

05.16.02 ЭК

Ш329

В.С.Шашкин.

На правах рукописи

Шашкин Владимир Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК

Специальность 05.16.02 – "Металлургия черных, цветных и редких
металлов"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

к.т.н.

Челябинск 2001

Читальный зал
«Профессорский»

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук,
заслуженный деятель науки и техники
Российской Федерации,
профессор Торопов Е.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Боковиков Борис Александрович;
кандидат технических наук
Зырянов Сергей Владимирович.

Ведущая организация – ВНИИМТ (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится 3 октября 2001 г., в 14⁰⁰ часов,
на заседании диссертационного совета Д212.298.01 по присуждению
ученых степеней в Южно-Уральском государственном университете по
адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-
Уральского государственного университета.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим
выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, ученый совет, тел.39-91-23.

Автореферат разослан 30 августа 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Мирзаев Д.А.

Актуальность работы. Проблема рационального и эффективного использования топливно-энергетических ресурсов является одной из важнейших. Стремление экономить энергию и материалы, учет экономических обстоятельств, стимулируют создание более эффективного теплообменного оборудования.

Конструкция и эксплуатационная надежность регенеративных воздухо-нагревателей доменных печей играют существенную роль в эффективности всего доменного передела, так как эффективность доменной плавки в значительной степени зависит от температуры нагретого дутья. Снижение экономических затрат, повышение температур нагрева газа предъявляет высокие требования к надежности и экономичности работы этих устройств, выдвигает задачи разработки новых, более эффективных конструкций. Повышение эффективности работы регенеративных теплообменников во многом связано с усовершенствованием теплогидравлических характеристик аппаратов, в связи с чем возникает необходимость в методах предварительного определения этих характеристик.

Для достижения этих целей известные научные положения недостаточны, и требуется их дальнейшее развитие и уточнение, это возможно при использовании методов математического моделирования. Математические модели, позволяют определять и прогнозировать теплогидравлические характеристики аппаратов, используемые на стадии проектирования для получения предварительной информации о свойствах проектируемой системы, а так же для оценки эффективности работы регенераторов в процессе эксплуатации. Проведение многочисленных экспериментов достаточно дорого и трудоемко, поэтому возрастает роль расчетно-теоретических исследований параметров рабочих процессов в регенеративных теплообменных аппаратах. Таким образом, в связи с требованиями практики проектирования и эксплуатации регенераторов, задачи разработки математических моделей регенеративных теплообменных аппаратов и исследование процессов в них методами математического моделирования с целью усовершенствования теплогидравлических характеристик являются актуальными.

Целью работы является исследование процессов регенеративных теплообменных аппаратов методом математического моделирования течения несжимаемой среды на системе последовательно параллельных каналов, разработка методов предварительного определения теплогидравлических характеристик каналов регенеративных теплообменных аппаратов, анализ и выработка мероприятий, позволяющих повысить эффективность работы регенераторов.

Задачи исследований

- Провести анализ оценок эффективности работы теплообменных аппаратов и методов интенсификации процессов теплообмена.
- Разработать математическую модель течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов для расчета распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменного аппарата.
- Применить математическую модель для определения теплогидравлических характеристик канала переменного сечения при наличии турбулизирующих элементов для случая насадки с горизонтальными каналами.
- Осуществить численную реализацию модели течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов, провести теоретический анализ результатов моделирования течения теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменника.

Научная новизна

- Разработана модель гидравлического расчета стационарного состояния многоканальной циркуляционной системы последовательно-параллельных каналов произвольной заданной структуры с автоматизированным отображением структуры системы, для расчетного анализа течения теплоносителя по насадке с горизонтальными проходами регенеративного теплообменника.
- Найдено распределение теплоносителя по насадке с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменного аппарата, расчетным путем, модель расчета распределения потоков теплоносителя применена к исследованию насадок регенеративных теплообменных аппаратов с различными режимами работы, при различных конструктивных параметрах, а также для моделирования локальных выходов из строя. Насадка исследуется в объеме как сложная система соединения каналов.
- Расчет потоков теплоносителя позволил применить математическую модель для определения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления канала переменного сечения при наличии турбулизирующих элементов в насадке с горизонтальными каналами.
- Исследовано влияние горизонтальных перетоков в насадке с горизонтальными проходами регенератора на величину неравномерности распределения теплоносителя по сечению насадки, высоту слоя насадки, на котором происходит перераспределение теплоносителя и выравнивание его потоков по сечению насадки. гидравлическое сопротивление насадки
- Исследовано распределение потоков теплоносителя при блокировке каналов насадки с горизонтальными проходами регенератора. показана роль гори-

зонтальных проходов, работа соседних с заблокированным каналов, оценено изменение поверхности теплообмена при этом.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов для расчета распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами регенератора.
2. Алгоритм и численная реализация модели гидравлического расчета стационарного состояния многоканальной циркуляционной системы последовательно-параллельных каналов произвольной заданной структуры с автоматизированным отображением структуры системы, в результате расчета определяются давление на входе и выходе каждого канала, массовый расход в каждом канале системы.
3. Применение математической модели для определения теплогидравлических характеристик канала переменного сечения при наличии турбулизирующих элементов для случая насадки с горизонтальными каналами.
4. Результаты математического моделирования распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами регенератора.
5. Рекомендации позволяющие повысить эффективность работы и живучесть насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменника.

