИГЭУ) г. Иваново

Моделирование осесимметричной конвективной влагопроводности в круге переменного радиуса

Моделирование и расчет распределения влаги по вращающемуся рулону ткани и управление этим распределением является одной из актуальных задач отделочных производств текстильной промышленности. Ячеечная модель конвективного влагопереноса в рулоне постоянного радиуса описана в работе [1]. Однако во многих случаях особенностью процесса является увеличение радиуса рулона по мере намотки ткани и внесение новых порций влаги. Поскольку распределение влаги по рулону может оказывать заметное влияние на протекающие в ткани физико-химические процессы, возникает задача о моделировании этого процесса, которому и посвящена настоящая работа.

В основу предлагаемого описания также положена ячеечная модель осесимметричной конвективной влагопроводности в круговой области переменного радиуса, где из рулона максимального радиуса выделен сектор, разбитый по радиусу на конечное число ячеек m переменного объема. На рис.1 показана упрощенная линейная модель исследуемого процесса. Распределение содержания влаги по ячейкам представлено вектором-столбцом размером, равным числу выделенных ячеек m . Процесс наблюдается через малые конечные промежутки времени с текущим номером временного перехода k . Для каждого временного перехода построена матрица конвективной влагопроводности \mathbf{P} , включающая в себя симметричные переходы влаги между ячейками d , обусловленные чистой влагопроводностью, и направленные к периферии конвективные переходы v_j , обусловленные центробежной силой, причем последние считаются пропорциональными массовой плотности (ускорению) центробежной силы.

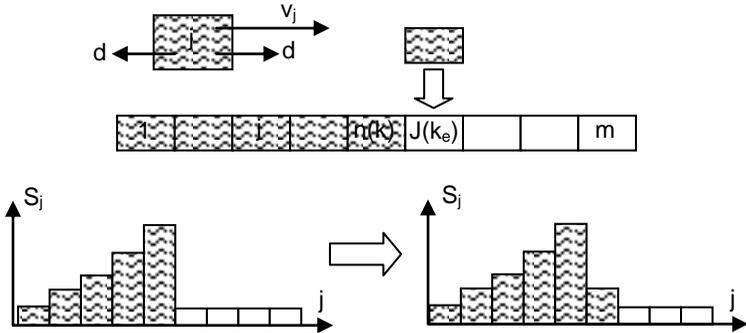


Рис. 1. К построению ячеечной модели процесса

Эти переходы зависят от угловой скорости рулона, которая меняется в процессе намотки, и от радиуса ячейки. Процесс описывается рекуррентным матричным равенством

$$S_{k+1} = P(S_k + Se(k_e(k))), \quad (1)$$

где S_k – текущий вектор содержания влаги, $Se(k_1(k))$ – вектор источника влаги, подаваемой я ячейку J в моменты времени k_e . Очевидно, что число рабочих, то есть включенных во влагоперенос ячеек цепи возрастает с течением времени.

Матрица конвективной влагопроводности составлена для всех m сформированных ячеек цепи, но специальный оператор включает только те ее n элементов, которые соответствуют текущему радиусу рулона. Поскольку толщина ткани много меньше радиального размера ячейки, процедура увеличения радиуса по мере намотки дискретизируется и выполняется следующим образом. Если в какой-то момент времени радиус рулона соответствует некоторому целочисленному количеству ячеек $n(k)$, то рассматривается конвективная влагопроводность именно в этой области постоянного радиуса. Одновременно рассчитывается намотка ткани на этот радиус, и когда толщина намотанной ткани сравняется с радиальным размером ячейки, подключается новая ячейка $J(k_e)$ с содержанием влаги, равным ее содержанию в наматываемой ткани. Эта процедура наглядно изображена на рис.1. Следует иметь в виду, что цепь ячеек в угловом секторе рулона имеет переменный по радиусу объем (не так, как условно показано на рис.1), что учтено при построении матрицы P введением специальных поправочных множителей к ее элементам. Таким образом, полученное рекуррентное матричное равенство (1) описывает эволюцию содержания влаги в рулоне переменного радиуса.

На основе разработанной модели выполнены численные эксперименты, демонстрирующие влияние конструктивных и режимных факто-

ров процесса на эволюцию распределения влаги по радиусу рулона по мере его намотки. Поскольку в модели присутствуют эмпирические параметры в виде коэффициента чистой (симметричной) влагонепроводности и коэффициента пропорциональности для расчета конвективной влагонепроводности, предложены экспресс-методы их экспериментального определения, позволяющие трансформировать математическую модель в компьютерный инженерный метод расчета процесса. Модель также позволяет ставить и решать оптимизационные задачи намотки, если сформулированы целевые функции, связанные с равномерностью распределения содержания влаги.

Литература

1. **Mizonov, V., Zaitsev, V., Volynskii, V., Leznov, V.** (2011), Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains. *Chemical Engineering & Technology*, 34: 1185–1190

УДК 621.926

А.Н. БЕЛЯКОВ, к.т.н., докторант,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
(ИГЭУ), г. Иваново
Н. OTWINOWSKI, д.т.н., профессор,
D. URBANIAK, к.т.н.
(Ченстоховский политехнический университет), Польша

Моделирование измельчения на основе энтропийного обобщения распределения Максвелла-Больцмана

Хаотичное движение частиц сыпучего материала в кипящем или псевдооживленном слое [1] внешне напоминает поведение молекул жидкости или газа (броуновское движение). Это сходство обуславливает попытки использования закономерностей статистической физики для описания поведения частиц в кипящем слое. В струйных мельницах кипящего слоя наряду с распределением по скоростям и высоте слоя частицы распределяются по размерам зерен, что в традиционном распределении Максвелла-Больцмана [2] не учитывается. В предлагаемом исследовании делается попытка обобщить статистическое распределение Максвелла-Больцмана для дополнительного учета распределения частиц по крупности в кипящем слое.

Целью исследования является определение распределения частиц по скоростям, высоте слоя и размерам частиц в струйной мельнице кипящего слоя [3].

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: выделение системы моделирования и составление для нее балансовых

соотношений для энергии и массы с учетом измельчения частиц; определение распределения частиц по размерам, скоростям и высоте кипящего слоя на основе принципа максимума энтропии; сравнение полученного распределения с экспериментальными данными.

В качестве системы моделирования выбирается мельница кипящего слоя, работающая в периодическом режиме, при котором масса измельчаемого порошка не меняется со временем.

В качестве определяющих координат процесса выбраны размер частиц, скорость частиц и высота положения частиц в слое. Искомая функция распределения частиц по крупности, скорости и положению частиц в кипящем слое показывает плотность распределения материала в расчетном пространстве. Баланс массы измельчаемого материала может быть записан в виде условия нормировки искомой функции. Баланс энергии для выделенной системы составляется на основе анализа потоков энергии. Считается, что энергия, подводимая в систему с газом, расходуется на изменение кинетической энергии частиц, потенциальной энергии высоты положения и потенциальной энергии крупности частиц. Выражение для удельной потенциальной энергии положения частиц представляется через произведение координаты частицы на ускорение свободного падения. Удельная кинетическая энергия частиц определяется как половина квадрата ее скорости. Энергия измельчения согласно закону Риттингера [4] зависит только от значений крупности зерен или состояния системы и не зависит от кинетики процесса разрушения, что свидетельствует о потенциальной энергии измельчения. Баланс энергии записывается через равенство суммарной энергии всех частиц значению подведенной к системе энергии.

Для нахождения искомого распределения воспользуемся принципом максимума энтропии, который успешно применяется для моделирования сложных систем [5]. Оптимизационную задачу для нахождения искомого распределения сформулируем следующим образом. Определить оптимальное распределение частиц по положению, скорости и размеру частиц, которому соответствует максимальное значение энтропии при выбранных балансовых ограничениях. Решение оптимизационной задачи, найденное методом неопределенных множителей Лагранжа, представляется зависимостью, вид которой совпадает с распределением Максвелла-Больцмана и позволяет дополнительно определить распределение частиц по размерам.

Проведенные расчетные исследования позволили определить конкретный вид распределения частиц по крупности в кипящем слое при различных значениях подводимой энергии. Для представления трехмерного распределения в виде одномерной зависимости выполняется предварительное суммирование или свертка по двум исключаемым координатам.

Для проверки адекватности полученных результатов проведено сопоставление расчетных и экспериментальных распределений материала

ла по высоте кипящего слоя, которое показало хорошее качество описания расчетными зависимостями экспериментальных результатов.

Проведенные исследования показали, что модели, построенные на основе подходов статистической физики, адекватно описывают поведение ансамбля частиц с учетом их измельчения в кипящем слое, что делает возможным и целесообразным использование указанных подходов для моделирования технологических процессов.

Литература

1. **Гильперин Н.И.**, Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.:Химия, 1967. – 664с.
2. **Яворский Б.М.**, Детлаф А.А. Справочник по физике.– М.: Наука, 1980.–508 с.
3. **Miloli F.E., Foster P.J.** A model for particle size distribution and elutriation in fluidized beds. //Powder Technology 83 (1995) 265-280.
4. **Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New approaches. – ISPEU Press. Ivanovo. 1997. – 108 p.
5. **Вильсон А.** Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 248 с.

УДК 621.311.22

А.А. БОРИСОВ, к.т.н.,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
Д.А. УЛАНОВ, аспирант
(ИГЭУ), г. Иваново

Применение концепции «интеллектуальные сети» для совместного анализа тепловых и электрических сетей

Концепция «интеллектуальной сети» (Smart Grid) широко обсуждается в отечественных и зарубежных научных публикациях применительно к электрическим сетям [1]. Предлагается развитие этой концепции на совместный анализ тепловых и электрических сетей. Алгоритм практической реализации концепции «интеллектуальные сети» включает следующие этапы: мониторинг состояния системы, определение оптимального состояния системы, практическая реализация оптимального состояния. Целью исследования является математическое и программное обеспечение второго этапа реализации концепции «интеллектуальные сети»: постановка и решение задачи оптимизации генерации и транспорта энергии, обеспечивающих минимальные затраты при заданных электрической и тепловой нагрузках потребителей.

