Лобанов Игорь Евгеньевич, Штейн Леонид Михайлович

ТЕОРИЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПАКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СОВРЕМЕННОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2010/3-1/8.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2010. № 3 (34): в 2-х ч. Ч. I. С. 24-42. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2010/3-1/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

З. Уилльямс [3, p. 227] замечает, что практически любой человеческий организм представляет собой в том или ином смысле отклонение от нормы. Поэтому, производя какое-либо исследование, мы должны исходить из норм для данного индивидуума, а не из норм, установленных для популяции, как делают обычно. Изучение биохимической индивидуальности стало возможно лишь в последнее время с появлением таких методов исследования, как хроматография, изотопные методы и физические методы анализа и разделения.

Другая причина, заставляющая нас ориентироваться на индивидуальные нормы, состоит в том, что биохимические и физиологические показатели изменяются с возрастом. Вместе с ними меняется и индивидуальная восприимчивость к той или иной болезни. Это обстоятельство ясно выступает при изучении данным о смертности: именно индивидуальные отклонения в процессе «выхода из строя», или дегенерации, различных биохимических и физиологических систем объясняют «квантовый» характер дифференциальных кривых смертности [2, p. 129]. Обнаружив на ранней стадии этого процесса значительное отклонение какого-либо биохимического показателя от нормы, присущей данному индивидууму, можно прибегнуть к предупредительным мерам. Но в настоящее время имеется мало данных о биохимических и физиологических состояниях в начальных и последующих стадиях заболеваний.

Авторы считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: Изучена современная информационная технология. В долгосрочной перспективе будущее ***Data Mining*** является действительно захватывающим - это может быть поиск интеллектуальными агентами, как новых видов лечения различных заболеваний, так и нового понимания природы вселенной. Мы же применили ***Data Mining*** для автоматизации медицинской диагностики и выбора методов лечения. Результаты докладывались в ООО «Вектор», Наукоград Кольцово Новосибирской области и на Седьмой международной конференции памяти академика А. Е. Ершова «Перспективы систем информатики» [1, с. 72-76].

Список литературы

1. **Костюкова Н. И.** Система принятия решений по технологии Data Mining // Перспективы систем информатики: материалы Седьмой международной конференции памяти академика А. Е. Ершова. Новосибирск, 2009. С. 72-76.
2. **Sacher G. A.** Reparable and irreparable injury // Radiation biology and medicine. 1999. P. 297.
3. **Williams R. J.** Biochemical individuality. New York, 1999. P. 129.

УДК 536.2

Игорь Евгеньевич Лобанов, Леонид Михайлович Штейн
Московский авиационный институт (государственный технический университет)
Московская академия коммунального хозяйства и строительства

ТЕОРИЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПАКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СОВРЕМЕННОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ©

Данное исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 09-08-00440), Президента РФ по государственной поддержке научных исследований молодых российских учёных - докторов наук (грант МД № 1420.2008.8)

1. Постановка задачи

Актуальность проблемы интенсификации теплообмена в теплообменниках, используемых в современном металлургическом производстве, наиболее подробно была показана в монографиях [11; 12], где указывалось на преимуществе теоретического исследования интенсифицированного теплообмена над экспериментальным.

Теоретическое исследование интенсифицированного теплообмена в теплообменниках для металлургического производства основывается на имеющихся разработках в этой области [4; 5; 6; 7; 10; 23], которые успешно продолжаются в настоящее время при поддержке гранта РФФИ № 09-08-00440 и гранта Президента РФ № МД 1420.2008.8.

Постановка теоретической задачи заключается в математическом моделировании интенсифицированного теплообмена в каналах теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве в целях улучшения эффективности и снижения массогабаритных показателей. Далее следует рассмотреть теплообменники, теплообмен в которых необходимо интенсифицировать.