Практическая ценность работы

Математическая модель течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов позволяет рассчитать распределение потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменного аппарата и использовать результаты расчетов на стадии проектирования новых насадок, для получения предварительной информации о свойствах проектируемой системы, исследования процессов в насадке, выработки путей конструирования новых насадочных элементов. Результаты расчета потоков теплоносителя по насадке используются для определения теплогидравлических характеристик канала насадки с горизонтальными проходами. Это дает возможность упростить и ускорить решение задачи по разработке новых рациональных конструкций теплообменных аппаратов. Математическая модель течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов может использоваться для анализа работы насадок доменных воздухонагревателей, более точной оценки их эффективности. Использование результатов работы позволяет повысить эффективность работы регенеративных воздухонагревателей доменных печей, что уменьшит затраты на производство чугуна.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на седьмой межвузовской конференции "Математическое моделирование и

"краевые задачи" (г. Самара, 1997г.), всероссийской научно-технической конференции "Энергетики и металлурги настоящему и будущему России" (г. Магнитогорск, 1998г.), восьмой научной межвузовской конференции "Математическое моделирование и краевые задачи" (г. Самара, 1999г.), международной конференции, посвященной 300-летию металлургии Урала, 80-летию металлургического факультета и кафедры "Теплофизика и информатика в металлургии" "Теплофизика и информатика в металлургии: достижения и проблемы" (г. Екатеринбург, 2000г.), а так же на ежегодных научно-технических конференциях в Южно-Уральском Государственном Университете в период с 1997-2000гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения изложенных на 168 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц, 36 рисунков и список использованной литературы, содержащий 84 наименования.

Содержание работы

* Во Введении обоснована актуальность темы работы и определены основные направления исследования.

В первой главе проведен анализ оценок эффективности работы теплообменных аппаратов, который показал, что наиболее сложным с точки зрения изученности и учета при оценке эффективности регенеративных теплообменных аппаратов, к которым относятся доменные воздухонагреватели, является неравномерность распределения газовоздушных потоков по его насадке. Наличие неравномерности в распределении газовых и воздушных потоков по насадке регенеративного теплообменного аппарата является одним из наиболее важных факторов, определяющих условия его тепловой работы и технико-экономических показателей. Неучет этого явления может привести к ошибкам в определении эффективности теплообменника.

Анализ показал, что для более точной и объективной оценки эффективности регенеративного теплообменного аппарата необходим расчет потоков теплоносителя в каналах насадки регенератора, чтобы определить распределение теплоносителя по насадке, какая часть каналов работает в расчетном режиме, а в каких расход теплоносителя больше или меньше расчетного, как изменится размер поверхности теплообмена при блокировке каналов.

В рассмотренных экспериментальных работах установлена значительная неравномерность в распределении газовоздушных потоков по насадке регенеративного воздухонагревателя доменных печей. Уменьшение этой неравномерности возможно двумя путями: за счет элементов конструкции воздухонагревателя и созданием горизонтальных проходов в насадке.

Наличие перетоков по горизонтальным проходам позволяет сгладить неравномерность в распределении газовоздушных потоков по насадке воздухонагревателя создаваемую и участками прымыкания, и самой насадкой при блокировке части каналов, но требует более детального изучения. Распределение потоков по каналам насадки с горизонтальными проходами до сих пор не удавалось рассчитать. Нужна специальная методика расчета, так как экспериментально получить необходимые данные сложно.

Во второй главе проведен анализ методов интенсификации процессов теплообмена, который позволил определить основные направления по повышению эффективности работы поверхностей нагрева, а также уровень их теоретической проработки и практического применения.

Рассмотрены методы повышения эффективности работы поверхностей нагрева для случая высокотемпературных регенеративных аппаратов. Из проведенного анализа теоретических и экспериментальных работ по изучению возможностей интенсификации конвективного теплообмена в каналах различной формы в применении к регенеративным воздухонагревателям следует, что конструирование новых форм насадок производится в основном опытным путем, что требует существенных затрат на экспериментальное определение гидравлических и тепловых характеристик. Определение оптимальной формы каналов затрудняет отсутствие надежных методов предварительного определения процессов происходящих в насадке регенеративного теплообменного аппарата.

Из рассмотренных работ следует, что применение горизонтальных проходов в насадках очень эффективно, они увеличивают относительную поверхность нагрева, предупреждают потери этой поверхности из-за случайных местных перекрытий каналов насадки, повышают турбулизацию и интенсификацию теплообмена. Следует отметить, что распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами не исследовалось, и при выборе размеров горизонтальных проходов не учитывалось влияние величин перетоков образуемых ими на эффективность работы насадки.

Для более детального изучения процессов происходящих в насадках с горизонтальными проходами, разработки новых эффективных насадок, необходимо рассмотреть, как теплоноситель распределяется по каналам, как используется поверхность теплообмена горизонтальных каналов, в какой мере она компенсирует при блокировках поверхность перекрытых основных вертикальных каналов. Оценить роль горизонтальных каналов в перераспределении теплоносителя по насадке при неравномерности потока на входе в насадку, и при блокировках каналов. Рассмотреть процессы в каналах с учетом горизонтальных перетоков теплоносителя.

Исследовать данные моменты возможно при расчете распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными каналами регенеративного теплообменного аппарата.

