

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЖИМ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

КАДНИКОВ С.Н., д-р техн. наук, ОМЕТОВА М.Ю., канд. техн. наук

Проведены численные исследования процессов теплообмена в регенеративном воздухоподогревателе типа каупер. Анализируется влияние конструктивных и технологических параметров на продолжительность дутьевого периода, исследуются процессы нагрева и охлаждения теплоносителей и кирпичной насадки.

Ключевые слова: регенеративный воздухоподогреватель, распределение температур, теплопередача.

EVALUATION OF DESIGN VALUES AND PROCESS VARIABLES INFLUENCE UPON THE OPERATING REGIME OF REGENERATIVE STOVES

S.N. KADNIKOV, Ph.D., M.Yu. OMETOVA, Ph.D.

This paper is devoted to the computational investigations of heat interchange processes in regenerative stove of cowper stove type. There is the analysis of design values and process variables influence upon the blast cycle duration, and the research of heat-transfer agents and brick attachments heating and cooling processes.

Key words: regenerative stove, temperature distribution, heat transfer.

Одной из основных проблем, возникающих при проектировании и эксплуатации регенеративных теплообменников, является определение их оптимальных конструктивных и технологических параметров. Известные методы теплового расчета регенераторов [1, 3, 5], основанные на грубых допущениях о характере температурных полей в насадке и теплоносителях, не позволяют достаточно точно рассчитать параметры воздухоподогревателей. Предложенная нами ранее [4] математическая модель регенеративного теплообменника, построенная без существенных упрощений, позволяет получить детальную информацию о температурных полях в насадке и шахте в динамическом режиме и на ее основе определить конструктивные и технологические параметры при заданных условиях. Разработанная методика дает возможность проводить варианты расчеты и определять влияние изменений параметров на основные рабочие характеристики регенераторов.

Модель [4] была использована для расчета характеристик при различных значениях длины регенератора, толщины насадки и скорости теплоносителя (дымовых газов).

Прежде чем проводить анализ конкретных числовых зависимостей, рассмотрим картину тепловых процессов в регенераторе, которую можно получить на основе результатов численных экспериментов [4], при следующих данных: длина регенератора $l = 2$ м, поперечный размер ячейки – 10×10 см, толщина кирпича – 45 мм, скорость газа $V = 1$ м/с [2].

После включения регенератора с холодной насадкой начинается переходный процесс, в течение которого устанавливается стационарный периодический режим работы регенератора. В начале первого периода нагрева возникает короткий волновой процесс (с длительностью ≈ 2 с), в течение которого дымовой газ охлаждается с 900°C на входе шахты до 250°C на выходе. Одновременно насадка нагревается на 16 % от максимальной величины, т.е. довольно заметная часть тепловой энергии от газа к насадке передается с большой скоростью. После окончания волнового процесса начинается процесс

медленного нагрева насадки с постепенным увеличением температуры газа на выходе из шахты. Первоначальный период нагрева составляет около 1 ч и значительно превышает соответствующий период нагрева в установившемся режиме. После окончания первого периода нагрева в течение 10 с происходит перекидка клапанов. В течение этого интервала времени газ в шахте остается неподвижным, продолжая отдавать свою энергию насадке. После этого начинается короткий (≈ 2 с) волновой процесс нагрева воздуха от 20°C до 520°C . Это ключевой интервал, в течение которого воздух нагревается до максимальной температуры. Именно эта максимальная температура воздуха (дутья) и определяет основной показатель работы регенератора – длительность подачи дутья. После окончания волнового процесса начинается медленное охлаждения дутья до заданного температурного уровня (450°C). После этого происходит следующая перекидка клапанов и начинается новый цикл нагрева и охлаждения. В установившемся режиме, который возникает по окончании 6–7 периодов (для данного типа регенератора), время нагрева составляет 5,8 мин и время охлаждения 5 мин. Картина динамического и теплового процесса в последующих периодах в качественном смысле повторяет картину первого цикла. Как показывают численные эксперименты, данная картина тепловых процессов имеет место при любых параметрах регенераторов.

Рассмотрим характер влияния длины насадки на процесс установления стационарного режима. Анализ зависимостей времени нагрева и охлаждения кирпича (насадки) от номера периода при длине шахты $l = 3$ м, скорости газа $V = 1$ м/с и толщине кирпича 45 мм (рис. 1) показывает, что характерным является превышение времени нагрева в первом периоде над временами нагрева остальных периодов, так же, как и при длине регенератора $l = 2$ м. Однако если при $l = 2$ м время периода нагрева в установившемся режиме составляет 10 % от времени начального периода, то при $l = 3$ м время нагрева в периодическом режиме составляет уже 43 % от времени начального периода и при $l = 4$ м – 58 %.

