

Моделирование растопочного узла энергетических прямоточных котлов СКД для тренажеров

Рабенко В.С., Виноградов А.Л., Киселёв А.И., кандидаты технических наук

Рассмотрены вопросы моделирования элементов растопочного узла крупных энергетических котлов с точностью, позволяющей проводить на них исследования работы оборудования блока во время растопки на сепараторном режиме.

Ключевые слова: тренажер, моделирование, растопочный режим, котлоагрегат.

Modelling Kindling Unit of the Power Uniflow Boilers SKP for Simulators

V.S. Rabenko, A.L. Vinogradov, A.I. Kiseliov, Candidates of Engineering

This article is dedicated to consideration of the questions modeling of kindling unit items of large power boilers with accuracy allowing to realize equipment block investigation in the flow of kindling in separate condition.

Keywords: simulator, modelling, kindling unit, boiler.

Работами ВТИ, ОРГРЭС и ТЭП показано, что технические требования, вытекающие из условий надежности и экономичности работы блоков, в наибольшей степени удовлетворяются при пуске блоков по скользящему режиму, т.е. по режиму, при котором в процессе пуска изменяются все параметры потока. Для обеспечения этого режима широко применяется схема с растопочным узлом (рис. 1).

В настоящее время встроенный растопочный узел унифицирован для всех прямоточных котлов. Этот узел включает (рис. 1) сепараторы ВС (1), встроенные в тракт котла задвижки ВЗ (5), дроссельные клапаны на подводе среды к сепаратору Д1 (3) и отводе осушенного пара Д3 (2) и отсепарированной воды Д2 (4), а также трубопроводы, подводящие и отводящие среду.

В пусковых схемах энергоблоков устанавливаются также растопочные расширители Р-20 (6), которые служат ступенью расширения среды, поступающей из встроенных сепараторов.

Растопочный узел является достаточно значимым элементом пароводяного тракта котла в режимах растопки и расхолаживания. Кроме того, это достаточно «темное» место технологического тракта блока. Как показала практика, далеко не все технологи представляют себе механизм работы этого узла, ограничиваясь лишь поверхностными, описанными в инструкциях принципами управления данным оборудованием. Это также свя-

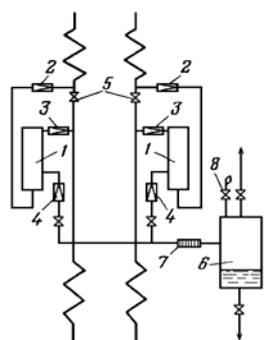


Рис. 1. Принципиальная схема встроенного сепарационного узла: 1 – встроенный центробежный сепаратор (ВС); 2 – дроссельный клапан Д3; 3 – дроссельный клапан Д1; 4 – дроссельный клапан Д2; 5 – встроенная задвижка (ВЗ); 6 – растопочный расширитель Р-20; 7 – ограничительные шайбы; 8 – предохранительные клапаны

зано с очень незначительным числом контролируемых параметров по данному узлу. Вместе с тем без качественной модели растопочного узла невозможно проводить обучение персонала энергопредприятий правильному и качественному ведению режимов растопки и расхолаживания блоков, имеющих подобное оборудование.

В таких условиях, прежде чем приступать к непосредственному моделированию данного узла, необходимо тщательно проработать расчетную схему будущей модели на различных режимах работы оборудования, учесть все (или почти все) возможные нюансы, которые могут повлиять на адекватность работы модели. От этого во многом будет зависеть качество нашей будущей модели растопочного узла, а вместе с ней и качество всей модели котельного агрегата.

Начнем непосредственно со встроенного сепаратора.

В пусковой схеме встроенные линейные сепараторы устанавливаются на каждом регулируемом потоке котла и рассчитываются на рабочее давление. Описание этой схемы и особенностей ее работы приведено в [1].

Встроенные сепараторы предназначены для обеспечения надежного температурного режима поверхностей нагрева котла. При работе по скользящему режиму пусковая схема позволяет также свести к минимуму потери пара за счет поддержания паропроизводительности котла на уровне, близком к расходу пара, потребляемому турбиной на всех этапах пуска.

Встроенные пусковые сепараторы работают в довольно сложных условиях, так как в процессе пуска котла в сепаратор поступают последовательно вода, пароводяная смесь и перегретый пар. Одновременно с повышением сухости пара по мере увеличения тепловыделения в топке изменяется также давление от атмосферного до номинального (рис. 2).

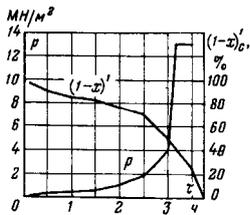


Рис.2. Графики изменения влажности и давления перед встроенным сепаратором в процессе пуска

Встроенные сепараторы работают при очень высоких массовых скоростях потока, которые, по существу, являются предельными, поэтому растопочный расход должен соответствовать расчетному. При нарушении этого требования может наступить ухудшение работы сепаратора. В современных котлах это требование обеспечивается расчетом проходного сечения клапана Д1 и ограничением расхода воды через него (растопочный расход).