© Лобанов И. Е., Штейн Л. М., 2010

2. Актуальность проблемы

В различных отраслях техники, в том числе в современном металлургическом производстве, широко применяются различного рода теплообменники, в которых, в результате интенсификации теплообмена, может быть достигнуто снижение его массогабаритных показателей при наперёд заданном тепловом потоке, гидравлических потерях, расходе и температурах теплоносителя; в ряде случаев задачей является получение заданного температурного уровня стенок поверхности теплообмена при фиксированных режимных и конструктивных характеристиках [8].

Методы интенсификации теплообмена определяются характером и режимом течения, а также состоянием рабочего агента (например, числом фаз, числами Рейнольдса, Прандтля и другими свойствами) [8; 13].

Наиболее низкий теплообмен наблюдается при течении газов и интенсификация теплообмена в таких аппаратах является особо важной задачей.

Традиционные способы увеличения теплосъёма с поверхности теплообмена путём повышения скорости теплоносителей в ряде случаев становятся малоэффективными.

Оребрение также не во всех случаях может привести к желаемым результатам.

Соотношение между теплосъёмом и мощностью, потребной на преодоление сопротивления с ростом скорости падает и увеличение теплосъёма за счёт увеличения скорости с этих позиций энергетически нерационально. С другой стороны, конструирование теплообменников, рассчитанных на режим малых скоростей, приводит к увеличению их массогабаритных показателей.

Применение теплообменников с интенсифицированным теплообменом в металлургии представляется особенно актуальным на современном этапе, поскольку оно позволит реализовать необходимые температурные режимы, являющиеся неотъемлемой частью технологического металлургического процесса с более высокой точностью, надёжностью и с гораздо меньшими энергетическими потерями и повышенной ремонтопригодностью металлургического оборудования, чем существующие методы [21].

В современном металлургическом производстве применяются как рекуператоры, так и регенераторы [21; 22].

Примером высокотемпературного регенератора является ***регенератор мартеновской печи,*** в котором газообразное топливо и воздух предварительно нагреваются за счет теплоты отходящих газообразных продуктов сгорания. В этих регенераторах применяется в основном такая же насадка, как и в доменных воздухонагревателях.

Однако в то время как воздухонагреватели доменных печей, как почти все другие регенераторы, переключаются через постоянные интервалы времени, промежутки времени между переключениями регенераторов мартеновских печей к концу рабочего периода становятся все меньше и меньше [21]. Причина того, что при очень высоких температурах вместо рекуператоров применяют регенераторы, объясняется в основном свойствами конструкционных материалов.

Хотя в производстве жаростойких сталей и достигнуты заметные успехи, еще и в настоящее время огнеупорный кирпич, как правило, выдерживает высокие температуры лучше, чем металлы. Поэтому теплообменники, работающие при очень высоких температурах, обычно изготавливают из кирпича. Однако в рекуператорах разделительные стенки, сложенные из кирпича, лишь в ограниченной степени выдерживают разность давлений между, горячим и холодным газом, достигающую у доменных воздухонагревателей примерно 0,1 МПа. Ведь такие стенки, особенно при очень высоких температурах, малогерметичны.

Кроме того, не удается полностью избежать просачивания небольших количеств газов через различные неплотности.

При использовании регенераторов эти трудности отпадают, поскольку в них практически отсутствует разность давлений на насадке. Правда, при переключениях регенераторов не удается полностью избежать некоторого смешения потоков, однако в большинстве случаев это не является большим недостатком [13; 20; 21].

3. Теплоиспользование вторичных энергетических ресурсов огнетехнических установок

Согласно классификации огнетехнических установок, использование энергии вторичных энергетических ресурсов возможно по трем направлениям. Первое предусматривает внутреннее теплоиспользование (замкнутые схемы), при этом вторичные энергетические ресурсы применяются для процессов, протекающих в основных технологических установках. Второе направление предусматривает внешнее теплоиспользование. Оно реализуется в огнетехнических установках с разомкнутыми схемами. В таких схемах теплота вторичных энергетических ресурсов идет внешним потребителям, не связанным с процессами, протекающими в основной технологической установке, являющейся источником вторичных энергетических ресурсов. Третье направление - использование теплоты вторичных энергетических ресурсов в комбинированных установках, где вторичные энергетические ресурсы применяются одновременно для внутренних и внешних целей.