Пусть тепловая и электрическая энергии генерируются n производителями (источниками), в качестве которых рассматриваются тепловые электрические станции или котельные. Тепловые и электрические сети

заданной структуры обеспечивают передачу тепловой и электрической энергии m промышленным или бытовым потребителям. Поток электрической энергии от i -го производителя к j -му потребителю обозначим через N_{ij} , поток тепловой энергии – Q_{ij} . Суммарные нагрузки каждого потребителя (N_j, Q_j) считаются заданными:

$$\sum_i N_{ij} = N_j, \quad \sum_i Q_{ij} = Q_j. \quad (1)$$

Удельные затраты на генерацию и транспорт электрической (c_{ij}^N) и тепловой (c_{ij}^Q) энергии от i -го производителя j -му потребителю определяются суммой затрат на генерацию и транспорт единицы энергии между указанными элементами системы. Верхний индекс в обозначениях соответствует потокам тепловой (Q) и электрической (N) энергии. В качестве целевой функции оптимизации выбирается сумма затрат тепловой энергии или топлива, которая обеспечивает заданные нагрузки потребителей. В ходе решения задачи определяются параметры оптимизации, в качестве которых рассматриваются потоки тепловой Q_{ij} и электрической N_{ij} энергии. С учетом (1) и сделанных замечаний задача оптимальной генерации и транспорта энергии записывается в виде:

$$F = \sum_{i,j} (c_{ij}^N \cdot N_{ij} + c_{ij}^Q \cdot Q_{ij}) \rightarrow \min_{N_{ij}, Q_{ij}} \quad (2)$$

При генерации электрической энергии на ТЭЦ удельный расход тепловой энергии, расходуемый на выработку электрической энергии, существенно зависит от величин тепловой и электрической нагрузок турбоагрегата ($c_{ij}^N = f_i(N_j, Q_j)$) [3], которые определяются суммой заранее неиз-

вестных величин $Q_i = \sum_j Q_{ij}$ и $N_i = \sum_j N_{ij}$. При такой постановке задача (2)

относится к задачам нелинейного программирования [2]. Для решения задачи (2) в нелинейных постановках ниже предлагаются два подхода.

При некоторых допущениях для нелинейной задачи (2) удается получить ее аналитическое решение методом неопределенных множителей Лагранжа [4]. Пусть нагрузки агрегатов известны, а удельные затраты на генерацию и транспорт энергии представляются линейными зависимостями вида: $c_{ij}^N = a_{1ij}^N + a_{2ij}^N N_{ij}$ и $c_{ij}^Q = a_{1ij}^Q + a_{2ij}^Q Q_{ij}$. Коэффициент a_{1ij}^N определяется удельными затратами тепловой энергии на генерацию электрической энергии и находится по энергетическим характеристикам генерирующего оборудования [3] $a_{1ij}^N = f(N_j, Q_j)$. Коэффициент a_{2ij}^N определяется конструктивными характеристиками линий электропередачи. Аналогичный смысл имеют коэффициенты a_{1ij}^Q, a_{2ij}^Q в выражении для удельных затрат топлива на генерацию и транспорт тепловой энергии от i -го производителя и j -му потребителю.

Отдельные потребители и производители могут иметь или не иметь связи между собой. Для указания существующих связей между элементами системы вводятся матрицы коммутации по тепловой (KQ) и электрической (KN) энергии размером $n \times m$ (n -число источников, m -число потребителей энергии), каждый элемент которой указывает на наличие ($k_{ij} = 1$) или отсутствие ($k_{ij} = 0$) связи между i -м источником и j -м потребителем. Такой способ задания структуры транспортной сети позволяет описывать уже существующие связи и прогнозировать эффективность сооружения новых линий электропередач или трубопроводов тепловой сети. С учетом сделанных допущений оптимизационная задача (2) записывается в виде

$$F = \sum_{i,j} ((a_{ij}^N + a_{2ij}^N N_{ij}) \times k_{ij}^N N_{ij} + (a_{ij}^Q + a_{2ij}^Q Q_{ij}) \times k_{ij}^Q Q_{ij}) \rightarrow \min_{N_{ij}, Q_{ij}}, \quad (3)$$

$$\sum_i k_{ij}^N N_{ij} = N_j^{out}, \quad \sum_i k_{ij}^Q Q_{ij} = Q_j^{out}, \quad \sum_j k_{ij}^N N_{ij} = N_i^{inp}, \quad \sum_j k_{ij}^Q Q_{ij} = Q_i^{inp}, \quad (4)$$

где верхний индекс inp относится к источникам, а out – к потребителям энергии. Решение задачи (3) с учетом ограничений (4), полученное методом неопределенных множителей Лагранжа [4], записывается в виде

$$\begin{aligned} N_{ij} &= -\frac{\lambda_i^N + \mu_j^N + a_{ij}^N}{2a_{2ij}^N}, & Q_{ij} &= -\frac{\lambda_i^Q + \mu_j^Q + a_{ij}^Q}{2a_{2ij}^Q}, \\ \lambda_i^N &= \frac{-N_i^{inp} - \sum_j \frac{k_{ij}^N a_{ij}^N}{2a_{2ij}^N} - \sum_j \frac{k_{ij}^N \mu_j^N}{2a_{2ij}^N}}{\sum_j \frac{k_{ij}^N}{2a_{2ij}^N}}, & \lambda_i^Q &= \frac{-Q_i^{inp} - \sum_j \frac{k_{ij}^Q a_{ij}^Q}{2a_{2ij}^Q} - \sum_j \frac{k_{ij}^Q \lambda_j^Q}{2a_{2ij}^Q}}{\sum_j \frac{k_{ij}^Q}{2a_{2ij}^Q}}, \\ \mu_j^N &= \frac{-N_j^{out} - \sum_i \frac{k_{ij}^N a_{ij}^N}{2a_{2ij}^N} - \sum_i \frac{k_{ij}^N \lambda_i^N}{2a_{2ij}^N}}{\sum_i \frac{k_{ij}^N}{2a_{2ij}^N}}, & \mu_j^Q &= \frac{-Q_j^{out} - \sum_i \frac{k_{ij}^Q a_{ij}^Q}{2a_{2ij}^Q} - \sum_i \frac{k_{ij}^Q \lambda_i^Q}{2a_{2ij}^Q}}{\sum_i \frac{k_{ij}^Q}{2a_{2ij}^Q}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\lambda_i^N, \lambda_i^Q, \mu_j^N, \mu_j^Q$ – неопределенные множители Лагранжа.

Найденное аналитическое решение задачи (5) предполагает знание нагрузок энергетических агрегатов, которые в общем случае могут быть также параметрами оптимизации. Решение задачи (2) в такой более общей постановке найдено с использованием метода статистического программирования [2]. В рассмотренном в работе примере анализируются три альтернативы: исходная схема, включающая 5 источников и 7 потребителей тепловой и электрической энергии и набор связей между ними (вариант 1); исходная схема с добавлением двух дополнительных связей между источниками и потребителями энергии (вариант 2); схема с возможностью подачи энергии от каждого источника каждому потреби-

лю (вариант 3). Анализ решения задачи показывает, что добавление двух линий связи (трубопроводов тепловой сети) во втором варианте приводит к уменьшению расхода топлива на 1,49 %, а возможность подачи энергии от каждого источника каждому потребителю (третий вариант) позволяет получить экономию топлива 3,84% по сравнению с первым вариантом.

Литература

1. **Кобец Б.Б., Волкова И.О.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. – М.: ИАЦ Энергия, 2010.
2. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа. – 2004.
3. **РД 34.09.155-93.** Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. – М.: СПО ОР-ГРЭС, –1993.
4. **Вильсон А.** Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, –1978.

УДК 539.319

П.В. ЖУКОВ, аспирант,
В.Е. МИЗОНОВ, д.т.н., профессор,
В.Н. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., доцент
(ИГЭУ), г. Иваново

Математическое моделирование и расчет теплового и напряженного состояния роликов рольганга

В основу моделирования теплового состояния вращающихся роликов рольганга положено уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где T – температура, r , φ , z – цилиндрические координаты (ось z совпадает с осью вращения ролика), t – время процесса, a – коэффициент температуропроводности. Решение уравнения (1), найденное матричным методом [1], позволяет определить распределение температуры в ролике. Для графического представления полученного трехмерного температурного поля строится его проекция на плоскость температура - ось z , вид которой представлен на рис. 1, а.

Известно, что скачки температуры по времени или по координате приводят к появлению термических напряжений, которые, в свою очередь, могут приводить к появлению трещин или даже к преждевременному разрушению ролика. Для определения термических напряжений в

ролике предварительно, используя уравнение Пуассона [2], по известным температурным полям определяются значения термоупругого потенциала перемещений:

$$\Delta \Phi = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha T, \quad (2)$$

где Δ – оператор Лапласа, μ – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного расширения, Φ – термоупругий потенциал перемещений.

Найденная из решения уравнения (2) зависимость потенциала перемещений от координаты z представлена на рис. 1, б. Известные распределения потенциала перемещений, в свою очередь, позволяют согласно [2] рассчитать температурные напряжения:

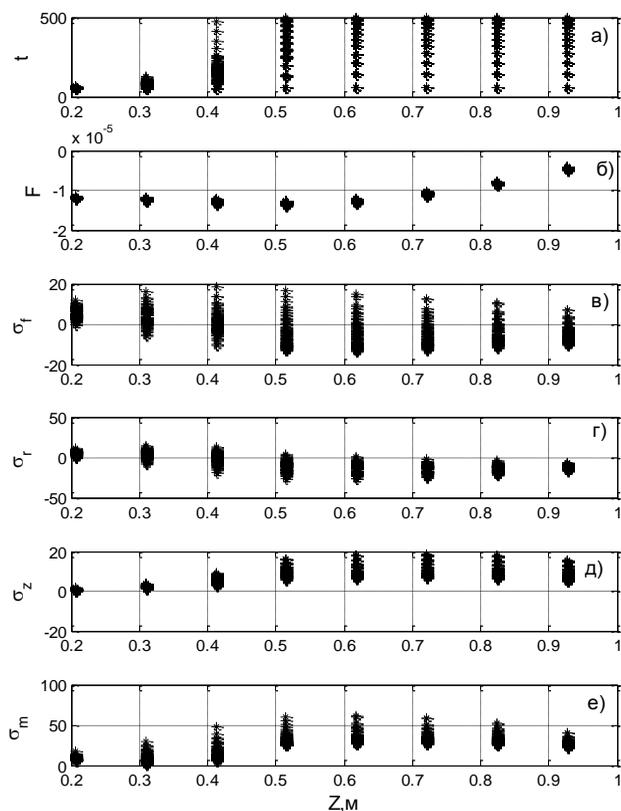


Рис. 1. Зависимости температуры ролика (а), термоупругого потенциала (б) и напряжений (в-е) от координаты z . Значения напряжений приведены в МПа

$$\sigma_{ik} = 2G \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k} - \Delta \Phi \cdot \delta_{ik} \right], \quad (3)$$

где σ – величина термических напряжений, G – модуль сдвига,

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 0, & i \neq k \\ 1, & i = k \end{cases}, \quad (i, k = x, y, z).$$

Расчитанные согласно (3) распределения термических напряжений вдоль оси ролика представлены на рис. 1, в-д.