В третьей главе представлена математическая модель течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов для расчетного анализа течения теплоносителя по насадке с горизонтальными проходами регенеративного теплообменного аппарата.

Насадки регенеративных теплообменников характеризуются сложностью и многообразием структур, а распределение газовых и воздушных потоков зависит как от конструкции элементов теплообменников, так и от режимов движения газов. Вследствие этого реализован подход расчета течений теплоносителей в системе последовательно-параллельных каналов с автоматизированным отображением структуры системы, состоящей из определенного набора типовых элементов. Он более прост по сравнению с существующими методами моделирования и анализа процессов в сложных тепло-гидродинамических системах, но при этом позволяет эффективно исследовать многоканальные системы.

- Реализация подобного подхода в виде прикладной программы позволяет создать универсальный инструмент анализа течений теплоносителей в системах каналов произвольной заданной структуры. Поэтому для расчетного анализа течения теплоносителя по насадке с горизонтальными проходами регенеративного теплообменника, была построена вычислительная модель гидравлического расчета стационарного состояния многоканальной циркуляционной системы последовательно-параллельных каналов произвольной заданной структуры с автоматизированным отображением структуры системы.

При строгом рассмотрении системы дифференциальных уравнений гидродинамического и теплового пограничных слоев уравнения конвективной теплоотдачи и температурного поля потока в канале, с одной стороны, связаны с уравнениями движения и сплошности, с другой, нелинейными членами, содержащими проекции вектора скорости потока, умноженными на градиент температуры текучей среды. Эта нелинейность делает невозможным интегрирование системы чисто аналитическими методами. Рациональным можно считать подход, позволяющий раздельное рассмотрение на некотором этапе дифференциальных уравнений гидродинамического и теплового пограничных слоев, что позволяет решать гидродинамические задачи в условиях изотермического или слабоизотермического течения.

Строгий анализ влияния неизотермичности потока среды при течении по системе каналов возможен на основе решения системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, включающей уравнения теплоотдачи,

энергии, движения и неразрывности. Причем при определении числа Эйлера в уравнениях движения необходимо учитывать фактическое распределение температуры в потоке среды, описываемое уравнением энергии. Решение задачи такого рода даже в численном или приближенном виде представляет значительные трудности при большом разнообразии различных форм насадок воздухонагревателей. Поэтому представляется целесообразным разработать приближенную методику оценки на основе общих представлений о гидравлическом сопротивлении каналов, где среда считается несжимаемой.

Произведена оценка влияния неизотермичности потока на течение в каналах. При неизотермическом течении среды через насадку общий коэффициент сопротивления может быть представлен в виде суммы изотермического коэффициента $\xi_{\text{ш}}$ и поправки на неизотермичность $\Delta\xi$:

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho_{\text{ср}} w_{\text{ср}}^2} = \xi_{\text{ш}} + \Delta\xi,$$

где $\Delta\xi$, учитывает потери давления на ускорение (замедление) потока в пределах насадки вследствие уменьшения (увеличения) плотности рабочей среды,

$$\Delta\xi = 2(T_{\text{max}} - T_{\text{ср}})/T_{\text{ср}},$$

При нагреве среды в воздушный период работы насадки $\Delta\xi$, положительно, при охлаждении в газовый период $\Delta\xi$, отрицательно.

Суть математической модели в следующем:

Будем считать, что для каждого элемента и всей системы в целом заданы параметры, отражающие взаимодействие системы с окружающей средой, для каждого канала направление оси продольной координаты выбрано совпадающим с направлением потока теплоносителя. Примем, что элементами системы могут быть каналы, местные сопротивления и простые узлы соединения каналов.

Для моделирования стационарных процессов в каналах запишем систему одномерных уравнений неразрывности и сохранения количества движения в следующем виде:

$$\frac{dm}{dx} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left(P + \frac{m^2}{\rho F^2} \right) = - \frac{\tau_w P_w}{F}, \quad (2)$$

где m – массовый расход рабочего тела по каналу, P – давление, ρ – плотность, F – площадь поперечного сечения канала, P_w – периметр, τ_w – касательное напряжение трения на стенке в согласованных размерностях.

Система уравнений (1),(2) дополняется замыкающей зависимостью по трению:

$$\tau_n = \xi \frac{m^2}{\rho F^2}, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Для простого узла соединения каналов будем иметь соотношения, соответствующие закону сохранения массы и условия равенства давлений в узле:

$$\sum \dot{m}_j(x_j = L_j) - \sum \dot{m}_i(x_i = 0) = 0, \quad (4)$$

$$P_j(x_j = L_j) = P_i(x_i = 0) = idem, \quad (5)$$

где \dot{m}_j , P_j – массовый расход и давление теплоносителя в j -м подводящем канале, \dot{m}_i , P_i – массовый расход и давление теплоносителя в i -м отводящем канале.

Для местных сопротивлений считается, что их гидросопротивление зависит от расхода и давления в начальных сечениях, закон сопротивления принят квадратичным. Без ущерба для общности будем считать, что местное сопротивление типа дроссельной шайбы является простым узлом, соединяющим j -й подводящий и i -й отводящий каналы. Уравнения, описывающие процессы на дроссельной шайбе, имеют следующий вид:

$$\dot{m}_j(x_j = L_j) = \dot{m}_i(x_i = 0), \quad P_j(x_j = L_j) - P_i(x_i = 0) = \Delta P_m(\dot{m}_j, P_j). \quad (6)$$

Соотношения (4)-(6) представляют собой внутренние граничные условия – уравнения, отражающие взаимодействие процессов в каналах. Для описания взаимодействия системы с окружающей средой требуется задание краевых условий на входе и выходе системы, т. е. для тех точек, где газ поступает в систему и выходит из нее (подводящие и отводящие устройства).