Внутреннее теплоиспользование осуществляется путем регенерации теплоты (энергии) технологических отходов. Регенерация - использование теплоты технологических отходов или материала (дымовые газы, шлаки, кусковой целевой продукт) в теплотехнической установке, где эти отходы (целевой продукт) получаются. Регенерация технологических отходов огнетехнической установки чаще всего заключается в нагреве компонентов рабочей смеси (воздух и исходное топливо) продуктами сгорания технологических зон установки. Значительно реже такой подогрев выполняется за счет теплоты материала, как это имеет место при обжиге цементного клинкера во вращающейся печи, шахтных печах и т.п.

На Рис. 1 приведена схема теплового баланса камерной печи с регенерацией теплоты отходящих газов, из которого видно, что регенерация является мощным средством повышения тепловой эффективности огнетехнической установки и рационализации теплоиспользования в ней.

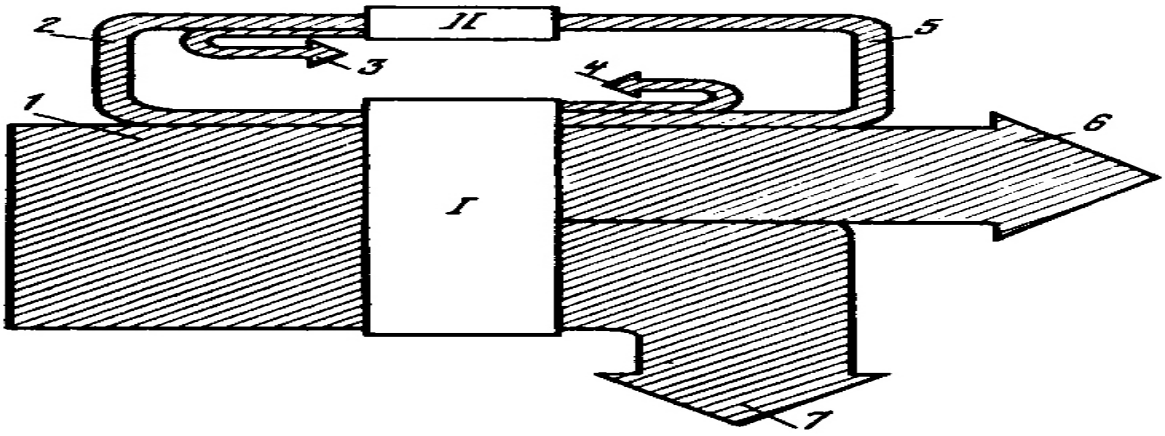


Рис. 1. *Топливоиспользование по замкнутой схеме: 1 - подведенное органическое топливо; 2 - замещение органического топлива; 3 - потери при регенерации; 4 - потери при транспорте энергоносителя; 5 - вторичные энергоресурсы на выходе из установки; 6 - сброс вторичных энергоресурсов в атмосферу; 7 - полезно использованная часть топлива; I - технологическая установка; II - регенератор*

Ограниченные возможности использования вторичных энергетических ресурсов для внутреннего теплоиспользования (регенерации) обусловили их применение для выработки энергетического и теплотехнического пара, производства холода. Все эти мероприятия выполняются в огнетехнических установках с внешним теплоиспользованием. В таких установках применяются котлы-утилизаторы разного назначения. Так, для использования теплоты дымовых газов мартеновских и нагревательных печей прокатного производства широко применяются котлы-утилизаторы серии ПКК, для охлаждения конвекторных газов - котлы-утилизаторы ОКГ; в цветной металлургии для этих целей устанавливают котлы-утилизаторы серии УКЦМ (утилизационный котел цветной металлургии).