Наряду с термическими напряжениями в ролике возникают механические напряжения, для определения которых используется стандартный подход [3].

Напряженное состояние роликов характеризуется совокупностью температурных и механических напряжений, возникающих вследствие действия внешней нагрузки и теплообмена. Эквивалентные напряжения для анализа состояния ролика находятся согласно гипотезе Хубера – Мизеса [4]:

$$\sigma_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\tilde{\sigma}_r - \tilde{\sigma}_\varphi)^2 + (\tilde{\sigma}_r - \tilde{\sigma}_z)^2 + (\tilde{\sigma}_z - \tilde{\sigma}_\varphi)^2 + 6(\tilde{\sigma}_{r\varphi}^2 + \tilde{\sigma}_{rz}^2 + \tilde{\sigma}_{z\varphi}^2)}, \quad (4)$$

где $\tilde{\sigma}$ – сумма механических и температурных напряжений вдоль соответствующей оси. Результаты расчета эквивалентных напряжений представлены на рис. 1, е в виде зависимости напряжений от осевой координаты ролика.

Исследования термонапряженного состояния ролика позволили выявить в нем наиболее напряженные сечения. Наибольшие термические напряжения возникают за счет наибольшего градиента температур в сечении на границе прохождения раскаленного сляба по ролику. Максимальные механические напряжения, обусловленные распределенными нагрузками в процессе эксплуатации, возникают в середине ролика. Разработанный метод анализа термонапряженного состояния позволяет проводить эффективную расчетную проверку технических и технологических мероприятий, направленных на повышение надежности и увеличение срока эксплуатации роликов рольганга.

Литература

1. Жуков В.П., Беляков А. Н., Жуков П.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, №2012611546 от 10 февраля 2012 года.
2. Мелан Э., Паркус Г. Термоупругие напряжения, вызываемые стационарными температурными полями. – М.: Физматгиз, 1958. – 167 с.
3. Ицкович Г.М. Сопrotивление материалов. – М.: «Высш. школа», 1976. – 439 с.
4. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

Использование систем клеточных автоматов для моделирования деформации твердых тел

Одним из направлений моделирования процессов в сплошных средах может быть использование дискретных динамических систем и, в частности, клеточных автоматов.

Клеточный автомат состоит из набора взаимосвязанных дискретных элементов (клеток), которые образуют пространственную решетку. Каждая клетка функционирует по законам работы абстрактного автомата. Ито есть, в любой момент дискретного времени клетка находится в одном из возможных состояний и на ее входы могут поступать входные сигналы. При их поступлении состояние клетки изменяется в соответствии с функцией переходов.

В общем случае системы клеточных автоматов характеризуются следующими свойствами [1,2]. Пространство состояний системы дискретно. Состояния всех клеток системы меняются одновременно. На конкретную клетку способны повлиять лишь соседние клетки.

Последнее свойство является очень важным при моделировании. Оно показывает, что поведение системы клеточных автоматов полностью определяется локальными взаимодействиями его элементов. Также обстоит дело и для большого класса непрерывных динамических систем, описываемых уравнениями в частных производных. Это дает возможность рекомендовать клеточные автоматы для моделирования процессов переноса вещества и энергии. При этом поведение клеток описывается функцией переходов, использующей закономерности исследуемого процесса [3].

Рассмотрим моделирование процесса упругой деформации двумерного твердого тела.

Представим твердое тело как массив из $M \times N$ элементарных клеток размером $\Delta x \times \Delta y$, каждая из которых имеет массу и обладает упругостью. Схема дискретной модели двумерного тела представлена на рис. 1.

Состояние клетки-автомата при данной постановке задачи, моделируется ее деформацией (смещением). Сигналы автоматов-соседей моделируют процесс передачи энергии механического воздействия между элементами системы. Поскольку процесс переноса энергии механическим импульсом является волновым, элементы, моделирующие поведение системы, должны иметь «память», т.е. это должны быть клетки-автоматы с последствием. Поэтому функция переходов, необходимая для расчета последующего должна учитывать не только текущее, но и предшествующее состояние. В общем виде данная функция должна выглядеть так:

$$u(t_{k+1}, i, j) = F[u(t_k, i, j) + \sum_{m=1}^n \dot{z}_m(t_k)], \quad (1)$$

где u – смещение клетки, (i, j) – переменная, учитывающая поток упругой энергии от соседних клеток.

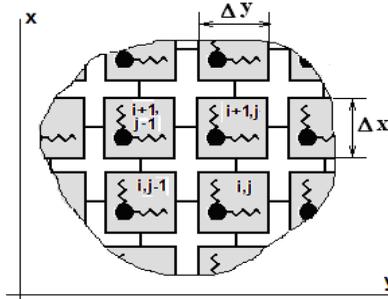


Рис. 1. Схема двумерной клеточно-автоматной модели упругого тела.

При рассмотрении процесса деформирования двумерного тела в первом приближении можно рассмотреть вариант одноосного деформирования. Это позволит считать, что воздействие на тело и, следовательно, деформация элементов будут направлены строго вдоль одной из осей.

Рассматривая деформацию клеток модели в условиях применимости закона Гука, и принимая тезис о том, что u – дискретная функция не только координат x, y , но и времени t , выражение для функции переходов можно записать в явном виде:

$$u_{i,j}(t_{k+1}) = 2u_{i,j}(t_k) - u_{i,j-1}(t_k) - u_{i,j+1}(t_k) + \Delta t^2 \left[p_{i+1,j}(t_k) - p_{i-1,j}(t_k) - p_{i,j+1}(t_k) + p_{i,j-1}(t_k) \right], \quad (2)$$

где

$$p_{i\pm 1,j}(t_k) = \frac{C_x^2 [u_{i\pm 1,j}(t_k) - u_{i,j}(t_k)]}{\Delta x^2},$$

$$p_{i,j\pm 1}(t_k) = \frac{C_y^2 [u_{i,j\pm 1}(t_k) - u_{i,j}(t_k)]}{\Delta y^2},$$

C_x – скорость упругой волны в материале в направлении оси x ; C_y – то же в направлении оси y ; Δt – шаг по времени.

При анализе выражения (2) следует учесть, что переменную p можно трактовать, как величину силы воздействия соседней клетки, отнесенную к единице массы.

Ниже представлены результаты моделирования процесса распространения упругой волны в плоском теле квадратной формы. При моделировании были приняты следующие основные параметры: размер пла-

стины 10 x 10 мм; скорость распространения упругой волны в продольном и поперечном направлениях принималась одинаковой и равной 5000 м/с; шаг по времени $2 \cdot 10^{-8}$ с; шаг по координатам 0,2 мм.

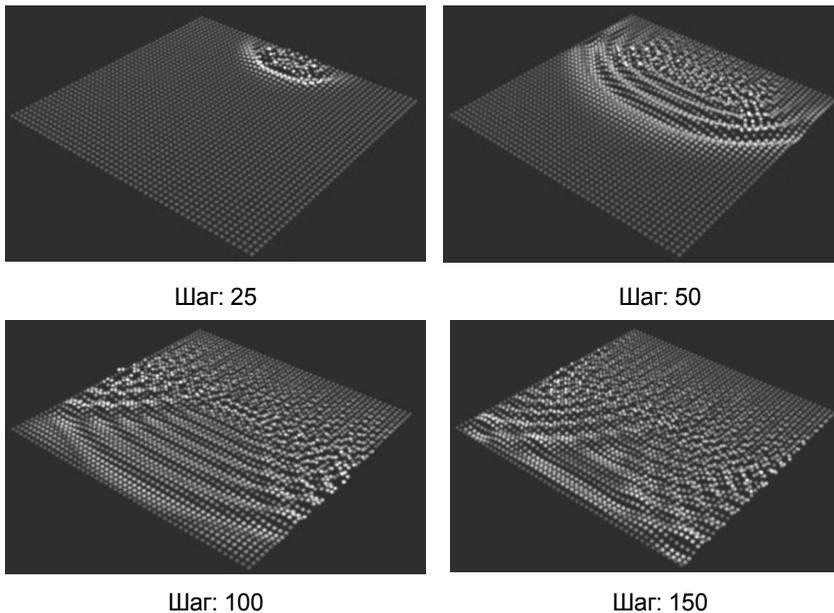


Рис. 2. Деформационная картина в пластине в различные моменты времени.

Полученные данные показывают, что результаты математического моделирования процесса распространения волн деформации в твёрдом теле конечных размеров соответствуют существующим воззрениям на природу данного процесса. В частности, моделируются явления отражения волн от краев пластины, их взаимное усиление или ослабление.

Литература

1. **Wolfram S.** Theory and applications of cellular automata: (including selected papers 1983-1986). Singapore : World Scientific, 1986.
2. **Toffoli T., Margolus N.** Cellular Automata Machines. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1987.
3. **Бобков С.П.** Моделирование основных процессов переноса с использованием клеточных автоматов. Известия вузов «Химия и хим. технол.», 2009, т.52, вып. 3, с.109-114.

УДК 621.1.016.4

А. В. ЦЫПЛОВ, аспирант,
Н. Н. ЕЛИН, профессор
(ИГАСУ) г. Иваново

Повышение энергетической эффективности гидродобычи железной руды на основе математического моделирования процессов в гидродобычных скважинах

Технологическая схема скважинной гидродобычи глубокозалегающей железной руды показана на рис.1.