Для входного сечения n -го подводящего канала будем иметь:

$$P_{nn} = \text{const}, \quad P_{nn} - P_n(x_n = 0) = \Delta P_{nn}(\dot{m}_n, P_n). \quad (7)$$

В свою очередь, для k -го, отводящего канала:

$$P_{kk} = \text{const}, \quad P_k(x_k = L_k) - P_{kk} = \Delta P_{kk}(\dot{m}_k, P_k). \quad (8)$$

Соотношения типа (7),(8) должны быть записаны для всех подводящих и отводящих магистралей, которых может быть в общем случае несколько.

Гидравлические характеристики местных и концевых сопротивлений примем квадратичными:

$$\Delta P = K \frac{m^2}{\rho F^2}, \quad (9)$$

где K – коэффициент потерь.

Представленные уравнения и соотношения, записанные для каждого элемента системы, образуют замкнутую модель стационарного состояния системы.

Модель стационарного режима системы представляет собой нелинейную краевую задачу. Для ее решения необходимо построить сходящийся итерационный вычислительный процесс.

Применяя к уравнениям (1),(2) процедуру квазилинейаризации и дополняя их релаксационными членами, получим:

$$\frac{P^{n+1} - P^n}{t} + \frac{d\bar{m}^{n+1}}{dx} = 0, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\bar{m}^{n+1} - \bar{m}^n}{t} + \frac{dP^{n+1}}{dx} \right) \left(1 - \frac{m^2}{\rho F^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)^n + \left(\frac{dP}{dx} \frac{2\bar{m}}{\rho F^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)^n (\bar{m}^n - \bar{m}^{n+1}) = \\ & = - \left(\frac{\xi \Pi_{\infty}}{8\rho F^4} \right)^n (2\bar{m}^n \bar{m}^{n+1} - \bar{m}^{n+2}) \end{aligned} \quad (11)$$

где индекс n означает номер итерации, а t – релаксационный параметр.

Для автоматизированного построения модели стационарного режима введем вектор состояния Y :

$$Y = [P_1^{n+1}, \dots, P_N^{n+1}, \bar{m}_1^{n+1}, \dots, \bar{m}_N^{n+1}]^T, \quad (12)$$

где N – число каналов в системе. Тогда совокупность уравнений (10),(11) может быть записана в следующей матричной форме:

$$\frac{dY}{dx} = \Theta Y + \Phi, \quad (13)$$

где матрица Θ размером $2N \times 2N$ и вектор Φ строятся из коэффициентов уравнений (10),(11). Таким образом, в Θ и Φ входят параметры только с n -й итерации, следовательно, система уравнений (13) является линейной относительно компонент вектора Y .

Линеаризация краевых условий дает следующие соотношения:

– для простого узла соединения каналов

$$\sum m^{n+1}(x_i = L_j) - \sum m^{n+1}(x_i = 0) = 0, \quad P_i^{n+1}(x_i = L_j) = P_i^{n+1}(x_i = 0) = \text{idem}, \quad (14)$$

– для местного сопротивления

$$m^{n+1}(x_i = L_j) - m^{n+1}(x_i = 0), \quad (15)$$

$$P_i^{n+1}(x_i = L_j) - P_i^{n+1}(x_i = 0) - \left(\frac{2Km}{\rho F^2} \right)_{x_i=L_j} \quad m^{n+1}(x_i = L_j) = - \left(\frac{Km^2}{\rho F^2} \right)_{x_i=L_j};$$

– для входного подводящего канала

$$P_i^{n+1}(x_i = 0) + \left(\frac{2Km}{\rho F^2} \right)_{x_i=0} \quad m^{n+1}(x_i = 0) = P_{\infty} + \left(\frac{Km^2}{\rho F^2} \right)_{x_i=0}; \quad (16)$$

– для выходного отводящего канала

$$P_i^{n+1}(x_i = L_j) - \left(\frac{2Km}{\rho F^2} \right)_{x_i=L_j} \quad m^{n+1}(x_i = L_j) = P_{\infty} - \left(\frac{Km^2}{\rho F^2} \right)_{x_i=L_j}; \quad (17)$$

Таким образом, после линеаризации совокупность краевых условий для циркуляционной многоканальной системы, состоящей из указанных выше элементов, может быть представлена в следующей матричной форме:

$$B^*Y^{*-1}(x_1 = 0) + C^*Y^{*-1}(x_k = L_k) = D^*, \quad (18)$$

где B и C – матрицы размерностью $2N \times 2N$, а D – вектор-столбец, содержащий $2N$ элементов. Матрицы B , C , D формируются на основе соотношений (14)–(17) с учетом конкретной заданной структуры системы, стационарное состояние которой требуется определить.

Решение краевой задачи (13), (18) до достижения сходимости итерационного процесса даст искомый набор параметров (давление, массовый расход) стационарного состояния системы. Данное решение получено на основе метода прогонки (сведения к задаче Коши).