При $l = 3$ м процесс установления стационарного режима занимает не более 4 периодов, при $l = 4$ м – 3 периода и при дальнейшем увеличении длины практически не меняется. В то же время установление стационарного режима при $l = 2$ м составляет 7 периодов. Из этого следует, что с точки зрения влияния на характер переходного процесса значение длины регенератора $l = 2$ м (пример расчета которого приведен в [2]) далеко от оптимального.

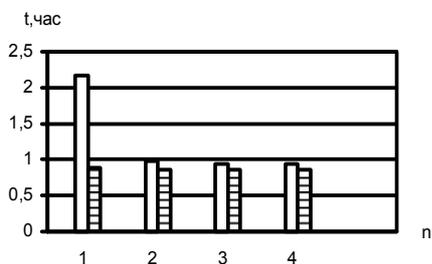


Рис. 1. Зависимость времени нагрева и охлаждения насадки от номера периода n при длине $l = 3$ м, скорости газа $V = 1$ м/с и толщине кирпича 45 мм: □ – нагрев; ▤ – охлаждение

С ростом длины насадки время нагрева и охлаждения, начиная с $l = 2$ м, растет приблизительно по линейному закону (рис. 2). При этом расчеты показывают, что при увеличении длины насадки разница между периодами нагрева и охлаждения остается на уровне 13–14 %.

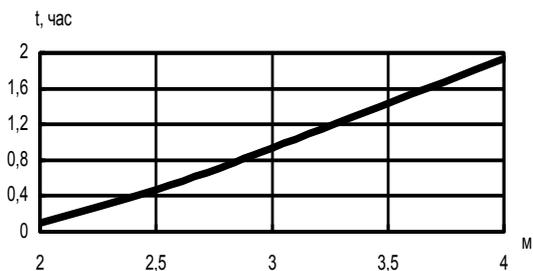


Рис. 2. Зависимость времени нагрева насадки от длины теплообменника в установившемся режиме при скорости $V = 1$ м/с и толщине кирпича 45 мм

Рассмотрим влияние изменения толщины насадки на время периода нагрева и охлаждения. При увеличении толщины насадки с 45 мм до 60 мм при $l = 3$ м и скорости газа $V = 1$ м/с времена периодов нагрева и охлаждения увеличиваются на 20 % (рис. 1, 3). При этом разница между временем нагрева и охлаждения (в установившемся режиме) сокращается до 6 %. Выравнивание периодов охлаждения насадки является положительным фактором, поскольку при этом повышается эффективность эксплуатации регенераторов.

При увеличении скорости газа до $V = 1,25$ м/с времена нагрева и охлаждения уменьшаются на 30 %, и при этом время охлаждения превышает время нагрева на 10 % (рис. 1, 4). С другой стороны, при снижении скорости газа до 0,75 м/с время нагрева возрастает на 79 %, а время охлаждения – на 30 %.

Таким образом, полученные результаты показывают, что снижение скорости является положительным фактором, позволяющим увеличить длительность подачи дутья.

Предложенная математическая модель [4] позволяет получать информацию о характере изменения средней температуры кирпича на выходе реге-

нератора на протяжении всего периода нагрева (охлаждения) (рис. 5).

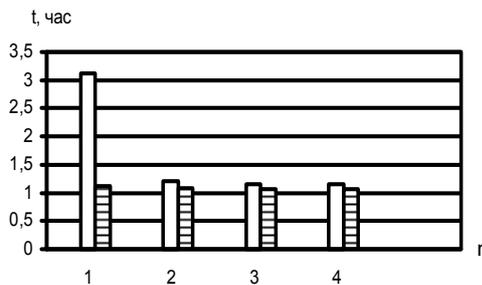


Рис. 3. Зависимость времени нагрева и охлаждения от номера периода n при длине теплообменника $l = 3$ м, скорости течения газа $V = 1$ м/с, толщине кирпича 60 мм: □ – нагрев; ▤ – охлаждение