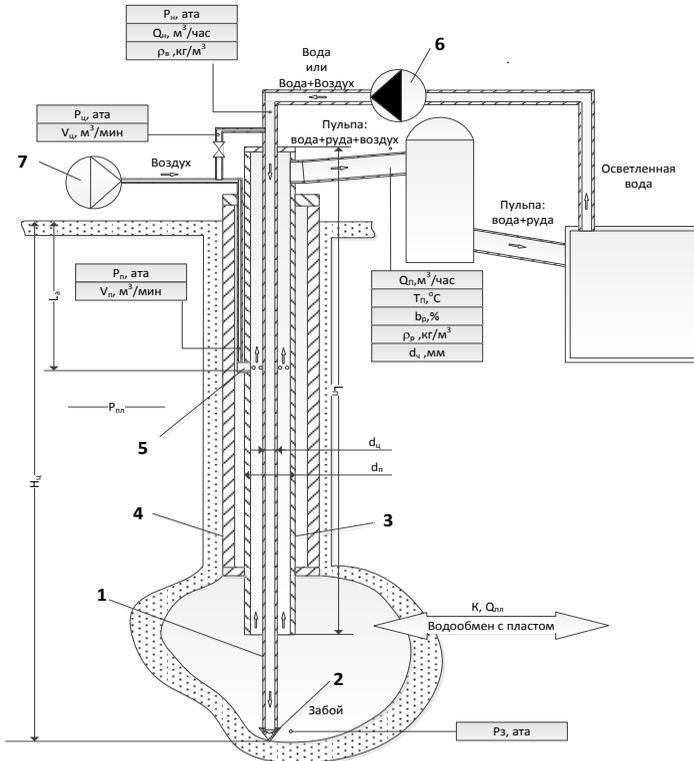


Рис. 1. Технологическая схема процесса скважинной гидродобычи
1- гидродобычный снаряд, 2 – форсунки, 3 - эксплуатационная колонна,
4 – обсадная труба, 5 – эрлифтный клапан, 6 – насосы,
7 – компрессоры.

Исследуемый процесс гидродобычи руды описывается тремя уравнениями:

1. Уравнение движения воды или воздуховодяной смеси в гидродобычном снаряде [1];

2. Уравнение движения смеси «руда+вода+воздух» (выше эрлифтного клапана) или смеси «вода+руда» (от забоя до эрлифтного клапана) в пульпоподъемной колонне;

3. Уравнение притока/поглощения воды к скважине через призабойную зону [2].

Неизвестными являются величины забойного давления P_z , дебита скважины Q_p и притока/поглощения воды пластом $Q_{пл}$.

При расчете пульпоподъемной колонны реальный трехфазный поток рассматривается как двухфазный газожидкостный с жидкой фазой в виде суспензии, в которой частицы твердой фазы диспергированы в воде, которые движутся со скоростью, меньшей скорости воды на величину скорости осаждения этих частиц в неподвижной воде. Скорость осаждения частицы рассчитывается по известным формулам [3].

Таким образом, данная математическая модель позволяет при заданных концентрации руды в воде, крупности и плотности ее частиц, расходах эрлифтного воздуха, подаваемого в центральную трубу и в подъемник, рассчитать дебит скважины заданной конструкции по воде и по руде, а также приток (поглощение) воды из пласта.

Зная эти величины можно определить энергопотребление насоса, подающего воду в центральную трубу, и компрессора, нагнетающего эрлифтный воздух.

Методика расчета реализована в виде компьютерной программы «Гидродобыча» программной среде Microsoft C#, использование которой позволяет управлять режимом эксплуатации гидродобычной скважины с целью достижения наилучших технико-экономических показателей.

Одним из распространенных технологических критериев оптимальности режима эксплуатации систем, потребляющих большое количество энергии, к которым относятся системы гидродобычи рудных строительных материалов, является удельный расход электроэнергии (УРЭ). Для насосов эта величина прямо пропорциональна создаваемому им давлению и имеет такую же размерность, а для компрессоров в системах эрлифтной добычи УРЭ прямо пропорционален удельному расходу воздуха, равному отношению расхода воздуха к дебиту скважины.

В качестве примера на рис.2 представлены результаты расчетов этих величин для одной из скважин Новотроицкого железорудного месторождения. Интересно отметить наличие минимумов на рис.2б, причем величина подачи воздуха, при которой достигается минимальный удельный расход, увеличивается с увеличением концентрации руды в пульпе.

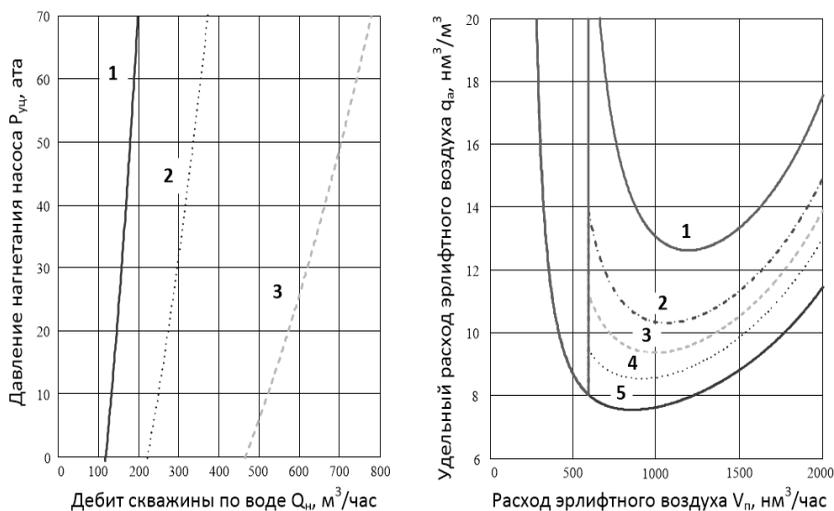


Рис.2. Энергетические характеристики гидродобывной скважины:

а) Зависимость давления нагнетания насосов от дебита скважины по воде при нулевом водообмене с продуктивным пластом.

Диаметр гидродобывного снаряда: 1 – 89x5; 2 – 114x6; 3- 159x11 мм.

б) Зависимость удельного расхода эрлифтного воздуха от величины его подачи при диаметре гидродобывного снаряда 89x5 мм.

Массовая концентрация руды в пульпе: 1-0, 2-2, 3-5,4-10,5-15%

Разработанная программа «Гидродобыча» дает возможность выбирать режимы эксплуатации гидродобывных скважин, соответствующие минимальным удельным энергозатратам на добычу железной руды.

Литература

1. Brill J. P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas, Society Petroleum Engineers Inc (SPE), 1999 - 384 p.
2. Hasan A.R., Kabir C.S. Fluid flow and heat transfer in wellbores. – Richardson, Texas, Society Petroleum Engineers Inc (SPE), 2002 - 181 p.
3. Процессы и аппараты химической промышленности. /П.Г.Романков, М.И. Курочкина, Ю.Я. Мозжерин, Н.Н. Смирнов. – Л.: Химия, 1989. – 560 с.

Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде на основе уравнения Больцмана

В целом ряде технологических установок процесс теплообмена тесно связан с процессом массообмена. В качестве примера можно привести конденсатор турбины, в котором на процесс теплообмена существенно влияет массообмен между газом, растворенном в воде, и газом, содержащимся в паровой фазе.

В основу моделирования тепломассопередачи положено кинетическое уравнение Больцмана [1], которое позволяет описывать эволюцию плотности распределения вещества по выбранным фазовым координатам при совместном протекании двух и более процессов. В предлагаемом подходе искомой функцией является плотность распределения вещества по выбранному фазовому пространству. Специфика применения уравнения Больцмана для описания тепломассообменных процессов в многофазных средах заключается в введении в фазовое пространство новой координаты Φ , значения которой характеризует фазовое состояние и тип теплоносителя. Для конденсатора турбины вдоль указанной фазовой координаты откладываются следующие значения: 1-циркуляционная вода; 2-конденсат; 3-пар; 4-газ в паровой фазе; 5-газ в жидкой фазе.

Разработка модели на основе уравнения Больцмана заключается в разбиении рабочего объема аппарата на ячейки, указании связей между ячейками и соответствующих этим связям вероятностей переходов [2]. Если ячейка находится на границе рассматриваемого фазового пространства, то переходы за границу определяются соответствующими граничными условиями.

Для численного решения уравнения Больцмана используется ячеечный подход, построенный на балансах энергии и массы в каждой ячейке фазового пространства. Искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется вектором $\mathbf{S}=\{S_i\}$, где индекс i соответствует номеру ячейки. Алгоритм расчета искомого распределения \mathbf{S} в произвольные моменты времени включает следующие этапы. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения теплового и материального балансов для определения потоков энергии или вещества между этими ячейками. Известные потоки энергии и массы позволяют определить потоки вероятностей переходов за рассматриваемый промежуток времени Δt . Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов, сумми-

рованием потоков вероятностей из всех ячеек в i -ю ячейку системы определяется состояние системы в следующий момент времени.

Для определения вероятностей переходов между ячейками p_{ij} применяется метод конечных объемов [3]. В частности, при постоянном значении температуры пара в состоянии насыщения аналитическое выражение для изменения температуры охлаждающей воды для первой и второй ступеней записывается в виде:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = (t_i - t_{20}) [1 - \exp(-a_{10} F)] \\ \Delta t_2 = (t_i - t_{200}) [1 - \exp(-a_{20} F)] \\ t_{200} = t_{20} + \Delta t_1, a_{10} = k / (G_{10} / 2) / r, a_{20} = k / (G_{20} / 6) / c_2 \end{cases}$$

где F_i – площадь поверхности теплообмена; k_i – коэффициент теплопередачи; $\Delta t_1, \Delta t_2$ – нагрев циркуляционной воды в первой и второй ступенях; t_p – температура насыщения пара в конденсаторе; t_{20}, t_{200} – температура охлаждающей воды на входе в первую и вторую ступени соответственно; G_{10}, G_{20} – расходы горячего и холодного теплоносителей; r – удельная теплота парообразования; c – теплоемкость воды.

Вероятности перехода из ячейки для пара в ячейку для воды выражаются из теплового баланса в виде

$$\begin{cases} p_{10} = a_{10} / a_{20} (t_i - t_{20}) (1 - \exp(-a_{20} F)) \\ p_{20} = a_{10} / a_{20} (t_i - t_{200}) (1 - \exp(-a_{20} F)) \end{cases}$$

где p_{10}, p_{20} – вероятности перехода пара в конденсат для ячеек, сопряженных с ячейками первого и второго ходов охлаждающей воды.

Вычисленные потоки вероятностей по воде, пару и воздуху позволяют определить массовые концентрации воздуха в конденсате и паре через отношение соответствующих масс. Разность концентраций воздуха в воде и паре обуславливает движущую силу процесса деаэрации воздуха. Учет влияния на теплообмен наличия в паре неконденсируемых газов осуществляется с использованием известных из литературных источников зависимостей.