Матрицы B , C , D содержат всю информацию о структуре системы. Таким образом, автоматизированное построение вычислительной модели стационарного состояния сводится к формированию указанных матриц по специальному алгоритму.

Каждое из соотношений (14)–(17) можно представить в матричной форме:

$$\tilde{B}_j Y^{*-1}(x_1 = 0) + \tilde{C}_j Y^{*-1}(x_k = L_k) = \tilde{D}_j, \quad (19)$$

где j – номер узла системы. Каждая из матриц \tilde{B}_j , \tilde{C}_j имеет $2N$ столбцов и M строк. Вектор \tilde{D}_j имеет M строк, где M – число краевых условий, порождаемых данным элементом. Формирование этих матриц производится в соответствии со структурой соотношений (14)–(17).

Заполнение матриц B , C , D из (18) производится по блочному принципу подобно схеме:

$$B = \left| \begin{array}{c|c|c} \tilde{B}_1 & \cdots & \tilde{B}_k \\ \hline \tilde{B}_1 & \cdots & \tilde{B}_k \\ \hline \tilde{B}_k & \cdots & \tilde{B}_k \end{array} \right|, \quad C = \left| \begin{array}{c|c|c} \tilde{C}_1 & \cdots & \tilde{C}_k \\ \hline \tilde{C}_1 & \cdots & \tilde{C}_k \\ \hline \tilde{C}_k & \cdots & \tilde{C}_k \end{array} \right|, \quad D = \left| \begin{array}{c|c|c} \tilde{D}_1 & \cdots & \tilde{D}_k \\ \hline \tilde{D}_1 & \cdots & \tilde{D}_k \\ \hline \tilde{D}_k & \cdots & \tilde{D}_k \end{array} \right|,$$

где k – число узлов в системе.

Для реализации метода прогонки задача (13), (18) сведена к задаче

$$\frac{dY}{dx} = AY, \quad (20)$$

$$B^*Y^{*-1}(x_1 = 0) + C^*Y^{*-1}(x_k = L_k) = D^*.$$

Для этого вектор $Y = [P_1^{*-1}, \dots, P_k^{*-1}, m_1^{*-1}, \dots, m_k^{*-1}]^T$ дополняется еще одной компонентой y_{2N+1} , система дифференциальных уравнений (13) – уравнением:

$\frac{\Phi_{N+1}}{dx} = 0$, матрица A – нулевой строкой, столбцом Φ и элементом $a_{2N+1, 2N+1} = 0$, а краевые условия дополняются условием $y_{2N+1}(x_{2N+1}) = 1$.

Методом прогонки (сведением к задаче Коши) находится решение краевой задачи (20).

Данный метод отображения структуры системы и исследования течений теплоносителей в системе последовательно-параллельных каналов принципиально предполагает возможность модернизации. Применение новой модели соединительного элемента приведет к коррекции элементов матриц краевых и внутренних граничных условий, тогда как общий алгоритм останется прежним. Тем самым, повышается область исследуемых систем.

Описанная выше методика, позволяет моделировать процессы в различных типах насадок регенеративных теплообменных аппаратов при различных режимах. Насадка представляется как система каналов соединенных между собой определенным образом, в зависимости от ее конструкции.

Разработан алгоритм, на основе которого создана прикладная программа, позволяющая определять параметры (величину массового расхода теплоносителя в каналах, направление его течения, давление в каналах) стационарного состояния системы каналов произвольной заданной структуры и оперативно исследовать, как всю систему в целом, так и отдельные ее подсистемы на этапе проектирования и в процессе эксплуатации.

Разработаны схемы моделирования распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменника, при наличии неравномерного поля давления на входе в насадку и засорения каналов (локальный выход из строя насадки). Неравномерность распределения давления по каналам на входе в насадку задаются согласно экспериментальным данным, либо согласно какому-либо закону распределения.

По разработанной программе были произведены тестовые расчеты небольших систем, состоящих из одного, двух, трех и четырех каналов. Полученные результаты расчетов полностью соответствуют результатам расчета по справочнику по гидравлическим сопротивлениям Идельчика И.Е.

В четвертой главе рассмотрена математическая модель численного эксперимента "зависимость $\alpha_{\text{ком}}$ и ξ от формы канала" и возможность ее применения к насадкам с горизонтальными проходами.

Математическая модель течения в системе последовательно-параллельных каналов позволяет смоделировать течение потоков теплоносителя в насадке с горизонтальными проходами регенеративного теплообменного аппарата, что дает общую картину распределения газовых потоков в каналах насадки по все-

му объему насадки. Результаты расчета давлений и массовых расходов теплоносителя в каналах насадки с горизонтальными проходами могут использоватьсь для определения теплогидравлических характеристик каналов насадки.

Проведен анализ существующих моделей для определения теплогидравлических характеристик канала переменного сечения при наличии турбулизирующих элементов в применении к насадкам с горизонтальными проходами. Обоснован выбор модели для определения теплогидравлических характеристик каналов насадок регенераторов.

Математическая модель для определения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления канала переменного сечения при наличии турбулизирующих элементов применена для случая насадки с горизонтальными каналами. При решении системы уравнений, используемой для определения теплогидравлических характеристик каналов, произведен учет изменения массового расхода по длине вертикального канала от перетоков, образуемых горизонтальными проходами. Величина массового расхода по длине вертикального канала в данном случае находится по математической модели течения в системе последовательно-параллельных каналов.