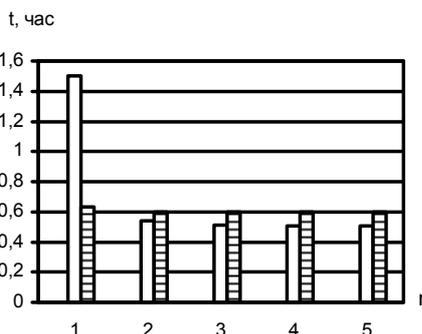


Рис. 4. Зависимость времени нагрева и охлаждения от номера периода n при длине $l = 3$ м, скорости газа $V = 1,25$ м/с, толщине кирпича 45 мм: □ – нагрев; ▤ – охлаждение

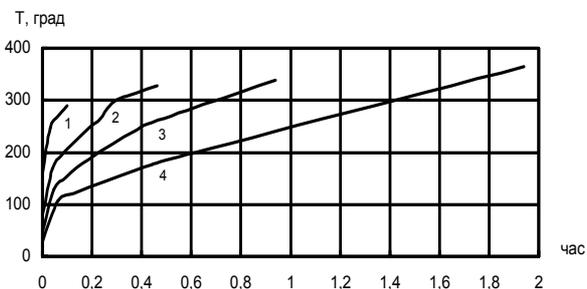


Рис. 5. Изменение средней температуры насадки при различной длине l теплообменника в периодическом режиме: 1 – $l = 2$ м; 2 – $l = 2,5$ м; 3 – $l = 3$ м; 4 – $l = 4$ м

Расчеты показывают, что с увеличением длины регенератора перепад температур между дымовыми газами и насадкой на выходе постепенно уменьшается, достигая такой величины (40°C), при которой продолжение дымового периода, согласно [5], нецелесообразно.

Увеличение длины регенератора с $l = 2$ м до $l = 4$ м позволяет повысить температуру кирпича на выходе примерно на 30 %, от 289°C при $l = 2$ м до 365°C при $l = 4$ м (рис. 6).

Кроме того, при увеличении длины теплообменного аппарата до $l = 4$ м максимальная температура подогрева воздуха в начале дутьевого периода повышается примерно на 50 % (рис. 7).

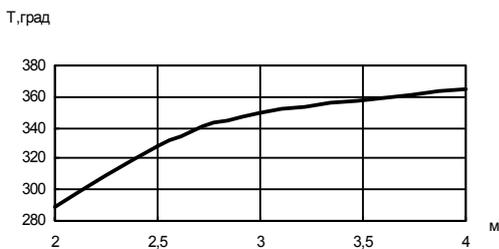


Рис. 6. Зависимость средней температуры насадки на выходе от длины теплообменника при скорости газа $V = 1$ м/с и толщине кирпича 45 мм

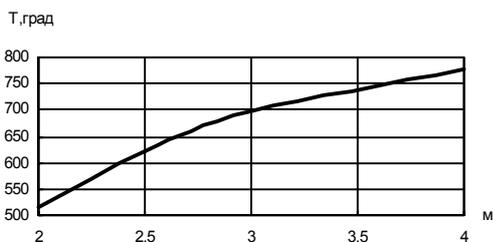


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры дутья от длины теплообменника при скорости газа $V = 1$ м/с и толщине кирпича 45 мм

По мере продвижения воздуха через насадку температура ее понижается, что влечет постепенное понижение температуры дутья. Разница температуры подогрева воздуха в начале и в конце дутьевого периода, в зависимости от длины регенератора, может достигать значительной величины. При $l = 2$ м эта разница составляет 64°C , а при $l = 4$ м возрастает до 326°C (рис. 8).

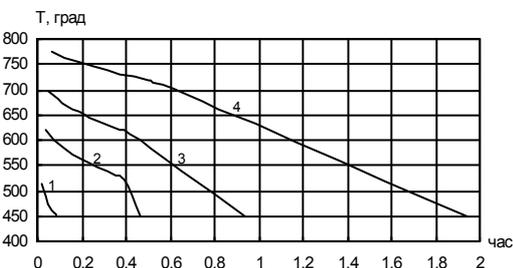


Рис. 8. Изменение средней температуры воздуха на выходе из шахты при различной длине l теплообменника в периодическом режиме: 1 – $l = 2$ м; 2 – $l = 2,5$ м; 3 – $l = 3$ м; 4 – $l = 4$ м

Таким образом, увеличение длины регенеративного воздухоподогревателя позволяет повысить максимальную температуру дутья в начале воздушного периода.

