

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В НАСАДКАХ ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

В.Ю. Шашкин

Рассмотрены варианты интенсификации конвективного теплообмена в каналах насадок доменных воздухонагревателей.

Ключевые слова: регенератор, конвективный теплообмен, насадка, каналы.

Важнейшим показателем совершенства высокотемпературного регенеративного теплообменного аппарата, является энергетическая (тепло-гидродинамическая) эффективность профиля рабочей поверхности каналов насадки, по которым движется рабочая среда. Энергетическая эффективность формы поверхности каналов, в конечном счете, определяет общие размеры поверхности теплопередачи в аппарате при заданной тепловой нагрузке, температурных и гидромеханических условиях его работы.

Существующие конструкции, применяемых в регенеративных воздухонагревателях, насадок и типы каналообразующих элементов определяют особенности при выработке наиболее рациональной формы канала насадки и путей интенсификации теплообмена. Насадка, собранная из отдельных элементов, должна выдерживать термические напряжения, не допускать

сколов и износа, быть технологичной при транспортировке и монтаже, а также допускать простые операции при изготовлении элементов в огнеупорном производстве.

На сегодняшний день существует несколько вариантов выполнения каналобразующих элементов, накладывающих определенные ограничения на форму каналов насадки: насадки с кирпичными каналобразующими элементами, насадки блочного типа, насадки с насыпными элементами, комбинированные виды насадок.

Широкое применение в насадках воздухонагревателей нашли каналы с гладкими стенками как квадратного, так и круглого сечения. К достоинствам каналов этого вида можно отнести простоту изготовления, наличие хорошо разработанных методов расчета теплообмена и гидравлических сопротивлений, а также невысокие значения коэффициента гидравлического сопротивления, характерные для каналов с гладкими стенками. Но эти каналы обеспечивают невысокие коэффициенты теплоотдачи. Температура нагрева дутья повышается в основном за счет увеличения поверхности нагрева насадки, это обуславливает значительные геометрические размеры данных аппаратов, при этом возрастает стоимость их сооружения и ремонта.

Уменьшение геометрических размеров насадки имеющей каналы с гладкими стенками возможно за счет уменьшения диаметра каналов насадки и создания развитой поверхности теплообмена. Обычно развитие поверхности достигалось за счет создания каналов с частыми вертикальными канавками, установкой в каналах вертикальных ребер, усложнением форм насадочного огнеупора, применением профилированных каналов с сечением типа звездочка, других многогранных сечений. В данных каналах площадь боковой поверхности в 2–4 раза больше, чем площадь боковой поверхности круглых каналов с тем же живым сечением. Но столь значительное увеличение поверхности теплообмена не сопровождается аналогичным ростом коэффициента теплоотдачи [1, 2]. В подобных каналах течение теплоносителя наиболее быстро развивается в зоне не загроможденного сечения канала, в зоне максимального удаления от каналобразующих элементов, как правило, в центре канала. При достаточно острых углах между гранями каналобразующих элементов, в зоне, где велико влияние пристеночных слоев, наблюдается более медленное развитие течения, зона ламинарного течения сохраняется при полной турбулизации потока в ядре канала. Причем при дальнейшем росте числа Re зона турбулентного течения увеличивается по направлению от ядра канала к периферии, ламинарное течение сохраняется в зонах между близко лежащими элементами поверхности, где наблюдается сильное влияние пограничных слоев.

С целью дальнейшего увеличения относительной поверхности нагрева, предупреждения потерь этой поверхности из-за случайных местных перекрытий каналов насадки, повышения турбулизации, интенсификации теп-

лообмена разработаны насадки с горизонтальными каналами [3]. Горизонтальные каналы позволяют также сгладить неравномерность потоков теплоносителя по каналам насадки, возникающую в результате неравномерности потока на входе в насадку. В них на расчетном режиме работы возможна организация направленного движения теплоносителя. Одним из путей организации движения в горизонтальных каналах может стать движение под воздействием перепада давлений в различных каналах в сечениях, находящихся на одном уровне. Кроме более эффективного использования поверхности теплообмена появится возможность управления режимом движения теплоносителя в вертикальных каналах путем отсоса газа и его вдува, но при этом значительно увеличится гидравлическое сопротивление насадки.