В соответствии с условиями надежности оборудования блока, в процессе пуска сепараторы должны обеспечить высокоэффективное отделение влаги и защищать пароперегревательные поверхности нагрева котла от попадания в них большого количества воды во всем диапазоне растопочных режимов.

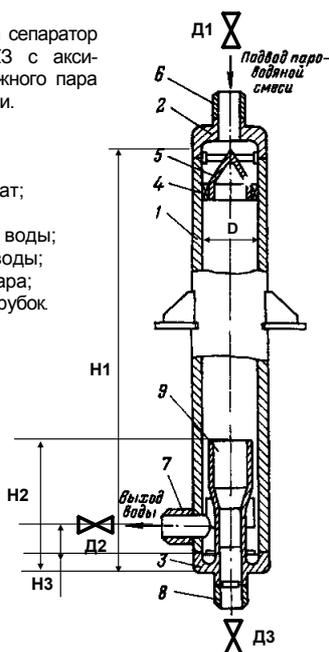
Типовая пусковая схема предусматривает дополнительные меры для защиты элементов котла в условиях пуска (особенно в условиях пуска из неостывшего и горячего состояний), когда попадание воды на неостывшие поверхности нагрева может вызвать дополнительные термические напряжения. На линии отвода осушенного пара из сепаратора в пароперегреватель устанавливается клапан (рис. 3, Д3), который отсекает пароперегреватель от сепаратора в начальный момент пуска, тем самым предотвращается попадание воды в линию за сепаратором.

Встроенный сепаратор (ВС) является основным элементом конструкции растопочного узла. Принципиальная схема ВС изображена на рис. 3.

Под действием центробежных сил в сепараторе происходит отделение воды, отвод которой организован через пароприемник 9 и патрубок 8.

Рис. 3. Центробежный сепаратор конструкции ЦКТИ-ТКЗ с аксиальными вводом влажного пара и винтовыми лопастями.

- 1 - корпус сепаратора;
- 2, 3 - доньшки;
- 4 - лопаточный аппарат;
- 5 - конусная вставка;
- 6 - патрубок подвода воды;
- 7 - патрубок отвода воды;
- 8 - патрубки отвода пара;
- 9 - пароприемный патрубок.



В режимах растопки питательная вода, нагревая в тракте котла, расположенного до встроенной задвижки (ВЗ), поступает во встроенный сепаратор при давлении 250 ата через дроссель Д1.

При дросселировании давление падает и часть воды испаряется. Благодаря наличию во встроенном сепараторе различных сепарационных устройств, происходит сепарация воды и образовавшегося пара. Пар через дроссель Д3 поступает в тракт котла, лежащий за встроенной задвижкой, а вода через дроссель Д2 отводится в растопочный расширитель Р-20.

Как показали различные и достаточно многочисленные исследования процесса сепарации влаги в линейных сепараторах, влагосодержание пара после сепаратора не превышает 1 % в широком диапазоне режимов его работы [5]. Таким образом, по нашему мнению, можно принять, что при нормальной работе сепаратора после сепарации мы имеем дело с сухим насыщенным паром.

Хотя в общем случае можно предложить следующую методику для определения КПД (η_c) сепаратора:

$$\eta_c = \begin{cases} A_c (1 - e^{-k_c \frac{(1-x_c)}{x_c}}) & \text{при } 0,4 \leq x_c \leq 1,0; \\ 0,98 & \text{при } x_c < 0,4 \end{cases},$$

где $A_c = 0,98$ – конструктивный коэффициент сепаратора; k_c – коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания КПД по мере увеличения влажности (отражает изменение относительной доли мелкодисперсной трудноосепазируемой влаги в паре при изменении влажности).

При этом встроенный сепаратор может работать в различных режимах, резко отличающихся один от другого и требующих написания своих отдельных моделей для каждого режима. Рассмотрим основные из этих режимов:

- 1) *нормальная работа встроенного сепаратора*, когда уровень воды в нижней части ниже уровня выходного парового патрубка ($H < H2$);
- 2) уровень воды в нижней части ВС отсутствует или настолько мал, что происходит «проскок» пара через Д2 в растопочный расширитель Р-20;
- 3) уровень воды в нижней части выше выпускного парового патрубка, и вода попадает в нагретый тракт котла ($H1 > H2$);
- 4) встроенный сепаратор полностью заполнен водой, и отсутствует паровая подушка в верхней его части.

Таким образом, по нашему мнению, «всеобщая» модель встроенного сепаратора, корректно отражающая его поведение во всех диапазонах режимов работы, должна состоять из отдельных подмоделей, написанных и протестированных для каждого из этих режимов отдельно. В зависимости от уровня воды в нем, приходится выделять отдельные характерные режимы и для каждого режима писать свою модель. Следовательно, блок-схему будущей программы-модели можно представить так, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема модели встроенного сепаратора

Остановимся на нормальном режиме работы встроенного сепаратора, когда уровень воды ниже выпускного парового патрубка 9.

Как видно на блок-схеме (рис. 4), в этом случае возможны еще два варианта:

1) уровень воды полностью закрывает водяной выпускной патрубков 7, образуется гидрозатвор, и пар из сепаратора не попадает в расширитель (через дроссель Д2 идет только вода);

2) уровень воды равен или ниже края водяного выпускного патрубка 7, пар «проскакивает» через Д2 в расширитель (в этом случае через Д2 проходит пароводяная смесь неизвестного количественного состава).