Увеличить максимальную температуру подогрева воздуха в начале дутьевого периода позволяет также уменьшение скорости подачи газа. При ее уменьшении на 25 % начальная максимальная температура дутья увеличивается на 60°C (рис. 9).

С другой стороны, при увеличении толщины кирпичной насадки на 25 % максимальная температура дутья уменьшается на 21°C , в то время как продолжительность дутьевого периода, как было сказано выше, возрастает на 25 %. Это связано с тем, что температура внутренних слоев кирпича при толщине насадки 45 мм несколько выше (\approx на 20°C) (рис. 10), чем при 60 мм (рис. 11).

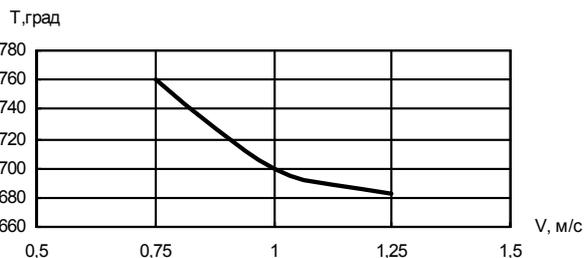


Рис. 9. Зависимость температуры дутья от скорости подачи газа при длине теплообменника $l = 3$ м и толщине кирпича 45 мм

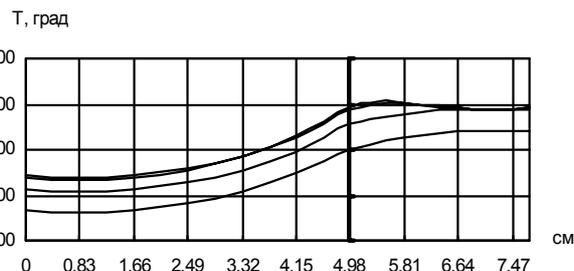


Рис. 10. Графики поперечного распределения температур в воздухе и насадке (45 мм) в середине секции при длине теплообменника $l = 3$ м, при скорости течения газа $V = 1$ м/с

С этой точки зрения рациональнее использовать тонкий кирпич и чаще выполнять перекидку клапанов. С другой стороны, тонкий кирпич аккумулирует меньшее количество тепла, процесс падения температуры воздуха будет идти быстрее и время подачи дутья будет сокращаться.

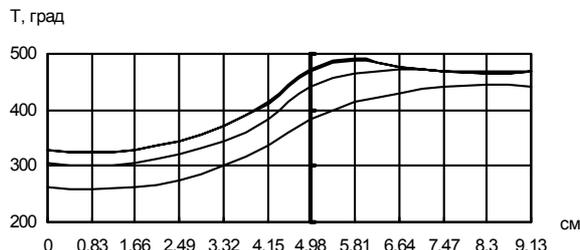


Рис. 11. Графики поперечного распределения температур в воздухе и насадке (60 мм) в середине секции при длине теплообменника $l = 3$ м, при скорости течения газа $V = 1$ м/с

Заключение

Переходной процесс как таковой в теплообменнике данного типа практически отсутствует, за исключением первого периода нагрева, который может превышать период нагрева в установившемся режиме более чем в три раза.

В целях увеличения длительности дутьевого периода и повышения максимальной температуры подогрева воздуха целесообразно:

- 1) увеличивать длину регенеративного воздухоподогревателя;
- 2) уменьшать скорость подачи газа при прохождении его через насадку;
- 3) увеличивать толщину огнеупора, что позволяет повысить продолжительность подачи дутья при незначительном уменьшении максимальной температуры воздуха в начале дутьевого периода.

Список литературы

1. **Хаузен Х.** Теплопередача при противотоке, прямо-токе и перекрестном токе: Пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Лемлех И.М., Гордин В.А.** Высокотемпературный нагрев воздуха в черной металлургии. – М.: Металлургиздат, 1963.
3. **Расчет** нагревательных и термических печей / Под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983.
4. **Кадников С.Н., Ометова М.Ю.** Математическое моделирование процессов теплообмена в регенеративном воздухоподогревателе // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 5.
5. **Теплотехнические** расчеты металлургических печей / В.Ф. Зобнин, М.Д. Казаев. Б.И. Китаев и др. – М.: Металлургия, 1982.

Кадников Сергей Николаевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники и электротехнологии,
телефон (4932) 26-99-03,
e-mail: kadnikovsn@mail.ru

Ометова Мария Юрьевна,
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет,
кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и водоснабжения,
телефон (4932) 47-20-13,
e-mail: ometova_m@rambler.ru