4. Установки для утилизационного и регенеративного использования энергетических отходов высокотемпературных теплотехнологических процессов

Сначала рассмотрим установки для регенеративного теплоиспользования. Ограниченные возможности использования теплоты энергетических отходов путем регенерации обусловили дальнейшее освоение теплоты в котлах-утилизаторах с давлением перегретого пара 1,3÷1,8 и 1,8÷4,5 МПа. Выбор давления пара утилизационных установок обусловлен параметрами технологий в черной, цветной металлургии, нефтехимической промышленности, где используется пар давлением 3,3÷4 (всевозможные газо- и воздуходувки с паровым приводом) и 1,3÷1,8 МПа (эксгаустеры, паровые приводы насосов и компрессоров и др.). В настоящее время ведутся разработки котлов-утилизаторов с давлением 10÷14 МПа и температурой перегретого пара 813÷833 К. Котлы-утилизаторы маркируются по производительности и давлению, например котел УКЦМ-25/40 - производительностью 25 т/ч с давлением пара 4 МПа; ПКК-25/18 (ПКК-25/45) - производительностью 25 т/ч с давлением 1,8 или 4,5 МПа.

В зависимости от температуры продуктов сгорания котлов-утилизаторов делятся на низкотемпературные ($T_{ух.г}$ < 1070÷1170 К) и высокотемпературные ($T_{ух.г}$ > 1370÷1470 К).

Первая группа представлена конвективными котлами-утилизаторами.

Вторая группа этих котлов имеет ряд принципиальных особенностей, определяющихся тем, что топливный и технологический уносы, содержащиеся в дымовых газах вторичных энергетических ресурсов, как правило, находятся в жидком состоянии. Котлы-утилизаторы бывают с принудительной (многократной) и естественной циркуляцией, которые реже используются.

Кроме того, в зависимости от параметров пара котлы-утилизаторы делятся на парогенераторы низкого (до 1,5 МПа и 575 К), среднего (до 4,5 МПа и 725 К) и высокого давлений (10÷4 МПа и 825 К).

Низкотемпературные котлы-утилизаторы используются в установках с комбинированным теплоиспользованием и устанавливаются за подогревателями воздуха (окислителя) в мартеновских печах, нагревательных колодцах, методических печах прокатных станов, установках для сухого тушения кокса.

Экономически обоснованные области использования котлов-утилизаторов первой группы (Рис. 2) представлены диаграммой [11; 12]. При выборе параметров пара низкотемпературного котла-утилизатора (1,8 или 4,5 МПа) следует помнить, что повышение давления пара приводит к ухудшению теплоиспользования в низкотемпературном котле-утилизаторе. Это предопределяет использование низкотемпературных котлов-утилизаторов для покрытия тепловой нагрузки промышленного предприятия.

Наряду с этим стремление снизить температуру уходящих из котла-утилизатора газов ухудшает его технико-экономические характеристики [Там же]. Так, при снижении $T_{ух.г}$ с 525 до 425 К его поверхность нагрева увеличивается на 300% при сравнительно небольшом росте производительности (40%). Для увеличения производительности котла-утилизатора наиболее обоснованным является повышение $T_{ух.г}$ на входе в котёл-утилизатор. При этом наряду с увеличением выработки пара *D* снижается металлоемкость *G/D* и увеличивается напряжение поверхности нагрева *D/F* по пару [Там же]. Анализ графиков [Там же] указывает на целесообразность изменения схемы включения теплоиспользующих элементов установки со смешанным теплоиспользованием (теплотехнологическая камера - рекуператор - котёл-утилизатор). Высокотемпературные котлы-утилизаторы используются при компоновке элементов энерготехнологических установок [Там же].