Система уравнений, используемая для определения теплогидравлических характеристик каналов, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_y) = 0,$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial P}{\partial y} \left((\mu + \mu_r) \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x},$$

$$\rho u_x \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = u_x \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + \lambda_r) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + (\mu + \mu_r) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2.$$

Турбулентная структура потока рассчитывается на основе дифференциальных уравнений для кинетической энергии E и масштаба турбулентности L :

$$\rho \left(u_x \frac{\partial E}{\partial x} + u_y \frac{\partial E}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + c_r \mu_r) \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{u_x}{\partial y} \right)^2 - \frac{c_r (\mu + c_r \mu_r)}{E} E,$$

$$\rho \left(u_x \frac{\partial L}{\partial x} + u_y \frac{\partial L}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + c_r \mu_r) \frac{\partial L}{\partial y} \right) - c_r \frac{L}{E} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + B c_r \sqrt{E} \rho \left(1 - \frac{L}{(R-r)^2} \right) - \mu_r \frac{\partial L}{\partial x}.$$

$$\frac{\mu_r}{\mu} = \alpha Re, \quad \delta_1 = \exp(\delta_1, Re^2) + \delta_2 \sqrt{Re} \exp(\delta_2, Re^2),$$

$$\alpha = 0.2, \quad \delta_1 = 4 \cdot 10^{-4}, \quad \delta_2 = 2.1 \cdot 10^{-4}, \quad \delta_3 = 2 \cdot 10^{-5},$$

$$Re_c = \frac{\rho \sqrt{EL}}{\mu}, \quad \lambda_r = \mu, c_r, \Pr_r^{-1}, \quad \Pr_r^{-1} = \left[\left(\frac{\mu}{\mu_r} \right)^2 / (2\delta_1 \Pr_r)^2 + \left(1 + \left(\frac{\mu}{\mu_r} \right)^2 \delta_2 \right) / \delta_1^2 \right]^{1/2} = \frac{\mu}{\mu, 2\delta_1 \Pr_r}$$

где u_x, u_y – составляющие скорости, $\mu, \lambda, \mu_t, \lambda_t$ – соответственно динамическая вязкость, теплопроводность газа и турбулентные (вихревые) вязкость, теплопроводность

$$c_1 = 0.4, \quad c_2 = 3.93, \quad B = c_4 + \frac{c_7}{Re}, \quad c_3 = 0.37, \quad c_4 = 0.01, \quad c_5 = 0.29, \quad c_6 = 0.3, \quad c_7 = 0.215.$$

Границные условия:

$$x = 0, \quad u_x = U_0, \quad P = P_0, \quad T = T_0, \quad E = E_0.$$

$$y = h(x), \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial E}{\partial y} = \frac{\partial L}{\partial y} = 0, \quad u_y = 0$$

$$y = 0, \quad u_x = u_y = L = E = 0, \quad T = T_\infty.$$

В пятой главе приведены результаты численного моделирования распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменника и проведен их теоретический анализ.

Математическая модель расчета потоков в системе каналов произвольно заданной структуры применена к расчету потоков теплоносителя по каналам насадки доменного воздухонагревателя с горизонтальными каналами. Моделировались случаи работы насадки при наличии неравномерности потока на входе в насадку и частичной или полной блокировке каналов насадки.

В качестве моделируемых были взяты насадки с различной формой каналов, с ячейками 45×45 мм с одинаковыми горизонтальными проходами в углах каналов. Насадка была представлена как последовательно-параллельное соединение каналов. В качестве теплоносителя рассматривался воздух.

Моделирование неравномерности потока на входе в насадку было проведено при различных полях давления на входе в насадку с горизонтальными каналами. Исследовалась неравномерность распределения потоков по вертикальным каналам в каждом горизонтальном слое, изменение расходов в горизонтальных каналах по высоте насадки, влияние геометрических размеров.

Показано растекание теплоносителя по фронту насадки.

Изучена зависимость высоты слоя, на котором происходит перераспределение потоков теплоносителя по каналам, при неравномерности потока теплоносителя на входе в насадку, от величины соотношения пропускной способности горизонтальных каналов и вертикальных, роль горизонтальных проходов в процессе теплообмена в этом случае. Перераспределение потоков теплоносителя по каналам заканчивается уже в самых первых слоях насадки. Далее же по высоте насадки, после выравнивания, через горизонтальные проходы расход теплоносителя незначительный, и они играют лишь роль турбулизаторов. То есть, горизонтальные каналы не участвуют активно в процессе теплообмена и, следовательно, эффективная площадь теплообмена насадки с горизонтальными

0400070

каналами меньше площади подобной насадки без них на сумму диаметров не работающих горизонтальных каналов. Поэтому с точки зрения преодоления эффекта неравномерности распределения потоков теплоносителя на входе в насадку, представляется более эффективным делать горизонтальные каналы не по всей высоте насадки, а только в ее верхних и нижних слоях.

Показана зависимость между неравномерностью распределения потоков в вертикальных каналах на входе в насадку и высотой слоя, на котором происходит перераспределение теплоносителя в горизонтальной плоскости при изменении величины горизонтальных перетоков. Показан эффект влияния соседних вертикальных каналов на расходы теплоносителя друг в друге за счет их соединения в единую систему горизонтальными каналами, в зависимости от неравномерности потока теплоносителя на входе в насадку, перепада давления по высоте насадки, конструктивных параметров.