Повышение температуры нагрева дутья при сокращении габаритов насадки и одинаковых режимах работы воздухонагревателей, наиболее рационально и перспективно за счет интенсификации конвективного теплообмена в ее каналах. Установка в каналах насадки дополнительных турбулизирующих элементов значительно повышает значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией [1, 4]. Техничко-экономическое сравнение насадок для доменных воздухонагревателей, проведенное в работе [5], показало, что применение турбулизирующих элементов в насадках позволяет значительно сократить необходимую поверхность нагрева, объем и высоту насадочной камеры, а также общие габариты и расход материалов на сооружение воздухонагревателей. Но вместе с этим, увеличивается также гидравлическое сопротивление насадок воздухонагревателей, причем его увеличение опережает увеличение теплоотдачи конвекцией. Это, в свою очередь, увеличивает энергозатраты на дутье.

Интенсификация теплообмена турбулизацией потока достигается установкой турбулизирующих выступов, использованием в качестве каналобразующих элементов кирпичей различной толщины, что, в свою очередь, приводит к созданию каналов с резко изменяющимся переменным сечением. Эти мероприятия увеличивают турбулентность потока и коэффициент конвективной теплоотдачи. В чем-то аналогичный эффект может быть получен при выполнении горизонтальных ребер различного профиля. Расположение ребер может быть как осесимметричным так и не осесимметричным. Применение сильно стесняющих поток турбулизирующих выступов также приводит к росту коэффициента теплоотдачи. Несмотря на то, что предложено несколько десятков вариантов различного выполнения насадочного огнеупора, все эти варианты характеризуются увеличенными гидравлическими потерями. Как показали исследования, проведенные в работе [4], эти насадки, являясь эффективными с точки зрения сокращения необходимой поверхности нагрева, в то же время имеют большие гидравлические сопротивления.

Варьированием формы, размеров, взаимного расположения турбулизирующих элементов, возможно несколько уменьшить гидравлическое сопротивление каналов. Придаaniem турбулизирующим выступам более удобной обтекаемой формы, можно добиться некоторого снижения сопротивления без заметного снижения коэффициента теплоотдачи [6].

В насадках с турбулизирующими элементами, изменяющими живое сечение насадок (ступеньки, выступы), увеличение числа турбулизирующих элементов является эффективным до известных пределов. В работе [1] установлено, что при сильном уменьшении значения шага турбулизирующих элементов, гидравлическое сопротивление насадок возрастает в значительно большей степени, чем коэффициенты теплоотдачи конвекцией. Однако, уменьшение шага до минимальных значений, имевших место в исследовании [1], является рациональным, так как не сопровождается значительным возрастанием гидравлического сопротивления насадок. И с точки зрения технико-экономического сравнения насадок для доменных воздухонагревателей, проведенного в работе [5], является эффективным.

Исследованию теплообменных и гидравлических характеристик канналов сложной формы, применяемых в насадках доменных воздухонагревателей, посвящено большое количество опубликованных работ, содержащие материалы об экспериментальном исследовании теплогидравлических характеристик каналов, при использовании различных эффектов воздействия на течение в каналах.