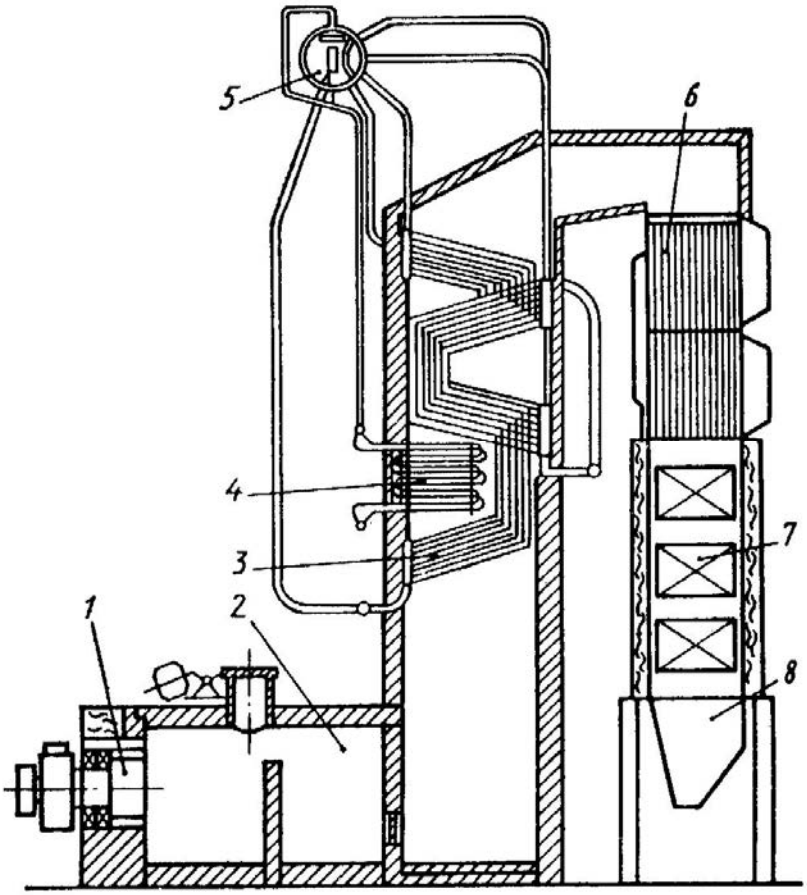


Рис. 2. *Пакетный конвективный котёл-утилизатор ПКК-75/45-150: 1 - горелочное устройство; 2 - сепарационная камера; 3 - конвективная поверхность нагрева; 4 - пароперегреватель; 5 - сепарационный барабан; 6 - воздухоподогреватель; 7 - водяной экономайзер; 8 - сепарационная камера*

В [Там же] приведена схема включения поверхностей нагрева наиболее распространенных низкотемпературных котлов-утилизаторов.

Теперь следует перейти к рассмотрению установок для регенеративного теплоиспользования. Здесь внутреннее теплоиспользование предусматривает регенеративный подогрев компонентов рабочей смеси в рекуператорах и регенераторах. Подогрев воздуха-окислителя в таких теплообменниках отвечает трем температурным уровням: 500÷700, 900÷1100 и 1300÷1500 К.

Нагрев воздуха до 700 К осуществляется в металлических рекуперативных теплообменниках (чугунных или стальных), которые изготавливаются из жаростойкого чугуна или углеродистой стали. Надежность их работы зависит от температуры теплоотдающей поверхности, которая в свою очередь определяется удельной тепловой нагрузкой q и интенсивностью теплообмена между вторичным теплоносителем (воздухом) и стенкой. С определенными допущениями для температуры металлической поверхности $T_м$ можно записать: $T_м = T_{в.о} + q/\alpha_в$, где $T_{в.о}$ - температура воздуха-окислителя в рассматриваемом сечении подогревателя, К; q - удельная тепловая нагрузка поверхности нагрева, Вт/м^2; $a_в$ - коэффициент теплоотдачи к вторичному теплоносителю, Вт/(м^2·К).