Чем больше горизонтальные перетоки, тем быстрее газ из вертикальных каналов с большим давлением (расходом) перераспределится в вертикальные каналы с меньшим давлением (расходом) и произойдет выравнивание газовых потоков по насадке. Таким образом, увеличение пропускной способности горизонтальных каналов позволяет уменьшить высоту зоны перераспределения, тем самым большая часть насадки по высоте работает равномерно. Но слишком большое относительное увеличение пропускной способности горизонтальных каналов приводит к отрицательному эффекту – значительному увеличению неравномерности распределения теплоносителя по вертикальным каналам в первых слоях насадки. Расход на начальном участке насадки в вертикальных каналах с большим давлением на входе возрастет и будет выше расхода, который был бы при малых горизонтальных перетоках, а расход в вертикальных каналах с меньшим давлением на входе напротив будет на начальном участке меньше. При этом, если градиент давления на входе в насадку велик, перепад давления по высоте мал, диаметр горизонтальных каналов относительно большой, может возникнуть ситуация когда в каналах с меньшим давлением на входе теплоноситель будет течь в другую сторону. Начальные участки насадки (верх или низ насадки в зависимости от режима работы) будут работать с большой неравномерностью массовых расходов по вертикальным каналам, что негативно скажется на эффективности насадки. Возникнут термические напряжения, каналы будут менее эффективно участвовать в процессе теплообмена.

Установлено, что пропускная способность горизонтальных каналов влияет на гидравлическое сопротивление насадки с горизонтальными каналами. Расчеты показали, что увеличение горизонтальных перетоков увеличивает гидравлическое сопротивление насадки.

Использование математической модели течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов для расчетного анализа течения теплоносителя по насадке с горизонтальными проходами регенеративного теплообменника позволяет выбрать оптимальную величину горизонтальных перетоков при конструировании насадки.

Показано перераспределение потоков теплоносителя по рабочим каналам при обтекании места блокировки и течение теплоносителя до и после заблокированного места при засорении каналов насадки с горизонтальными проходами.

Результаты расчетов показали, что при засорении вертикальных каналов насадки с горизонтальными проходами теплоноситель проходит через горизонтальные каналы, и поверхность вертикального канала за местом засорения сохраняется для процесса теплообмена. В вертикальных каналах, соседних с заблокированным, наблюдается значительное колебание расхода по высоте. Это может привести к дополнительным термическим напряжениям в зоне блокировки.

Как показали расчеты, расход в вертикальных каналах, соседних с засоренными каналами, непосредственно за местом блокировки значительно падает. Происходит это в результате заполнения теплоносителем вертикальных каналов непосредственно за местом блокировки и инерционностью растекания теплоносителя по системе каналов. В результате, при работе доменного воздухонагревателя в вертикальных каналах, соседних с засоренными каналами, над местом блокировки расход воздуха в дутьевой период будет меньше чем расход продуктов горения газов в газовый период, в этом месте насадки будет происходить перегрев каналов. В вертикальных каналах непосредственно над местом блокировки наблюдается та же картина. Таким образом, в перечисленных каналах в результате засорения, будут происходить термические разрушения и можно предположить, что область дефекта насадки будет расширяться вверх в стороны. Чем дальше после возникновения блокировки канала продолжает работать насадка, тем большая ее часть разрушается и потребуется больше затрат на ремонт насадки. Во избежание этого можно предложить, исходя из статистических данных выходов насадок из строя, в местах наиболее частых блокировок каналов делать горизонтальные проходы более часто.

Расчеты потоков в каналах насадки с горизонтальными каналами позволяют определить, какая часть каналов работает в расчетном режиме, а в каких расход теплоносителя больше или меньше расчетного, как изменится размер поверхности теплообмена при блокировке каналов, в какой мере поверхность теплообмена горизонтальных каналов компенсирует неработающую поверхность теплообмена засоренных каналов за счет того, что теплоноситель при обтекании места блокировки течет по ним, то есть оценить размер поверхности теплообме-

на и ее изменение при блокировке каналов насадки с горизонтальными каналами.

Результаты математического моделирования потоков в системе каналов произвольно заданной структуры могут использоваться для анализа работы существующих насадок доменных воздухонагревателей, оценки их эффективности. Показана возможность проанализировать эффективность работы насадки с горизонтальными каналами при наиболее часто встречающихся в практике случаях блокировки каналов насадки.

Заключение

Перспективы использования в регенеративных воздухонагревателях доменных печей насадок с горизонтальными проходами потребовали создания математических моделей, позволяющих адекватно описывать протекающие в этих устройствах процессы. В диссертации дано новое решение задачи, имеющее существенное значение, позволяющее повысить эффективность работы воздухонагревателей, что уменьшит затраты на производство чугуна.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Проведен анализ оценок эффективности работы теплообменных аппаратов и методов интенсификации процессов теплообмена в регенеративных теплообменниках, который показал необходимость определения и исследования распределения теплоносителя по насадке регенеративного теплообменника.
2. Разработана модель гидравлического расчета стационарного состояния многоканальной циркуляционной системы последовательно-параллельных каналов произвольной заданной структуры с автоматизированным отображением структуры системы, которая используется для расчетного анализа течения теплоносителя по насадке с горизонтальными проходами регенеративного теплообменника.
3. Произведена оценка влияния неизотермичности потока на течение в каналах. При неизотермическом течении среды через насадку общий коэффициент сопротивления представлен в виде суммы изотермического коэффициента и поправки на неизотермичность, которая учитывает потери давления на ускорение (замедление) потока в пределах насадки вследствие уменьшения (увеличения) плотности рабочей среды.
4. Изложенная в диссертации модель расчета распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенератора, применена к исследованию насадок регенеративных воздухонагревателей доменных печей с различными режимами работы, при различных конструктивных параметрах, а также для моделирования локальных выходов из строя. Данная модель расчета системы каналов наиболее эффективна для исследования насадок, ввиду особенностей их конструкции, а именно большого числа каналов со-

единенных между собой в сложную систему.