Регенеративные теплообменные аппараты с насыпной насадкой имеют минимальные габариты по сравнению с аппаратами, где применяются насадки других типов и большую удельную поверхность теплообмена [7]. Применение упрощенного метода монтажа насадки и достаточно технологичная форма ее составляющих, позволяет значительно сократить затраты на строительство этих аппаратов. В известных в настоящее время воздухонагревателях с насадкой насыпного типа широко применяются шаровые насадки, насадки с цилиндрическими элементами и насадки с использованием крошки. Расход огнеупора при использовании насадки насыпного типа значительно ниже, так как отношение объема насадки к площади поверхности теплообмена у насыпных насадок значительно выше, чем в блочных насадках. Но насадки этого типа имеют ряд существенных недостатков. Основные из них высокие значения гидравлического сопротивления, быстро возрастающие при эксплуатации аппарата, что приводит к необходимости значительно увеличивать мощность устройств подачи теплоносителя, либо значительно увеличивать площадь поперечного сечения аппарата. Необходимость использовать высококачественные и, соответственно, дорогие огнеупорные материал. Во время нагрева в регенераторах с шаровой насадкой возникают чрезмерные напряжения, обусловленные термическим расширением насадки, что может быть причиной разрушения как насадки, так

и ограждающих ее стен. Следует отметить, что форма и размер каналов образуемых элементами насыпной насадки, а также система их соединения носят случайный, вероятностный характер.

Для интенсификации теплоотдачи турбулизацией потока в насадках доменных воздухонагревателей можно применить каналы с нанесенными на теплообменную поверхность регулярно размещенными сфероидальными углублениями (лунками) [8].

Теплообменные поверхности с лунками привлекают внимание исследователей уже давно. Однако в настоящее время нет однозначной трактовки процессов, происходящих в выемках, нет точного описания физических механизмов интенсификации теплообмена на поверхностях, сформированных лунками. Имеющиеся в настоящий момент экспериментальные работы показывают достаточно большое количество различных картин обтекания лунок.

Несмотря на ряд работ, применительно к насадкам данный способ интенсификации конвективного теплообмена серьезно не рассматривался. Поэтому представляет интерес рассмотреть перспективы применения каналов с лунками в насадках доменных воздухонагревателей.

Таким образом, вопрос о наиболее рациональной форме канала насадки и путях интенсификации конвективного теплообмена остается открытым.

Библиографический список

1. Тимофеев, В.Н. Исследование конвективной теплоотдачи и гидравлического сопротивления насадок новых типов для доменных воздухонагревателей / В.Н. Тимофеев, С.П. Каштанова // Теплообмен и аэродинамика в металлургических агрегатах (ВНИИМТ. Сб. № 13). – М.: Металлургия, 1967. – С. 5–49.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
3. Шкляр, Ф.Р. Доменные воздухонагреватели (конструкции, теория, режимы работы): коллективная монография / Ф.Р. Шкляр, С.П. Каштанова, В.М. Малкин, Я.П. Калугин. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
4. Тимофеев, В.Н. Исследование коэффициентов теплоотдачи конвекцией и коэффициентов гидравлического сопротивления новых форм насадок доменных воздухонагревателей / В.Н. Тимофеев, С.П. Каштанова // Регенеративный теплообмен и теплоотдача в струйном потоке (ВНИИМТ. Сб. № 8). – Свердловск: Металургиздат, 1962. – С. 68–105.
5. Тимофеев, В.Н. Техничко-экономическое сравнение насадок новых типов для доменных воздухонагревателей / В.Н. Тимофеев, С.П. Каштанова // Теплообмен и аэродинамика в металлургических агрегатах (ВНИИМТ. Сб. № 13). – М.: Металлургия, 1967. – С. 61–88.
6. Кулинченко, В.Р. Справочник по теплообменным расчетам / В.Р. Кулинченко. – Киев: Техника, 1990. – 164 с.
7. Колпаков, С.В. Высокотемпературные доменные воздухонагреватели с насыпной насадкой из корундовых шаров / С.В. Колпаков, Е.М. Шелков, М.В. Поликовский, Ю.А. Горшков, А.В. Марченко, Н.И. Овсянников, П.И. Цуканов. // Сталь. – 1992. – № 10. – С. 11–17.

8. Волкинд, Д.К. Сравнение эффективности каналов насадок регенераторов по результатам расчета в пакете ANSYS CFX / Д.К. Волкинд // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – № 37. – С. 82–86.