Графики зависимости $T_{в.о} = f(q)$ показаны в [Там же]. Установлено, что условия надежности работы поверхности нагрева будут обеспечены при достаточно интенсивном теплообмене со стороны вторичного теплоносителя даже при больших удельных тепловых нагрузках.

Подогрев, отвечающий второму температурному уровню, может происходить в металлических теплообменниках из жаропрочной хромистой стали, где в качестве легирующих элементов добавлены присадки хрома, кремния и алюминия, а также в керамических рекуператорах (крупные нагревательные печи черной металлургии). По жаростойкости хромистые стали делятся на три группы, соответственно допускающие температуры стенки 950÷1000; 1100÷1150 и 1250÷1300 К (содержание легирующих присадок составляет 13, 17 и 25%). Область использования металлических рекуператоров ограничивается температурой подогрева порядка 1100 К.

Нагрев в интервале 1300÷1500 К необходим для организации горячего дутья при мартеновской плавке стали, варке стекла в печах ванного типа, для производства чугуна в доменных печах. Нагрев до такой температуры достигается в керамических теплообменниках регенеративного типа.

Таким образом, установки для регенеративного подогрева (внутреннее использование теплоты) подразделяются на две большие группы металлических, обеспечивающих подогрев при 500÷700 и 900÷1100 К, и керамических (1300÷1500 К) теплообменников.

Значения допустимых температур металла, при которых обеспечивается устойчивая работа поверхности нагрева, в соответствии с [14; 17; 20], находятся в следующих диапазонах: конструкционная углеродистая сталь общего назначения - 673÷953 К; углеродистая сталь алитированная - 1073÷1373 К; литейный серый чугун - 993÷1023 К; литейный чугун с добавкой хрома (Cr=1,0÷1,5 %) - 1023÷1173 К; кремнистый чугун с добавкой хрома (Si=5,5÷6,5; Cr=0,5÷1,0 %) - 1223÷1273 К; жаростойкий чугун с добавкой хрома (Cr=10÷30%) - 1223÷1474 К; жаростойкая сталь с добавками Cr, Ni, Si, Ti - 1223÷1473 К.

Например, для поверхности нагрева с температурой 773, 1073, 1323 и 1373 К соответственно могут использоваться стали: сталь 20 (ГОСТ 1050-60); 1Х18Н10Т; Х17Т и 0Х21Н5Т (ГОСТ 5632-61); 1Х18Н14В2МТ (ГОСТ 5632-61, обладает повышенной механической прочностью); Х25Т; Х28 (ГОСТ 5632-61); Х23Н13 (обладает повышенной механической прочностью) и Х25Н20С2 (ГОСТ 5632-61).

Максимальная температура стенки металлического подогревателя определяется для его наиболее напряженного элемента на горячей стороне с учетом неравномерности тепловосприятия по параллельно включенным элементам. Такая неравномерность для группы параллельно включенных элементов определяется коэффициентом неравномерности φ=1,05÷2,2. При большой неравномерности тепловосприятия первого ряда применяют защитную петлю [Там же]. При температуре дыма выше 1073÷1173 К за счет излучения дымовых газов и футеровки предрекуператорного пространства φ может принимать значения 2÷2,2. Отсутствие радиационного тепловосприятия способствует снижению φ до значений порядка 1,3÷1,4. При вертикальном расположении поверхности нагрева, представленной трубным пучком с пропуском продуктов сгорания по трубам и многократным перекрестным ходом вторичного теплоносителя, неравномерность тепловосприятия практически исключается, поскольку φ = 1,05÷1,2.

В [Там же] показана типовая конструкция рекуперативного теплообменника. Как видим, при такой компоновке поверхности нагрева возникает большая неравномерность тепловосприятия. Максимальная тепловая нагрузка наблюдается у труб первого ряда (по ходу первичного теплоносителя), при этом температура металла первого ряда практически приближается к $T_{ух.г}$.