Ситуация осложняется тем, что уровень воды во встроенных сепараторах промышленных энергетических котлов не измеряется, поэтому очень сложно оценить влияние этого уровня на пропуск паровой фракции через Д2.

Линейные сепараторы, как правило, не содержат емкости для сбора отсепарированной воды. Вода из сепараторов должна отводиться непрерывно за пределы сепаратора. Создание надежной и экономичной схемы (а значит, и ее математической модели) сброса воды является сложной технической задачей, главным образом из-за трудности поддержания в течение длительного времени равенства мгновенных расходов воды, отделенной от пара в сепараторе, и воды, сбрасываемой в растопочный расширитель. Особенно трудно поддержать равенство этих расходов при нестационарном режиме работы котла.

Из инструкции по эксплуатации растопочного узла, результатов некоторых испытаний котлоагрегатов в растопочных режимах, других скудных сведений можно однозначно заключить, что даже в режиме нормальной работы, когда присутствует уровень в нижней части встроенного сепаратора, часть пара проходит через дроссель Д2 и попадает в растопочный расширитель Р-20. Это можно вывести хотя бы из того, что на практике клапан Д2 используется как регулятор давления во встроенном сепараторе и, следовательно, во всем тракте котла после встроенной задвижки во всем диапазоне растопочных режимов.

Такое положение дел возможно по ряду причин.

Во-первых, возможна транспортировка пара потоком воды при образовании вихревой воронки. Этот эффект обычно имеет место при малых скоростях движения среды.

Во-вторых, транспортировка пара возможна при захвате пузырей пара нисходящим потоком воды. Это явление, напротив, наблюдается при

больших скоростях воды, когда скорость потока превышает скорость подъема пузырей пара.

В обоих случаях в настоящее время отсутствуют расчетные методики данных явлений. С другой стороны, изучение пособий по расчету и эксплуатации растопочного узла, выпущенных ВТИ, ОРГРЭС, ТЭП, технической литературы и опубликованных научных исследований позволяет сделать вывод о том, что подобные явления не должны иметь место в правильно рассчитанном и укомплектованном сепараторе. Это обеспечивается установкой специальных устройств, препятствующих воронкообразованию, поддержанием скоростей потоков в сепараторе, не превышающих расчетные (это условие обеспечивается работой клапанов Д1 и Д2, установкой ограничительных шайб после Д2) [1–4].

Таким образом, если исключить из расчета эти два явления, возможность вышеописанных процессов остается только в одном случае – когда уровень воды поддерживается на высоте выпускного водяного патрубка 2 и часть пара при этом «проскакивает» в растопочный расширитель, причем тем большая, чем больше открыт Д2. В противном случае, если вода «затопила» патрубков 2, образуется гидрозатвор и регулировка давления в ВС при помощи Д2 будет невозможна. Если учесть, что массовые скорости среды во встроенном сепараторе достаточно высоки при относительно небольших размерах сепаратора, то становится понятным, что математическая модель должна очень корректно и точно отслеживать изменения давления во встроенном сепараторе, расходы пара и воды, уровень воды. При грубом и неточном расчете модель ВС будет работать «скачками» – то открывая доступ пара в растопочный расширитель, то прекращая его. Следовательно, и давление в сепараторе, а вместе с ним и давление во всем тракте котла за ВЗ будут вести себя соответствующим образом.

Согласно блок-схеме модели (рис. 4), нормальный режим также можно разбить на два подрежима:

1) уровень воды выше $H3$ (существует гидрозатвор, который не пропускает пар в РР-20);

2) уровень воды ниже $H3$ (в растопочный расширитель поступает пароводяная смесь).

Если в первом режиме при известных давлениях во встроенном сепараторе и растопочном расширителе, гидравлическом сопротивлении трубопроводного участка между ними определить расход воды не составляет труда, то во втором случае мы сталкиваемся с некоторыми проблемами. Трудности связаны с тем, что мы не знаем количественный состав пароводяной смеси, проходящей через дроссель Д2.

В этом случае можно предложить следующий метод:

1. Определяем возможный расход воды через дроссель Д2 при отсутствии паровой фазы.

2. Сравниваем полученный расход с расходом отсепарированной в сепараторе воды.

3. Если расход воды из сепаратора меньше определенного нами гипотетического расхода, то предполагаем, что в данном режиме расход водяной фракции смеси через Д2 равен расходу отсепарированной в сепараторе влаги.

4. По соотношению расходов определяем долю «свободного» от воды проходного сечения дросселя Д2 (например, если расход отсепарированной влаги составляет 50 % от максимально возможного расхода воды через Д2, то считаем, что 50 % площади проходного сечения свободно).

5. Определяем расход сухого насыщенного пара через определенное нами «свободное» сечение дросселя.