Литература

1. **Вулис Л.А.** Теория и расчет магнитогазодинамических течений в каналах – М.: Атомиздат. – 1971. – 384 с.
2. **Жуков, В.П.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах №20100612671 от 19 апреля 2010 года" Авторы: Беляков А. Н., Жуков В.П., Власюк А. А., Барочкин А. Е.
3. **Рояк, М.Э.** Сеточные методы решения краевых задач математической физики/ М.Э. Рояк , Ю.Г. Соловейчик, Э.П. Шурина - Новосибирск: Изд-во НГТУ.-1998.-120 с.

Моделирование кинетики фракционирования сыпучих материалов на системе сит с поэтажной компоновкой

Процессы грохочения сыпучих материалов широко распространены в строительной индустрии и других отраслях промышленности. Во многих непрерывных технологических процессах преимущество отдается грохотам с двух, трех и более этажной компоновкой сит, напрямую включенным в технологический процесс. Данные грохоты позволяют отсеять из исходной сыпучей среды некондиционные крупные и мелкие частицы.

Расчетная схема процесса представлена рис.1. Разделим частицы исходного материала на крупные со средним размером $\delta 0$, товарные (средний размер $\delta 1$) и мелкие (средний размер $\delta 2$).

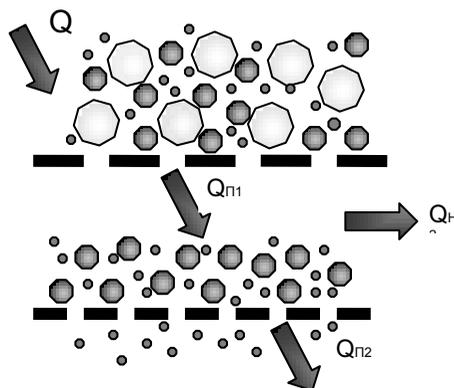


Рис. 1. Расчетная схема процесса

Их относительное содержание в исходной смеси c_0 , c_1 и c_2 , соответственно. Производительность грохота по исходному материалу – Q . На верхнем сите грохочению подвергаются все фракции. Фракции 1 и 2 выходят в подрешетный продукт производительностью Q_{n1} , которую можно определить как

$$Q_{n1} = Q_{n11} + Q_{n12} = Q \times c_1 \times \varepsilon_{11} + Q \times c_2 \times \varepsilon_{21}, \quad (1)$$

где Q_{n11} – выход фракции 1 на первом (верхнем) сите; ε_{11} извлечение фракции 1 на первом сите; Q_{n12} – выход фракции 2 на первом сите; ε_{21} – извлечение фракции 2 на первом сите. На втором (нижнем) сите грохочению подвергаются фракции 1 и 2. В подситовой продукт выходит только фракция 2. Уравнение баланса на втором сите запишется

$$Q_{n1} = Q_{n2} + Q_{n2}, \quad (2)$$

где Q_{n2} – производительность грохота по надситовому продукту на нижнем сите, которая является производительностью двухситового грохота по товарному продукту; Q_{n2} - выход мелкой некондиционной фракции 2 в подситовое пространство нижнего сита.

Производительность двухситового грохота по товарному продукту определится как

$$Q_{n2} = Q \times c_1 \times \varepsilon_{11} + Q \times c_2 \times \varepsilon_{21} \times (1 - \varepsilon_{22}), \quad (3)$$

где ε_{22} извлечение фракции 2 на втором сите.

Общая эффективность работы двухситового грохота определится как

$$\varepsilon = \frac{c_1 \times \varepsilon_{11} + c_2 \times \varepsilon_{21} \times (1 - \varepsilon_{22})}{c_1 + c_2}. \quad (4)$$

Тогда засоренность товарного продукта мелкими некондиционными частицами можно определить по формуле

$$\gamma = \frac{c_2 \times \varepsilon_{21} \times (1 - \varepsilon_{22})}{c_1 \times \varepsilon_{11} + c_2 \times \varepsilon_{21} \times (1 - \varepsilon_{22})} \quad (5)$$

Слой материала на верхнем сите, содержащий крупные, средние (товарные) и мелкие частицы, разбит на m подслоев конечного размера. Слой материала на нижнем сите разбит на n подслоев. Толщина подслоя больше размера крупных частиц, но меньше полной толщины слоя.

Вероятности S_i того, что частица в данный момент времени окажется в i -ой ячейке, различны. Их полный набор образует вектор-столбец состояния, сумма элементов которого равна единице.

Вероятность S_i считаем адекватной относительной концентрации частиц данной фракции в ячейке.

Будем рассматривать процесс через последовательные малые промежутки времени Δt – времена перехода, в течение которых возможен переход из данного состояния (ячейки) только в соседние, но не далее [1,2]. Тогда текущие моменты времени будут рассчитываться как $t_k = (k-1)\Delta t$, где целое число $k = 1, 2, \dots$ (номер перехода) становится целочисленным аналогом текущего времени.

Если известно начальное распределение вероятностей средних частиц S_{11}^0 и мелких частиц S_{21}^0 по верхнему слою, то при известных матрицах переходных вероятностей, определяемых согласно [1,2], рассчитывается кинетика процесса.

На рис. 2 приведены опытные и расчетные значения извлечений мелких и средних частиц на верхнем и нижнем сите в зависимости от времени классификации и засоренность товарных фракций мелкими частицами.

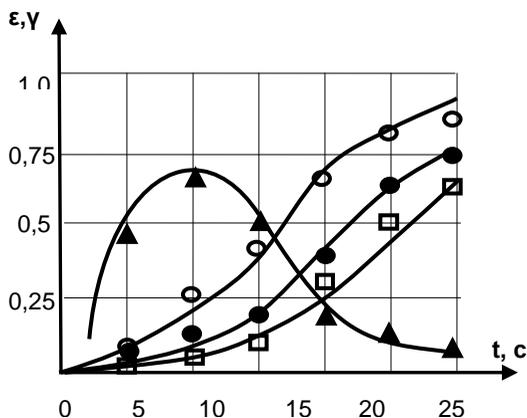


Рис. 2. Расчетные и опытные извлечения проходowych частиц на лабораторном двухситовом грохоте и засоренность товарного продукта некондиционными частицами:

- - кинетика рассева мелких частиц на верхнем сите;
- - кинетика рассева мелких частиц на нижнем сите;
- - кинетика рассева средних частиц на верхнем сите;
- ▲ - засоренность товарной фракции мелкими частицами.

Литература

1. Огурцов В.А., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова // Строительные материалы. – 2008. - № 5. – С. 33 – 35.
2. Акулова М.В., Алешина А.П., Огурцов Ал.В., Огурцов Ан.В. Моделирование процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах с многоярусной компоновкой сит // Вестник МГСУ. – 2013. - №2. – С. 80 – 87.

УДК 517.442

Л.Г. УСТИНОВА, к. п. н., доцент,
Н.Г. ХОДЫРЕВА, к. п. н., доцент
(Филиал МЭИ в г. Волжском)

Использование операционных методов анализа при разработке автоматической системы регулирования

Операционные методы анализа занимают важное место в моделировании и автоматическом управлении, так как их использование позволяет исследовать динамические системы, описываемые дифференциальными уравнениями, как алгебраические объекты.

В основе операционного метода лежит пара операционных преобразований (прямое и обратное). Вводятся в рассмотрение пространство исходных сигналов (пространство оригиналов) и преобразованное про-

странство (пространство изображений). Прямое операционное преобразование ставит в соответствие каждому сигналу-оригиналу его операционный образ – изображение. Правила операционной алгебры определяют, какие математические операции необходимо выполнить над изображениями, когда над соответствующими оригиналами выполняются те или иные операции [1].

Математическая модель исследуемой системы, описанная с помощью дифференциальных уравнений в пространстве оригиналов, преобразуется в алгебраическую в пространстве изображений путем применения к сигналам и операциям над ними правил операционной алгебры. Решение алгебраической модели приводит к нахождению изображений неизвестных сигналов. Обратное операционное преобразование позволяет выполнить восстановление неизвестных сигналов на основе полученных изображений.

Например, дифференциальное уравнение элемента регулирующей системы в общем случае имеет вид:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \end{aligned} \quad (1)$$

где y – выходная величина элемента (в отклонениях от состояния равновесия); x – входная величина элемента (в отклонениях от состояния равновесия); $a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$ – постоянные коэффициенты, определяемые особенностями и параметрами настройки элемента.

Преобразуем функции времени $y(t)$ и $x(t)$ по Лапласу:

$$y(t) \overset{*}{=} Y(p), \quad x(t) \overset{*}{=} X(p)$$

и перейдем от дифференциального уравнения (1) к алгебраическому относительно изображения при нулевых начальных условиях, обычных для большинства АСР. По теореме о дифференцировании оригинала с учетом нулевых начальных условий алгебраическое уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} a_n p^n Y(p) + a_{n-1} p^{n-1} Y(p) + \dots + a_1 p Y(p) + a_0 Y(p) = \\ = b_m p^m X(p) + b_{m-1} p^{m-1} X(p) + \dots + b_1 p X(p) + b_0 X(p), \end{aligned}$$

откуда

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} = W(p). \quad (2)$$

Отношение изображения выходной величины элемента системы к изображению его входной величины при нулевых начальных условиях называется передаточной функцией элемента системы. Передаточная

функция (2) полностью определяет динамические свойства системы и может быть найдена по передаточным функциям ее отдельных звеньев.

Рассмотрим пример использования преобразования Лапласа для расчета автоматического регулирования напряжения синхронного генератора и отдаваемой им в сеть реактивной мощности.

Технологическим объектом управления является синхронный генератор, предназначенный для поддержания напряжения на шинах электростанции. Источники постоянного тока, называемые возбудителями, подают на обмотки генераторов входное напряжение $x(t)$, напряжение на выходе генератора $y(t)$. Выходная величина $y(t)$ изменяется не сразу после внесения возмущения, а через промежуток времени, который называется временем запаздыванием и обозначается τ . При этом напряжение на выходе генератора есть функция от напряжения возмущения, т.е. $y(t) = f[x(t)]$.

Такую систему можно представить в виде двух последовательно соединенных звеньев: апериодического и запаздывающего. Апериодическому звену соответствует дифференциальное уравнение:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x, \quad (3)$$

где постоянная времени T и коэффициент передачи k определяются экспериментальным образом [2].