Минимальный массовый расход вторичного теплоносителя может создать для труб первого ряда аварийную обстановку. Одним из возможных решений задачи повышения надежности работы поверхности нагрева металлического рекуператора является снижение радиационного тепловосприятия. Иными словами, такой теплообменник должен работать при температуре дымовых газов не выше 1073÷1173 К. При необходимости использования радиационной составляющей теплообмена радиационная часть (рекуператор делают из двух секций: конвективной и радиационной) изготавливается с учетом мероприятий по выравниванию радиационного тепловосприятия.

Чугунные рекуператоры выполняются в виде термоблоков с гладкими каналами для прохода теплоносителей, а также оребренных иглами литых элементов. Чугунный рекуператор собирается из отдельных элементов, которые отливаются как из обычного, так и легированного чугуна или стали, что позволяет подогревать воздух до 500÷700 К. В отдельных случаях элементы первых секций изготавливаются из чугуна с присадкой до 30% хрома, а остальные секции - из кремнистого чугуна "силал". В [Там же] приведены значения коэффициентов теплопередачи для элементов игольчатых рекуператоров. При загрязненной поверхности значения, найденные по графикам [Там же], должны быть уменьшены на 20÷30%. Аэродинамическое сопротивление игольчатых рекуператоров по воздушному тракту обычно составляет 0,3÷0,5 кПа, по газовому оно значительно меньше.

К недостаткам чугунных игольчатых рекуператоров относится их низкая газоплотность по вторичному теплоносителю. Специальные прокладки и замазки из графита и жидкого стекла не обеспечивают плотности многочисленных фланцевых соединений, и часть вторичного теплоносителя (3÷20%) попадает в дымовой тракт. Неустранимым и серьезным недостатком также является термическая жесткость, вызывающая большие термические напряжения в металле.

Чугунный рекуператор, кроме того, имеет повышенную металлоемкость, которая у термоблока составляет 120÷180, а игольчатый - 70÷80 кг/м^2 (по сравнению с 15 кг стали на 1 м^2 поверхности нагрева у металлического трубчатого). Все эти недостатки являются тормозом при внедрении рекуператоров в промышленное производство.

Стальные трубчатые рекуператоры обладают двумя несомненными преимуществами, обусловливающими их широкое применение: низкой металлоемкостью и высокой газоплотностью. Отдельные трубчатые элементы, из которых набирается поверхность нагрева, обеспечивают надежную газоплотность конструкции, что очень важно для тепловой форсировки поверхности нагрева, обеспечивающей перепад давления между теплоносителями порядка 2÷4 кПа.

Стальные трубчатые рекуператоры обычно воспринимают конвективную тепловую нагрузку, что обусловлено их работой до температур $T_{\text{ух.г}} \leq 1173$ К.

При повышении температуры дыма радиационная составляющая теплообмена начинает преобладать над конвективной, и появляется значительная неравномерность тепловосприятия ($\varphi \approx 2$). Так как эти рекуператоры работают при сравнительно невысоких температурах продуктов сгорания, интенсификация теплообмена достигается увеличением скоростей теплоносителей и уменьшением диаметра труб (в отдельных случаях до 30 мм).

Сравнительная эффективность радиационного и конвективного тепловосприятия стального рекуператора иллюстрируется в [Там же], из которого видно, что температура дыма на входе не должна быть выше температуры, соответствующей точке *а* графика. В противном случае эффективность конвективного восприятия резко снижается [Там же].

Использование схемы поперечного противотока в конвективных трубчатых рекуператорах приводит к низкотемпературной коррозии его холодной стороны. Для устранения этого температуру металла трубок в хвостовой части рекуператора следует поддерживать на уровне 373÷403 К, что достигается подогревом воздуха в первой секции рекуператора до температуры 393 К перед подачей его в поверхность нагрева [Там же]. Используется также рециркуляция воздуха (20÷30)% воздуха непрерывно возвращаются в холодную часть рекуператора).