Для этого можно использовать формулу Бендемана [6]

$$G_k = \mu F B_0 p_0 \sqrt{RT_0} \quad (1)$$

Здесь μ — коэффициент расхода; F — сечение клапана; p_0 и T_0 — параметры пара перед клапаном; B_0 — коэффициент Бендемана, равный

$$B_0 = [2 / (1 - \Pi_k)] \times \sqrt{[2k / (k + 1)] [-0,09 + (1,09 \cdot p_1 / p_0) - (p_1 / p_0)^2]}$$

где $\Pi_k = p_{кр} / p_0$, $p_{кр}$ — критическое давление.

Определив количественный состав пароводяной смеси, а значит, и ее плотность, рассчитываем ее расход через клапан Д2 в динамике. Для этого можно использовать следующее уравнение:

$$\frac{l}{S} \frac{dG}{d\tau} = \Delta P - zG^2, \quad (2)$$

где l , S — длина и площадь труб в рассчитываемой системе (фактически — коэффициенты, определяющие динамику изменения расхода); G — расход среды через рассчитываемый участок; ΔP — перепад давлений на концах участка; $z = f(p)$ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Можно предложить и другой способ определения состава и расхода пароводяной смеси — метод итерационного определения. Правда, как и любой итерационный метод, он более ресурсоемкий для ЭВМ, причем ресурсоемкость повышается при повышении точности расчета.

Первые три действия данного метода совпадают с предыдущим.

Далее в итерационном цикле мы прибавляем с некоторым шагом (определяющим точность нашего расчета) к известному расходу воды некоторую долю пара, определяем степень сухости смеси, ее плотность и расход смеси через участок. Так продолжается до тех пор, пока расход смеси не сравняется с суммарным расходом воды и пара. Блок-схема вышеизложенной операции приведена на рис. 5.

Для определения расхода пароводяной смеси можно воспользоваться уравнением (1).

В режимах, когда уровень в нижней части сепаратора отсутствует или затоплен выпускной патрубком 2 (через клапан Д2 проходит гомогенная среда), расчет расхода через него не представляет никаких сложностей.

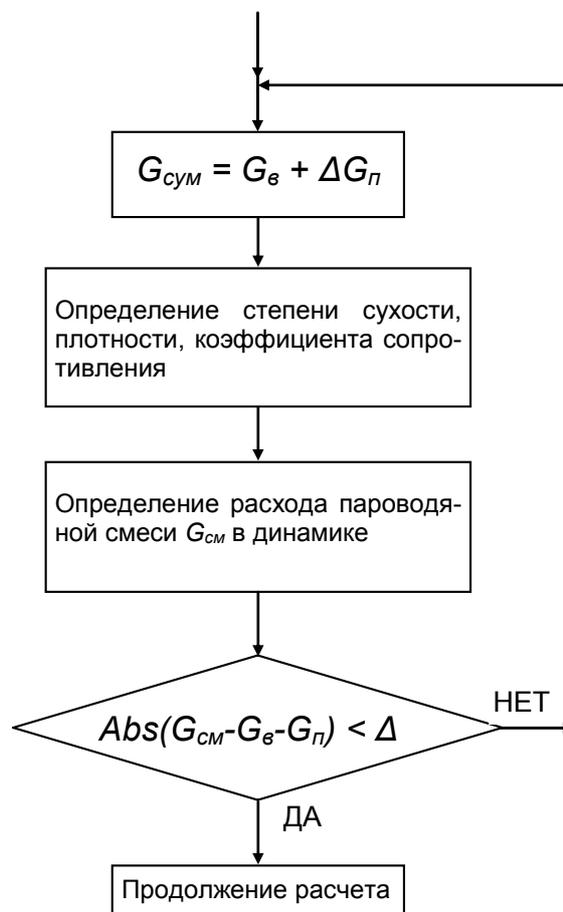


Рис. 5. Блок-схема итерационного цикла: $G_в$ — расход воды; $G_п$ — расход пара; $G_см$ — расход пароводяной смеси; Δ — шаг цикла

Теперь рассмотрим случай, когда уровень H в сепараторе достиг горловины выпускного парового патрубка 7 ($H = H_2$).

В этом режиме вода начинает поступать в тракт котла через клапан Д3. Хотя эксплуатация котельного агрегата в таком режиме запрещена инструкцией по его эксплуатации, в реальной жизни такие ситуации вполне возможны. Тем более такие режимы необходимо моделировать в тренажере, который и предназначен, в том числе, для обучения оперативного персонала определению различных нештатных и аварийных ситуаций и отработки действий по их ликвидации.

При составлении математической модели в данном случае мы сталкиваемся с теми же проблемами, что и в предыдущем, при пропуске паровоздушной смеси через Д2: мы не знаем количественный состав смеси, и для его определения вынуждены сделать некоторые предположения. Предполагаем, что через Д3 в тракт котла уходит вся разница расходов отсепарированной в сепараторе влаги и воды, ушедшей через клапан Д2 в растопочный расширитель (естественно, при условии, что Д3 способен пропустить такой расход воды). Далее по методике, описанной выше, определяем количественный состав пароводяной смеси и ее расход через Д3 в тракт котла.

Давление в сепараторе определяется процессами в его паровом пространстве. Поэтому модель парового пространства имеет в данной системе определяющее значение.