Преобразуем уравнение (3) по Лапласу:

$$TpY(p) + Y(p) = kX(p).$$

и запишем передаточную функцию апериодического звена:

$$W_A(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Выходная величина в запаздывающем звене точно повторяет входную величину, но с некоторым запаздыванием по времени τ :

$$y = x(t - \tau). \quad (4)$$

Применив теорему запаздывания и перейдя в уравнении (4) к изображениям, получим:

$$Y(p) = X(p) e^{-p\tau}.$$

Таким образом, запаздывающее звено имеет передаточную функцию:

$$W_C(p) = e^{-p\tau}.$$

Передаточная функция системы последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев. Тогда передаточная функция объекта управления примет вид:

$$W(p) = W_A(p) \cdot W_C(p) = \frac{k}{Tp + 1} \cdot e^{-p\tau} = \frac{ke^{-p\tau}}{Tp + 1}.$$

Свойства звеньев, их соединений и АСР в целом определяются их характеристиками: статическими и динамическими. Подставив в пере-

даточную функцию $W(p)$ выражение $p = i\omega$, получим амплитудно-фазовую характеристику (АФХ) системы:

$$W(i\omega) = \frac{k e^{-i\omega\tau}}{1 + iT\omega}.$$

Представим комплексное число $z = 1 + iT\omega$ в показательной форме:

$$1 + i \cdot T\omega = \sqrt{1 + (T\omega)^2} e^{i \arctg T\omega}.$$

Тогда АФХ примет вид:

$$W(i\omega) = \frac{k \cdot e^{-i\omega\tau}}{\sqrt{1 + (T\omega)^2} \cdot e^{i \arctg T\omega}} = \frac{k}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}} \cdot e^{-i(\omega\tau + \arctg T\omega)}.$$

Из полученного выражения найдем амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики синхронного генератора:

$$W(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}}, \quad \phi(\omega) = -(\omega\tau + \arctg T\omega).$$

Характеристики, полученные в процессе решения, используются для построения и расчета системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора и отдаваемой им в сеть реактивной мощности [2].

Литература

1. **Дробное** исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. Научное издание / В.В.Васильев, Л.А.Симак. — Киев, НАН Украины, 2008. — 256 с.
2. **Клюев А.С.** Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.

УДК 66.021.07:691.142

М.В. ТАНИЧЕВ, аспирант,
С.В. ФЕДОСОВ, профессор,
М.В. АКУЛОВА, профессор
(ИГАСУ) г. Иваново

Тлеющий разряд как перспективный способ модифицирования поверхностных свойств материалов

Для решения многих практических задач необходимо учитывать предъявляемые к материалам разнообразные требования, трудно совместимые, а в ряде случаев и не совместимые в одном материале. При этом рациональным путем решения проблемы является не разработка нового материала, сочетающего в себе одновременно все заданные свойства, а модифицирование поверхностных свойств уже имеющегося материала при условии сохранения его полезных объемных

свойств. Чаще всего возникает необходимость придания материалам гидрофильности, окрашиваемости, повышения адгезионной способности к различным поверхностям и покрытиям [1].

Модифицирование перечисленных свойств материалов достигается удалением поверхностного слоя (травление), изменением его состава в результате химического взаимодействия или осаждением нового слоя из газовой или жидкой фазы. Наряду с широко распространенными способами химического воздействия на модифицируемую поверхность с начала 70-х годов XX века разрабатываются методы и технологии модифицирования поверхностных свойств материалов с использованием низкотемпературной плазмы тлеющего и некоторых других разрядов.

Тлеющий разряд – один из наиболее распространенных видов газового разряда, что связано с легкостью его получения и поддержания [1]. Это самостоятельный разряд, возникающий в газе при пониженном давлении только за счет процессов в самом разряде и не требующий внешнего источника ионизации. Вследствие малой эффективности передачи кинетической энергии от электронов к тяжелым частицам при их столкновении имеет место большой, достигающий двух порядков величины, отрыв средней энергии электронов от энергии тяжелых частиц [2]. Поэтому ионная температура на два порядка меньше электронной и близка к температуре окружающей среды [2]. Такая неравновесность плазмы, когда энергия электронов достаточна для разрыва любых химических связей, а обрабатываемый в плазме материал остается холодным, позволяет с помощью плазменной обработки получать эффекты, не достижимые другими методами.

В ряде работ как российских, так и зарубежных ученых рассматривается влияние низкотемпературной плазмы на свойства полимерных, синтетических, природных волокон. Уже при минимальных дозах плазменного воздействия наблюдается изменение свойств поверхности обрабатываемого материала – ее модифицирование. При этом изменяется поверхностная энергия, поверхность становится более гидрофильной или гидрофобной, изменяется химический состав поверхностного слоя, его структура, окислительно-восстановительная активность. Увеличение продолжительности и интенсивности плазменной обработки может привести к увеличению глубины модифицированного слоя. В целом взаимодействие плазмы неполимеризующих газов, например, с полимерами представляет собой процесс травления [1, 2].

Характерные особенности воздействия плазменной обработки преимущественно на поверхностные свойства материала при сохранении полезных объемных свойств обусловили разработку способов технологического применения данного эффекта. Использование плазмохимических процессов в текстильной и легкой промышленности позволяет заменять технологические операции, требующие больших расходов воды, на сухие процессы, уменьшая тем самым общее водопотребле-

ние, сократить расходы материалов и энергетических ресурсов. Кроме того, во многих случаях плазменная обработка позволяет исключить из технологии экологически вредные процессы и вещества [1].

Также тлеющий разряд используется для модифицирования полимерных биоматериалов, изделий из пластмасс, резинотехнических изделий, полимерных пленок. Плазменная обработка дает возможность непрерывного изменения химического состава и таких свойств, как смачиваемость, адгезия к металлам, коэффициент преломления, твердость, химическая инертность, смазочные свойства, биосовместимость поверхности [1].

Исследован вопрос использования плазменной активации органических и минеральных волокон при производстве фибробетонов. Одним из основных условий получения качественных дисперсно-армированных бетонов является высокая адгезия армирующих волокон к строительной матрице. Однако свойства практически всех неметаллических волокнистых материалов не удовлетворяют данному требованию, а их сцепление со строительным композитом в основном обусловлено силами трения [1, 3]. Низкотемпературные разряды позволяют придавать волокнам целый комплекс улучшенных свойств: увеличение гидрофильных свойств, изменение рельефа поверхностного слоя, улучшение прочностных характеристик и др. [2, 3], причем воздействие низкотемпературной плазмы тлеющего разряда на волокнистые материалы является одним из наиболее эффективных способов изменения их поверхностного слоя.

В настоящее время проводятся исследования по использованию низкотемпературной плазмы тлеющего разряда для модифицирования поверхностных свойств рулонных стеновых материалов, в частности обоев. Нами установлено, что ранее плазменная активация таких материалов не применялась. В то же время производство рулонных стеновых материалов (особенно тяжелых видов обоев) требует решения задачи обеспечения достаточной их адгезии к клеиваемой поверхности. Для надежной фиксации материала используются специальные, а значит, и более дорогие клеевые составы. Проведенные эксперименты [4] показывают, что в результате плазменной обработки (плазмообразующий газ – воздух) увеличивается гидрофильность рулонного стенового материала (на примере флизелина), что приводит к улучшению их адгезионных свойств и, следовательно, позволяет вернуться к использованию дешевых клеев, а также улучшает окрашиваемость (табл. 1).

Таблица 1. Изменение водопоглощения ремонтного флизелина в зависимости от времени обработки в тлеющем разряде при давлении 100 Па (воздух) и силе тока 100 мА

Время обработки в тлеющем разряде, с	Водопоглощение, %					Среднее водопоглощение, %
	1	2	3	4	5	
0 (необработ.)	106,6	87,5	85,9	91,2	91,6	92,6
15	143,9	147,7	165,0	165,6	152,9	155,0
30	166,7	174,0	153,9	176,4	151,4	164,5
45	169,2	166,6	157,3	172,2	177,8	168,6
60	162,2	174,7	180,8	152,2	168,1	167,6
90	161,4	169,0	177,1	156,3	189,2	170,6
120	167,2	191,5	160,8	153,5	149,3	164,5

Таким образом, тлеющий разряд находит весьма широкое применение для модифицирования поверхности различных материалов с целью придания им необходимых технологических и потребительских свойств. В ряде отраслей уже разработаны способы промышленного применения плазменной обработки, но существуют также перспективы развития данной технологии как нового способа обработки материала и в других отраслях.

Литература

4. **Кутепов А.М.** Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов / А.М. Кутепов, А.Г.Захаров, А.И. Максимов. – М.: Наука, 2004. – 496 с.
5. **Федосов С.В.** и др. Применение тлеющего разряда в строительной и текстильной промышленности / С.В. Федосов, Б.Н. Мельников, М.В. Акулова, Л.В. Шарнина. – Иваново, 2008. – 232 с.
6. **Елин В.К.** Фибробетон, армированный волокнами, модифицированными плазмой тлеющего разряда. Дис. канд. техн. наук. – Иваново, 2006. – 155с.
7. **Федосов С.В., Акулова М.В., Таничев М.В., Шутов Д.А.** Исследование влияния низкотемпературной плазмы тлеющего разряда на гидрофильные свойства ремонтного флизелина // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 63 – 67.

Использование новых технологий в сфере дополнительного образования

Цель публикации: Обосновать необходимость создания Интернет платформы и он-лайн продвижения обучающих программ в сфере предложения услуг дополнительного образования.

Бурные темпы развития Интернет технологий сегодня не подлежат сомнению, более того, он-лайн компании и СМИ часто обладают большими оборотами по сравнению с традиционными формами хозяйствования. В качестве примера можно привести тот факт, что по последним показателям, "Яндекс" в следующем году обгонит по объему прибыли 1 Канал, поскольку уже опережает его по количеству дневной аудитории. (<http://www.primmarketing.ru/news/2012/05/25/lider>)

Кроме того, аналитики РБК прогнозируют массовый отток рекламного капитала из телевизионных и печатных СМИ в Интернет. Это объясняется, прежде всего, тем, что он-лайн издания могут привлечь гораздо больше потенциальных покупателей за счет постоянного расширения аудитории.

Успех цифрового контента во многом обеспечивается такими его свойствами как доступность, мобильность, интерактивность и скорость. Особенно цифровые СМИ популярны среди молодежи.