5. Произведена численная реализация предложенной модели. В результате расчета определяются давление на входе и выходе каждого канала, массовый расход в каждом канале системы, а насадка исследуется в объеме.

6. Разработаны схемы моделирования распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменного аппарата, при наличии неравномерного поля давления на входе в насадку и засорения каналов (локальный выход из строя насадки).

7. Применение данного метода к расчету потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами регенеративного воздухонагревателя доменных печей, позволило рассчитать характеристики процессов в насадке при моделировании различных видов неравномерностей распределения потоков теплоносителя по насадке, встречающихся в практике эксплуатации подобных систем, а также проанализировать работу аппаратов при засорении каналов, то есть проследить перераспределение потоков теплоносителя по работающим каналам и определить в этом случае эффективную поверхность теплообмена.

8. Данный метод может быть использован на стадии проектирования для получения предварительной информации о свойствах проектируемой системы.

9. Математическая модель для определения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления канала переменного сечения при наличии турбулизирующих элементов применена для случая насадки с горизонтальными каналами. При решении системы уравнений, используемой для определения теплогидравлических характеристик каналов, произведен учет изменения массового расхода по длине вертикального канала от перетоков, образуемых горизонтальными проходами, вследствие неравномерностей образующихся на входе в насадку или ввиду блокировок. Величина массового расхода по длине вертикального канала в данном случае находится по математической модели течения в системе последовательно-параллельных каналов. Это повышает точность описания процессов, происходящих в насадке.

10. Математическая модель течения несжимаемой среды на системе последовательно-параллельных каналов для расчета распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменного аппарата рекомендуется для оценки эффективности работы регенераторов в процессе эксплуатации, а также вновь разрабатываемых.

11. Математическую модель расчета распределения потоков теплоносителя по каналам насадки с горизонтальными проходами, регенеративного теплообменного аппарата рекомендуется применять в учебной работе в курсе тепломассообменных установок и в курсе металлургической техники.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Королев А.Л., Вайчулис А.В., Шашкин В.Ю. Анализ устойчивости систем с распределенными параметрами произвольной структуры // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды седьмой межвузовской конференции. – Самара: Изд.СГТУ, 1997. – Ч.2. – С.56–57.
2. Шашкин В.Ю., Торопов Е.В. Разработка пакета прикладных программ автоматизированного анализа многоканальных систем энергетических установок произвольной заданной структуры // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.Н. Носова, 1998. – С.63–64.
3. Моделирование процессов многоканальных систем регенеративных теплообменников произвольной структуры. / Е.В. Торопов, В.Ю. Шашкин, И.В. Елюхина, С.Н. Редников // Математическое моделирование и краевые задачи: труды восьмой межвузовской конференции. – Самара: Изд.СГТУ, 1999. – Ч.2. – С.113–114.
4. Шашкин В.Ю., Торопов Е.В. Автоматизированный анализ многоканальных систем регенеративных теплообменников произвольной структуры // Литье и металлургия. – 1999. – №1. – С.52.
5. Шашкин В.Ю., Торопов Е.В. Влияние перетоков в каналах насадки на эффективность работы воздухонагревателя // Теплофизика и информатика в металлургии: достижения и проблемы: Материалы Международной конференции, посвященной 300-летию металлургии Урала, 80-летию металлургического факультета и кафедры "Теплофизика и информатика в металлургии". – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С.236–241.
6. Математическое моделирование течения газа в каналах насадок доменных воздухонагревателей. / С.Н. Редников, Е.В. Торопов, В.Ю. Шашкин, И.В. Елюхина // Теплофизика и информатика в металлургии: достижения и проблемы: Материалы Международной конференции, посвященной 300-летию металлургии Урала, 80-летию металлургического факультета и кафедры "Теплофизика и информатика в металлургии". – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С.242–244.
7. Шашкин В.Ю. Методика расчета течений в системе последовательно-параллельных каналов // Теплофизика и информатика в металлургии: достижения и проблемы: Материалы Международной конференции, посвященной 300-летию металлургии Урала, 80-летию металлургического факультета и кафедры "Теплофизика и информатика в металлургии". – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С.245–246.
8. Шашкин В.Ю., Торопов Е.В. Разработка пакета прикладных программ моделирования течения теплоносителей по насадке регенеративного теплообменного аппарата // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. В 11 частях. – Нижний Новгород: Изд.НГТУ, 2000. – Часть IX. – С. 16.

Шашкин Владимир Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных, цветных и редких
металлов"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 26.07.2001. Формат
60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 80 экз. Заказ 229/348.

УОП Издательства 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76..