Будем считать паровое пространство сепаратора влажнопаровым объемом с наличием теплообмена между стенками сепаратора и непосредственно влажным паром внутри его. Экспериментальными исследованиями установлено отсутствие заметного градиента давления в паровом пространстве подобных систем [6, 7]. Это позволяет рассматривать паровое пространство как материальный аккумулятор с сосредоточенными параметрами, причем практически во всех случаях можно без существенной погрешности полагать паровую фазу в сепараторе находящейся в состоянии насыщения. Отсепарированная влага образует пленку на внутренней поверхности сепаратора. Аккумуляция значительной массы влаги в этой пленке оказывает существенное влияние на динамические характеристики рассматриваемого нами парового объема. При понижении давления в паровом пространстве соответственно уменьшается температура влажного пара. При этом начинается испарение влаги, вызываемое двумя причинами [8]. Первая из них – испарение жидкости по всему объему при понижении давления. Вторая причина обусловлена теплообменом между металлической стенкой и покрывающей ее пленкой. В исходном равновесном режиме теплообмен между ними отсутствует. При резком понижении давления температура металла оказывается выше, чем температура пленки. Подвод теплоты к пленке со стороны стенки вызывает кипение жидкости. При этом температура внутренней поверхности стенки понижается. Вследствие интенсивного испарения жидкости скорость снижения давления в объеме резко изменяется.

Картина оказывается существенно иной при повышении давления в объемах. Температура заполняющего объем насыщенного пара при этом становится выше температуры жидкой фазы, сосредоточенной как в пленке, так и во взвешенных в паровом потоке каплях и воде в нижней части сепаратора. В результате теплообмена между фазами на их границе происходит дополнительная конденсация. Пар конденсируется также на участках стенки, которые в исходном режиме не были покрыты пленкой влаги. По мере повышения температуры пленки увеличивается отвод теплоты от нее к стенке, что охлаждает пленку. Конденсация части подводимого в объем пара снижает скорость повышения давления. Таким образом, и при падении давления и при его увеличении наличие влажного пара изменяет динамику давления во влажнопаровом объеме. Следует обратить внимание, что процессы повышения давления во влажнопаровых емкостях не являются зеркальным отображением процессов снижения давления.

Математическая модель влажнопаровой емкости включает в себя уравнения материального и теплового балансов:

$$\left. \begin{aligned} Vd\rho / dt &= G_u - G_{\text{вых}} - G_k, \\ Vd(\rho u) / dt &= G_u i - G_{\text{вых}} i - G_k i + Q_{cm}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $G_{\text{вых}}$ – расход пара, уходящего из емкости (включает в себя расходы пара, уходящие через клапаны Д2 и Д3); u – внутренняя энергия пара; G_k – масса конденсирующегося в единицу времени пара; G_u – масса пара, образующегося в единицу времени при испарении влаги; Q_{cm} – тепловой поток от стенки к жидкой пленке; i – энтальпия пара во встроенном сепараторе; V – объем емкости, занятой паром.

В процессе работы встроенного сепаратора возможны резкие изменения уровня воды в нем. Объем парового пространства зависит от уровня h воды в сепараторе, причем с повышением этого уровня объем уменьшается. Поэтому нашу систему необходимо дополнить уравнением изменяющегося объема паровой емкости, и итоговая система уравнений примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} d(V\rho) / dt &= G_u - G_{\text{вых}} - G_k, \\ d(V\rho u) / dt &= G_u i - G_{\text{вых}} i - G_k i + Q_{cm}, \\ dV / dh &= (\partial V / \partial h) dh, \\ \frac{S}{\rho_e} dh / dt &= G_u - G_e, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где G_e – расход воды, уходящей из сепаратора через клапаны Д2 и Д3; ρ_e – плотность воды в нижней части сепаратора; S – площадь поверхности зеркала воды. В данном случае величина $\partial V / \partial h$ является отрицательной.

Конденсация пара на стенке, покрытой пленкой, или на поверхности жидкой фазы определяется соотношениями

$$G_k = \begin{cases} 0 & \text{при } t' > t_s, \\ \alpha \cdot (t_s - t') F / r & \text{при } t' \leq t_s, \end{cases} \quad (5)$$

где t_s – температура насыщенного пара; t' – температура стенки или жидкой фазы; α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности теплообмена; r – удельная теплота парообразования.

Массовый расход испарившейся влаги, как было показано выше, складывается из двух составляющих ($G_u = G_u' + G_u''$), первая из которых определяется теплообменом между металлической стенкой и пленкой и характеризуется уравнениями, зеркально обратными уравнениям (5) при $t_s < t'$. Вторая составляющая G_u'' , определяемая падением давления в объеме, равна $G_u'' = D \cdot dp / dt$, причем

$$D = \begin{cases} 0 & \text{при } dp / dt \geq 0, \\ -(M / r) di' / dp & \text{при } dp / dt \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

где M – масса жидкой фазы; i' – энтальпия насыщенной жидкости.

Уравнения (4) должны быть дополнены уравнениями теплопроводности или аккумуляции теплоты в стенке, уравнениями состояния пара.

Как следует из некоторых исследований, во многих случаях без существенной погрешности можно пренебречь распределением температуры по толщине стенки, заменяя процесс передачи теплоты по толщине стенки вдоль ее радиуса процессом аккумуляции теплоты в стенке [10, 11].