Расширение Интернет аудитории достигается путем повсеместной пропаганды цифровых носителей и он-лайн сервисов, как наиболее современных, удобных и стильных. Благодаря развитию компьютерных технологий в Интернет можно войти практически с любого устройства и в любой точке пространства.

Мода на цифровой контент делает его не только выгодным с точки зрения получения дохода, но и мощным инструментом для проведения рекламных компаний и акций.

Представленная тенденция может быть проиллюстрирована следующим кейс-стади (источник <http://www.npr.org/2011/07/19/138514209/why-borders-failed-while-barnes-and-noble-survived>). 40 лет назад были основаны 2 книжные компании Barnes & Nobles и Borders. Обе компании были представлены в Интернете, однако они выбрали различные стратегии использования цифровых технологий, что в результате определило их дальнейшее развитие.

Основой Интернет деятельности Borders стал аутсорсинг продажи книг компании Амазон, которая являлась их прямым конкурентом. Руководство Borders не предпринимало активных попыток создания и продвижения собственной он-лайн платформы. Итогом стало банкротство компании в 2011 году.

B&N в отличие от Borders создал свой онлайн магазин. Кроме того, руководством компании было принято решение о разработке собственных

компьютерных технологий, результатом которого стал выпуск Nook, достойный конкурент айпада (<http://www.cmswire.com/cms/customer-experience/nook-becoming-very-important-for-barnes-noble-018481.php>).

Наличие собственной платформы и интернет представительства обеспечило не только расширение клиентской базы, но и получение дополнительных доходов от продажи цифрового контента для Nook, которые по сравнению с прошлым годом увеличилась на 38%, с прибылью в 8,5%.

И подобных примеров множество.

Одним из прогрессивных направлений Интернет бизнеса сегодня является он-лайн обучение. Это направление интересно не только с точки зрения развития образовательных технологий, но и с точки зрения повышения доходности образовательных услуг. Данный тезис подтверждается данными, опубликованными агентством GIA (Global Industry Analysis) (источник статистики <http://www.strategyr.com/Distance Learning Industry Market Report.asp>).

В частности GIA прогнозирует значительный рост доходов индустрии e-learning (с \$56,2 миллиарда в год сегодня до \$107 миллиардов к 2015 году). О бурном развитии он-лайн обучения в США говорит также объем востребованности данной услуги, так, в 2011 году 77% американских корпораций пользовались услугами онлайн обучения, в то время как в 1995 году таких компаний было всего 4%.

Наиболее доходным сектором он-лайн рынка образовательных услуг является корпоративное дополнительное образование, его объем составляет \$200 миллиардов.

Согласно исследованию, проведенному в 2011 году Towards Maturity Benchmark среди 600 компаний, 72% корпораций считают, что обучение новым технологиям он-лайн значительно ускоряет процесс адаптации к меняющимся условиям среды.

На сегодняшний день ежедневная посещаемость он-лайн программ составляет 4 600 000 человек. Согласно аналитическим прогнозам, количество посещений в день к 2014 году вырастет до 18 650 000. Таким образом, к 2019 году 50% всего обучения будет происходить онлайн.

Во многом высокая востребованность услуг он-лайн обучения обусловлена необходимостью постоянного повышения квалификации и нехваткой времени на очное обучение, так, обучение в режиме он-лайн позволяет сэкономить 35-40% времени. (источник: http://www.ilmagazine.com/e_learn/resources/pdfs/ROI_training.pdf).

Для организаций, предоставляющих образовательные услуги, использование Интернет технологий позволяет сократить расходы на реализацию различных обучающих программ в среднем на 50-80%.

Конечно, развитие Интернет технологий в России происходит не так бурно, как в США и Европе, тем не менее, Интернет компании постепенно завоевывают рынок.

По данным Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ), на протяжении текущего года число активных Интернет-пользователей в России увеличилось на 10%. Как отмечают эксперты, в

текущем году пользователями всемирной Сети является 60% россиян. Ежедневно Интернет услугами пользуются около 40%.

Среди приоритетных направлений он-лайн сервисов в России можно назвать новостные ресурсы, в том числе политические, ими по данным опроса ВЦИОМ 22 и 23 сентября 2012 пользуются 47% россиян.

Также он-лайн пространство используется россиянами для работы и учебы (51%), электронной переписки (45%). К популярным типам использования ресурсов интернета также относятся прослушивание музыки, просмотр фильмов, чтение книг (39%), общение с другими пользователями (37%) и поиск друзей (24%)».

Согласно прогнозам на 2013 год, количество Интернет пользователей в России значительно возрастет и будет достигать около 90 миллионов человек.

Несмотря на растущий объем потребления Интернет услуг в России, он-лайн обучение не пользуется такой популярностью, как в западных странах, что отчасти можно объяснить низким уровнем предложения он-лайн услуг в области образования в России.

Отечественные образовательные учреждения отдают предпочтение традиционным формам дневного и заочного обучения, что часто выступает ограничивающим фактором их развития.

Организация предложения образовательных услуг в режиме он-лайн имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными формами. В частности:

- Неограниченное количество студентов на курсах при отсутствии необходимости принимать экзамены в устной форме
- Удобство доступа для преподавателя и для студента
- Сокращение расходов (в некоторых случаях до 80%)
- Возможность давать либо прямую трансляцию, либо запись (либо и то, и другое)
- Гибкий график прохождения образовательных программ в цифровом формате
- Большой охват аудитории за счет отсутствия привязки к конкретному месторасположению (город, область, округ)
- Возможность создания и развития интерактивных форм обучения в режиме он-лайн

Среди недостатков он-лайн обучения эксперты отмечают невозможность реализации программ, требующих проведения практических лабораторных занятий с применением специальных приборов и материалов, а также низкий уровень социальной общности обучающихся и их взаимодействия. Однако, в современных условиях указанные недостатки вполне устранимы.

Помимо расширения возможностей предложения образовательных услуг, организация и продвижение он-лайн программ дает учебным заведениям возможность получения дополнительной прибыли для обеспече-

ния собственных нужд и расширения материально-технической базы за счет собственных средств.

Поскольку в сфере получения базового образования в России на сегодняшний день наиболее востребованным продолжает оставаться очная форма обучения, начало развития он-лайн программ лучше начинать с предложения услуг дополнительного образования, как наиболее перспективного с этой точки зрения направления.

Первым этапом развития данного направления для любого учебного заведения должна стать разработка программы. Учебные курсы могут быть представлены в различных форматах – электронные тексты, аудио и видеозаписи.

Для трансляции обучающих программ можно использовать такие платформы, как:

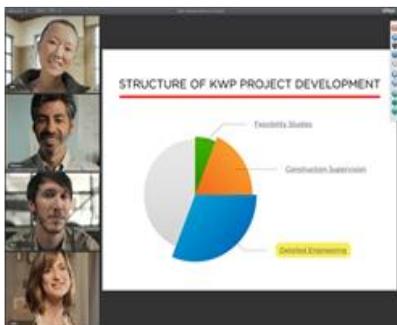


Рис.1. Gotomeeting



Рис.2. Youtube hangouts



Рис.3. Livestream

Организация предложения образовательных услуг в режиме он-лайн происходит в несколько этапов. Для успешного продвижения программы, прежде всего, необходима социальная платформа. Основой социальной платформы учебного заведения в первую очередь становятся студенты

очного и заочного отделений, однако, данная аудитория ограничена пространственными рамками населенного пункта и региона.

Для расширения социальной базы необходимо привлекать различные средства продвижения, причем особую роль в данном процессе играет грамотное использование Интернет технологий.

Продвижение в сети предполагает использование таких основных средств как современный качественно написанный сайт или портал, предлагающий не только услуги, но и интересный потенциальным абитуриентам контент.

Особое место в привлечении аудитории занимает продвижение в социальных сетях (ВКонтакте, Facebook, Twitter), а также на таких популярных видео ресурсах, как YouTube, Vimeo.

Дополнительным преимуществом, которое есть у любого учебного заведения с точки зрения организации продвижения он-лайн обучения, является наличие широких возможностей краудсорсинга и сокращения расходов на продвижения за счет привлечения студентов.

Успешная организация предложения услуг он-лайн обучения также зависит от правильности выбора целевой аудитории. Сегодня расходы на рекламу в он-лайн пространстве можно сократить и увеличить их эффективность почти до 100% не только за счет более грамотного определения целевой аудитории, но и за счет использования таких бесплатных аналитических инструментов, как google analytics, которые предоставляют пользователю все необходимые показатели, помогающие измерить эффективность Интернет кампании.

Учитывая специфику предложения образовательных услуг, конечным результатом продвижения должна быть продажа качественного контента, которым в данном случае является сама образовательная программа или курс. Контент должен быть не только содержательным, но и грамотно представленным и оформленным, т.е. привлекательным для аудитории не только с точки зрения его интеллектуальной ценности.

Подводя итоги выше сказанному, можно сделать вывод том, что расширение сферы предложения услуг он-лайн обучения является перспективным направлением в сфере образования. Наиболее перспективным представляется предложение таких услуг в области дополнительного образования, поскольку потребность в нем испытывает широкая аудитория, которая может быть привлечена.

Использование Интернет технологий и методов он-лайн продвижения позволит российским вузам расширить число студентов и привлечь дополнительные средства для развития за счет устранения географических ограничений.

Для реализации данной идеи на практике требуется разработка и создание учебными заведениями собственных он-лайн платформ, организация продвижения в социальных сетях и на популярных он-лайн ресурсах, составление и оформление качественного и привлекательного контента с использованием прогрессивных медиа технологий.