Некоторые исследователи, пренебрегая теплообменом между стенкой и жидкой пленкой, сводят весь процесс образования пара в емкости к самоиспарению. В этом случае интенсивность парообразования в объеме занижена, а время существования жидкой фазы значительно завышено [10]. Скорость изменения давления в объеме оказывается при таком способе моделирования значительно большей, чем в предыдущем случае. Поэтому его использование в математическом моделировании для тренажеров возможно, по нашему мнению, только в случаях относительно малой массы металла по отношению к массе воды или низкого уровня температур в моделируемом агрегате.

Для моделирования состояния металла сепаратора, в частности процесса аккумуляции теплоты в нем, можно предложить следующую методику.

Количество теплоты, переданное за единицу времени рабочему телу внутренней поверхностью трубы единичной длины может быть определено из уравнения теплообмена между внутренней поверхностью трубы и рабочей средой:

$$q = \alpha f (t_{mj} - t_{ci}), \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; f – площадь внутренней поверхности трубы единичной длины; t_{mj} и t_{ci} – температуры металла и рабочей среды на участке.

Тепловой поток через металл направлен вдоль оси y , перпендикулярной к оси трубы x . Поэтому при анализе явлений передачи теплоты в металле необходимо рассматривать двумерную задачу.

Связь между количеством теплоты, подводимым к трубе со стороны среды внутри сепаратора, и количеством теплоты, отдаваемым во внешнюю среду, может быть установлена уравнением теплопроводности

$$\partial t_m / \partial t = a^2 \partial^2 t_m / \partial y^2 \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями. В этом уравнении a – коэффициент температуропроводности.

Проинтегрировав уравнение теплопроводности по переменной x , получим

$$x \partial t_m^* / \partial t = a^2 x \partial^2 t_m^* / \partial y^2,$$

$$\text{где } t_m^* = \left(\int_0^x t_m dx \right) / x.$$

Так как

$$x \partial t_m^* / \partial t = \partial (x t_m^*) / \partial t - t_m^* \partial x / \partial t,$$

полученное соотношение можно переписать в виде

$$\partial (x \partial t_m^*) / \partial t = t_m^* \partial x / \partial t + a^2 x \partial^2 t_m^* / \partial y^2,$$

Проинтегрировав это уравнение по переменной y , найдем

$$y \partial (x t_{mj}^*) / \partial t = t_{mj} y \partial x / \partial t + a^2 x \int_0^y (\partial^2 t_m^* / \partial y^2) dy, \quad (9)$$

$$\text{где } t_{mj} = \left(\int_0^y t_m^* dy \right) / y.$$

Нужно заметить, что

$$\int_0^y \frac{\partial^2 t_m^*}{\partial y^2} dy = \int \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t_m^*}{\partial y} \right) dy = \left(\frac{\partial t_m^*}{\partial y} \right)_y - \left(\frac{\partial t_m^*}{\partial y} \right)_{y=0}.$$

Производные в правой части последнего соотношения могут быть найдены из следующих граничных условий:

$$\left(\frac{\partial t_m^*}{\partial y} \right)_y = \alpha_n (t_{m,n} - t_{ec}) \approx \alpha_n (t_{mj} - t_{nc});$$

$$\left(\frac{\partial t_m^*}{\partial y} \right)_{y=0} = \alpha_e (t_{m,d} - t_c) \approx \alpha_e (t_{mj} - t_c).$$

где α_n и α_e – коэффициенты теплоотдачи с наружной и внутренней сторон трубы; $t_{m,n}$ и $t_{m,e}$ – температуры наружной и внутренней стенок металла; t_{ec} и t_c – температуры наружной среды и пленки на стенках сепаратора.

С учетом этих соотношений последний член в правой части уравнения (9) можно записать в следующем виде:

$$a^2 x \int_0^y (\partial^2 t_m^* / \partial y^2) dy = (q'_{fj} - q''_{fj}) x / (\rho_m c_m),$$

где q'_{fj} и q''_{fj} – количество теплоты, соответственно подводимой к единице поверхности трубы и отводимой от нее; ρ_m и c_m – плотность и удельная теплоемкость металла.

Умножив обе части уравнения (9) на длину окружности трубы по среднему диаметру, получим, учитывая, что y – толщина стенки, уравнение аккумуляции теплоты в металле в предположении сосредоточенных параметров:

$$d(M c_m t_m) / dt = F(q'_{fj} - q''_{fj}) + t_{mj} c_{mj} dM / dt, \quad (10)$$

где M – масса металла поверхностью теплообмена рассматриваемого участка; dM – изменение массы металла, соответствующее смещению границы зоны на dx .

Последний член в правой части уравнения (10) характеризует количество теплоты, аккумулированной в металле, включаемом в рассматриваемый участок при смещении его границы. Если одновременно смещаются обе границы участка, в уравнение (10) войдут два члена, учитывающие изменение тепловой аккумуляции на обеих границах.

В нашем случае можно принять границы участков фиксированными. При этом $dM / dt = 0$.

Так как важной контролируемой величиной на реальном сепараторе при его расхолаживании является разность температур металла верха и низа, при моделировании расчет аккумуляции теплоты в металле и его температуры необходимо проводить отдельно для двух частей – верхней и нижней. Температура верхней части определяется параметрами среды, поступающей из тракта котла, температура нижней части сепаратора определяется параметрами в самом сепараторе.

В пусковых схемах энергоблоков устанавливаются также растопочные расширители Р-20 (рис. 1, поз.б), которые служат ступенями расширения среды, поступающей из встроженных сепараторов. Такая схема сброса воды из сепаратора является в настоящее время типовой для всех современных прямоточных котлов. Типовой расширитель Р-20

конструкции ЦКТИ-ТКЗ, рассчитанный на давление 2 МПа, показан на рис. 6.

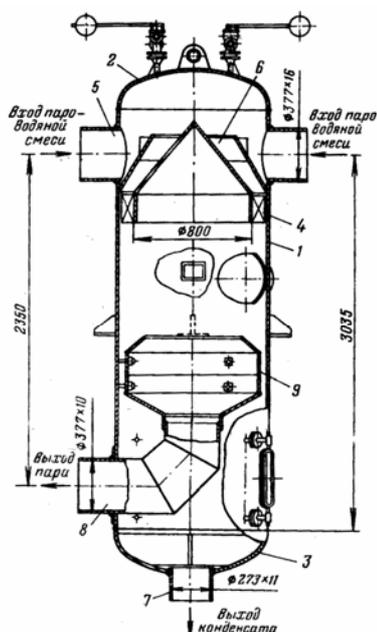


Рис. 6. Растопочный расширитель Р-20 конструкции ЦКТИ-ТКЗ: 1 – корпус; 2, 3 – днища; 4 – лопаточный аппарат; 5 – подводящие патрубки; 6 – конус; 7 – патрубок для отвода воды; 8 – паровыводящий патрубок; 9 – пароприемная труба

Благодаря большим размерам растопочного расширителя (диаметр 1000 мм, высота 3 м) даже при больших расходах воды уровень в сосуде будет изменяться сравнительно медленно. Это позволяет организовать сброс воды из растопочного расширителя при поддержании ее уровня в определенных, заранее намеченных пределах.

Принципиальный подход к моделированию расширителя не отличается от подхода, примененного при моделировании сепаратора, описанного выше. Действительно, конструкции этих двух агрегатов (рис. 3, 6) и их принцип действия очень похожи. Вместе с тем расширитель не является таким ответственным, как сепаратор, агрегатом, влияющим на работу всего тракта котла. Он работает в менее «напряженных условиях», диапазон изменения параметров во время растопки в нем значительно меньше, и сами параметры ниже, как и динамика их изменения. Все это позволяет снизить точность расчета при моделировании процессов, протекающих в расширителе. Вместе с тем расширитель в растопочном узле является, по нашему мнению, именно таким аппаратом, в котором можно пренебречь влиянием аккумуляции тепла в металле стенок при составлении его математической модели для тренажера.

Следует отметить, что реальные технологические схемы растопочных узлов несколько отличаются от унифицированной, приведенной на рис. 1. Причем на каждой станции эти изменения вносились индивидуально. Это значительно ограничивает возможности создания единой унифицированной модели растопочного узла.

Используя вышеописанные принципы и алгоритмы, нам удалось создать математическую модель растопочного узла прямоточного котла, которая успешно используется как в тренажерах, обеспечивая их надежную работу во всем диапазоне растопочных режимов, так и в исследованиях работы оборудования блока на стадии растопки.

Результаты работы этой модели приведены на рис. 7 в виде графиков, снятых при пуске блока на тренажере.