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А		ВЛАСОВ С.М.	31
АВАКИМЯН Н.Н.	156, 226	ВЛАСОВА А.В.	70
АВДЮНИН Е.Г.	137, 161, 196,	ВОЛЬМАН М.А.	65
	189	ВОРОВИЧ Л.С.	79
АЗАЛОВ Р.К.	135	ВЬЮГИНА М.С.	300
АКУЛОВА М.В.	351		
АЛЕКСЕЕВ М.А.	309	Г	
АЛЕШИНА А.П.	346	ГАБИТОВ Р.Н.	241
АНДРЕЕВ А.В.	237	ГАПОНЕНКО А.М.	156
АНДРИАНОВ С.Г.	62	ГАСЬКОВ А.К.	217, 219
АРСЕНОВ В.Г.	140, 142	ГЛЯЗНЕЦОВА А.В.	282
		ГНЕЗДОВ Е.Н.	232 237,
АРХАНГЕЛЬСКАЯ Е.Л.	129		249, 255
АШМАЕВ К.Ю.	309	ГНЕЗДОВ Н.Е.	232, 249
		ГОЛУБЕВ А.В.	261, 277
Б			286, 292,
БАБАНОВА Е.Д.	355		295
БАБАНОВА Н.Н.	355	ГОМЫРОВА А.А.	105
БАГАУТДИНОВА Л.А.	306	ГОРБУНОВ В.А.	229, 235
БАЗАРОВ А.А.	144		242
БАЙДАКОВА Ю.О.	145	ГОРБУНОВА Е.А.	229
БАННИКОВ А.В.	186	ГОРИНОВ О.И.	241, 246
БАННИКОВА С.А.	149	ГОРШЕНИН С.Д.	41
БАРАНЦЕВА Е.А.	317	ГОТОВКИНА Е.Е.	295
БАРОЧКИН А.Е.	36, 38, 41,	ГРИГОРЬЕВ Е.Ю.	48
	344	ГУРЫЛЕВ О.Ю.	312
БАТУРОВ А.В.	289		
БАШАРОВ М.М.	91	Д	
БАШЛЫКОВ Д.О.	66	ДАВЫДОВ В.В.	302
БЕЛЯЕВ А.Р.	261	ДАНИЛОВ А.В.	214, 217
БЕЛЯКОВ А.Н.	330	ДАНИЛУШКИН В.А.	159
БИРЮКОВ Б.В.	15	ДАЦЕНКО Е.Н.	156, 226
БОБКОВ С.П.	338	ДЕМИН А.М.	114, 117
БОРИСОВ А.А.	332	ДОЛИНИН Д.А.	246
БОРОДУЛИНА С.И.	82	ДОРОФЕЕВ В.Н.	244, 252
БУГРОВ М.А.	62	ДРИГАНОВИЧ И.И.	323
БУДАНОВ В.А.	57	ДУБОНОСОВ А.Ю.	156
БУРОВ В.Д.	3, 5, 202	ДУДАРОВСКАЯ О.Г.	111
БУХМИРОВ В.В.	47, 150, 153,	ДУДОЛИН А.А.	5, 202
	214, 217, 219,	ДЯКИНА Д.А.	3
	222		
БУШУЕВ Е.Н.	105, 108	Е	
БУШУЕВА Н.В.	105	ЕЛИН Н.Н.	320, 323
			326, 341
В		ЕРЕМИНА Н.А.	103
ВАСИЛЬЕВ Н.И.	226	Ж	
ВАСИЛЬЕВ С.В.	186	ЖАДАН А.В.	108
ВЕРЕМЬЁВ В.О.	132	ЖУКОВ В.П.	36, 38, 41,
ВИНОГРАДОВ А.Л.	51, 52		330, 332,
ВИНОГРАДОВ В.Н.	335		335, 344

З

ЗАБУДЬКОВ К.В.	8
ЗАКИРОВ А.О.	31
ЗАМАЛИЕВА А.Т.	100
ЗАРЯНКИН А.Е.	48
ЗАХАРОВА А.В.	300
ЗИГАНШИН М.Г.	97,100

ЗУБАРЕВ С.А.	159
--------------	-----

И

ИЛЬИН Е.Т.	19
ИЛЬЧЕНКО А.Г.	62, 73
ИСМАТОВ М.А.	144

К

КАДУЙСКИЙ Д.В.	189
КАРПЫЧЕВ Е.А.	85
КИСЕЛЁВ А.И.	51, 52
КИСЕЛЁВ Р.А.	161
КЛОЧКОВА Н.Н.	165
КЛЮКВИН В.В.	168
КОЗЮЛИНА Е.В.	88
КОЛЕГОВ А.В.	87
КОЛИБАБА О.Б.	219, 241
КОЛОСОВА Ю.С.	286
КОНДРАШИН А.В.	125
КОНОВАЛОВ А.В.	171
КОРМАШОВА Е.Р.	176,182
КОРОТКОВ А.А.	41
КОСТАРЕВ В.В.	328
КОСТЕРИН А.Ю.	217
КОЧАРЯН Е.В.	179
КОЧЕТКОВ А.Е.	134
КОЧЕТКОВА Н.Н.	312
КРАСНОВ А.А.	51
КРАШЕНИННИКОВ С.М.	5
КРУПНОВ Е.И.	176,182
КРЫЛЕНКО М.А.	19
КРЫЛОВ А.Р.	62
КУЛАКОВ Г.Т.	315

Л

ЛАПШИН В.Н.	186
ЛАРИН А.Б.	87, 88,
ЛАРИН Б.М.	85
ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В.	36, 38, 41
ЛЕЗНОВА Н.Р.	320, 323
ЛОПАТИНА М.В.	232, 241
	255
ЛУЦЕНКО А.С.	179

М

МАКАРОВ А.П.	159
МАЛКОВ Е.С.	28
МАРШАЛОВ Е.Д.	271, 297
МАСАЛИМОВ И.К.	179
МАХОВ О.Н.	222
МИЗОНОВ В.Е.	317,320
	323, 328
	335

МИТЮШОВ А.А.	44
МУРАВЬЕВ И.К.	268
МУСТАФИН Р.Р.	306
МЫЛЬНИКОВ В.А.	326
МЫС А.Я.	312

Н

НАГОРНАЯ О.Ю.	242
НАУМОВ Ю.В.	274
НЕНАЕЗДНИКОВ А.Ю.	38
НИКИТИН А.С.	237,249,255
НИКИШОВ В.Ф.	244, 252
НИКОНОВ А.Н.	265, 280
НОВИКОВ А.В.	207
НОВОСЕЛЬЦЕВА С.С.	44
НОСКОВ В.В.	48

О

ОБУХОВА А.В.	165
ОГУРЦОВ В.А.	346
ОЛЕЙНИКОВА Е.Н.	202
ОЛЕШКЕВИЧ М.М.	199
ОСИПОВ В.С.	144

П

ПАНКОВ С.А.	22
ПАРШИН Б.Е.	93
ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Г.А.	235
ПЕЧЕНКИН С.П.	19
ПЛЕТНИКОВ С.Б.	114
ПОГОДИН А.И.	214
ПОДЖАРОВ С.А.	315
ПОЛИЩУК И.В.	338
ПОЛУЭКТОВА Е.А.	289
ПОЛУЭКТОВА Н.А.	289
ПОНОМАРЕВА Е.В.	217
ПОПЕЛЫШКО А.В.	326
ПРОНИН В.Ю.	244, 252
ПРОРОКОВА М.В.	217, 222
ПЫЖОВ В.К.	207

Р	
РАЗОРЕНОВА Н.А.	82
РАКУТИНА Д.В.	47
РОГОВА А.А.	187
РОДИОНОВ Г.А.	150, 217
РУДЕНКО И.В.	309
РУДЕНЯ А.С.	199
РЯБИКОВ И.А.	297
РЯБИНКИН В.К.	76
С	
САФРОНОВ А.В.	123
САХАРОВ А.А. ,	320
СЕВАЛЬНЕВ А.Т.	189
СЕДОВ Д.В.	73
СЕМЕНОВ В.К.	65, 79
СЕМЕНОВА К.Ю.	34
СИРОТКИН Д.Н.	76
СКУРИХИНА А.П.	292
СОЙКО Г.В.	5
СОЗИНОВ В.П.	193
СОЗИНОВА Т.Е.	153, 217
СОКОЛОВ А.К.	230
СОКОЛОВ В.Ю.	211
СОКОЛОВА А.А.	300
СОЛНЫШКОВА Ю.С.	214, 217
СОЛОВЬЕВ Р.А.	196
СОЛОПАНОВА К.А.	317
СУББОТИН В.И.	168
СУЛЕЙМАНОВ М.Г.	219
Т	
ТАЛАНОВ В.Д.	114
ТАНИЧЕВ М.В.	351
ТВЕРСКОЙ Ю.С.	257,265, 268 271, 274, 277
ТЕТЕРЕКОВ И.В.	120
ТИБАЙКИН В.А.	217
ТИМОШИН Л.И.	176,182
ТОКОВ А.Ю.	70
ТОМИЛОВ В.Г.	94
ТРЯНОВСКИЙ А.Б.	161
ТРУХИНА О.Г.	82
У	
УЛАНОВ Д.А.	332
УСАЧЕВ А.Е.	135
УСТИНОВА Л.Г.	348

Ф	
ФАРАХОВ Т.М.	111
ФАРАХОВА А.И.	91
ФЕДОСОВ С.В.	351
ФИРСОВА В.	211
ФРАНЦЕВА А.А.	205

Х	
ХАКИМУЛЛИНА А.С.	306
ХАМАТХАНОВ Р.Ф.	306
ХОДЫРЕВА Н.Г.	348
ХОХЛОВ И.С.	297
ХРУСТАЛЕВ В.А.	66

Ц	
ЦВЕТКОВА М.С.	232, 237 249, 255
ЦЕЛИЩЕВ Е.С.	282
ЦЫПЛОВ А.В.	341

Ч	
ЧИЧИРОВА Н.Д.	31
ЧУХИН И.М.	25

Ш	
ШАПОШНИКОВ В.В.	15
ШЕЛЫГИН Б.Л.	22, 28
ШЕПЕЛЕВ С.В.	57
ШЕРСТОБИТОВ И.В.	8
ШИПКОВ А.А.	34, 57
ШОШИН В.Г.	76
ШУВАЛОВ С.И.	44
ШУРЫГИН А.М.	217

Щ	
ЩЕГОЛЕВА О.И.	249, 255
ЩИННИКОВ П.А.	123

Я	
ЯБЛОКОВ А.А.	277
ЯБЛОКОВ Л.Д.	59
ЯГАНОВ Е.Н.	94

BERTHIAUX H.	317
GATUMEL C.	317
OTWINOWSKI H.	330
URBANIAK D.	330

СОДЕРЖАНИЕ

Секция "ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ"	3
Секция "ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА"	137
Секция "ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ"	226
Секция "СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ"	257
Секция "МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ"	317

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**
(XVII Бенардосовские чтения)

Печатаются в авторской редакции

II том
Теплоэнергетика

Подписано в печать 27.04.2013. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 21,16. Уч.-изд. л. 22,1. Тираж 200 экз. Заказ .
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто»
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39