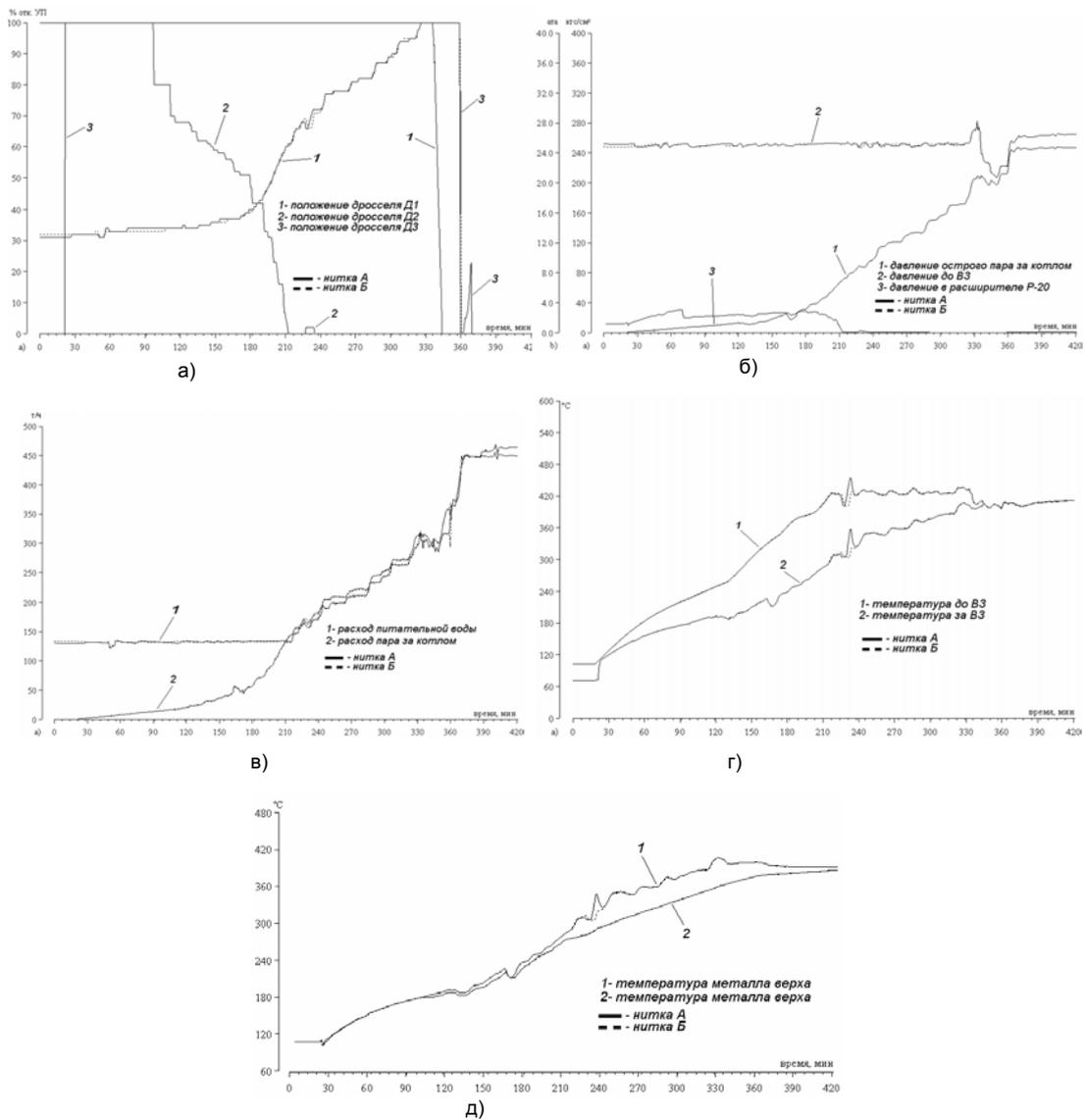


Рис. 7. Изменение параметров работы растопочного узла при пуске на тренажере: а – открытие дросселей Д1, Д2, Д3; б – давление острого пара за котлом, до ВЗ, в Р-20; в – расход питательной воды и пара за котлом; г – температура до и за ВЗ; д – температура металла сепаратора

Список литературы

1. Шмуклер Б.И., Чернецкий Н.С., Директор Б.Я. Разработка и исследование пусковых схем и режимов пуска мощных блоков / Освоение энергоблоков. – М.: Энергия, 1971.
2. Критическая скорость по сносу пузырей пара нисходящим потоком жидкости / Ю.Л. Сорокин, Л.Л. Бачило, Л.Н. Демидова, О.Л. Анисимова // Энергомашиностроение. – 1976. – № 3.
3. Суркова А.Ф., Шейкин С.И. Работа пускосбросных устройств головного котлоагрегата П-57 энергоблока 500 МВт // Электрические станции. – 1978. – № 1.
4. Козлов Ю.В. Особенности сепарации пара и гидродинамики водяного объема современных парогенераторов и кипящих реакторов АЭС // Труды ВТИ. – 1977. – Вып. 11.
5. Кемельман Д.Н. Линейная сепарация влажного пара. – М.: Энергоиздат, 1982.
6. Кемельман Д.Л. Определение эффективности центрального сепаратора прямоточного котла в промышленных условиях // Электрические станции. – 1962. – № 3.

7. Кемельман Д.Н., Рябова Г.Н., Шалагин А.Д. Результаты испытаний сепараторного прямоточного котла с паровой довыпаркой сепарата: Тр. ЦКТИ. Основное и вспомогательное оборудование котельных установок. Вып. 87. – Л., 1968.
8. Коваленко Г.В. Исследование и математическое моделирование нестационарных тепловых процессов влажнопаровых турбин // Энергомашиностроение. – 1976. – № 7. – С. 9–10.
9. Иванов В.А., Липатников Г.А., Беркович Я.Д. Математическое моделирование регенеративных подогревателей питательной воды // Изв. вузов. Энергетика. – 1974. – № 5. – С. 73–77.
10. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982.
11. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика процессов в тепло- и массообменных аппаратах. – М.: Энергия, 1967.
12. Аракелян Э.К., Акопян Р.А. Моделирование режимов встроенного сепаратора при пуске мощных энергоблоков // Теплоэнергетика. – 2005. – № 7. – С. 129–134.

Рабенко Владимир Степанович,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой паровых и газовых турбин,
 e-mail: rvs@tren.ispu.ru

Виноградов Андрей Львович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доцент кафедры паровых и газовых турбин,
e-mail: val@tren.ispu.ru

Киселёв Андрей Игоревич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доцент кафедры паровых и газовых турбин,
e-mail: andrey@tren.ispu.ru