Из графиков [Там же] видно, что при температуре 1073÷1173 К лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи от газов к стенке рекуператора становится соизмеримой с конвективной, а поэтому значение температурного интервала, в котором работает радиационный рекуператор, ограничивается этой температурой. Верхний предел температуры рабочего интервала принимается 1273÷1423 К.

Дальнейшее повышение температуры может вызвать шлакование поверхности нагрева, а также затруднить теплоотвод на стороне вторичного теплоносителя. Более глубокая регенерация теплоты дыма, выходящего из радиационной части при 1073÷1173 К, происходит в его конвективной поверхности нагрева.

При одноступенчатой схеме включения поверхности нагрева [Там же] температура продуктов сгорания на выходе из конвективной поверхности составляет 723÷373 К, что недостаточно для последующего использования (утилизационного) теплоты дымовых газов. Поэтому на крупных огнетехнических установках, где имеются большие возможности для утилизационного использования теплоты продуктов сгорания, такая схема не применяется. Обычно производится регенеративный подогрев воздуха в конвективном рекуператоре, после чего дым поступает в котёл-утилизатор, где его температура снижается до 453÷523 К. При двухступенчатой схеме включены элементы 1 и 2 с промежуточным звеном 3 [Там же], достаточно полно используется теплота вторичных энергетических ресурсов (температура сброса дымовых газов составляет 473÷523 К).

В высокотемпературных рекуператорах при температуре дыма на входе 1273÷1373 К тепловая нагрузка поверхности нагрева q составляет 1500÷2000 Вт/м^2 ([Там же]). При таких больших q и требовании, чтобы температура металла не превышала 1273 К, нужно обеспечивать очень высокую интенсивность теплообмена на стороне вторичного теплоносителя 80÷110 Вт/(м^2·К). Создать теплообмен такой интенсивности только за счет увеличения скорости вторичного теплоносителя затруднительно, поэтому реализуется такой мощный фактор, как увеличение поверхности тепловосприятия. Вторичный теплоноситель направляется в узкий кольцевой канал, образуемый двумя коаксиальными цилиндрическими обечайками. Внутренняя обечайка обогревается продуктами сгорания. Часть воспринятой теплоты передается излучением внешнему цилиндру. Обе поверхности охлаждаются воздухом, движущимся со скоростью примерно 30 м/с (высокая скорость воздуха обусловливает аэродинамическое сопротивление на воздушной стороне до 30 кПа).

Керамические воздухоподогреватели обеспечивают подогрев на третьем температурном уровне ($T_{\text{в.о}}$ = 1300÷1500 К) и распространены главным образом в черной металлургии в тепло-технологических установках с внутренним теплоиспользованием (методические нагревательные печи, нагревательные колодцы прокатных станов). Эти воздухоподогреватели собираются из нормализованных труб и блоков, изготовленных из шамота, карборунда и шамотно-карборундовых масс. К недостаткам таких рекуператоров можно отнести низкую газоплотность трактов теплоносителей. В зависимости от схемы включения вентилятора перетоки могут составлять 25÷30%. Переток воздуха в тракт дымовых газов приводит к перегрузке тягодутьевых машин и увеличивает энергозатраты. К недостаткам также относят их большую массовую емкость: для блочных рекуператоров она составляет 180÷200, а для трубчатых - 120÷140 кг/м поверхности нагрева.

Высокая естественная пористость (10÷20%) обеспечивает низкий коэффициент теплопроводности (для шамота - 1,4÷1,8 и для карборунда - 9÷10 Вт/(м·К), что снижает коэффициент теплопередачи между теплоносителями до 2÷6 Вт/(м^2·К).

Для снижения перетоков подключение рекуператора к тягодутьевым устройствам выполняется по одной из схем, представленных в [Там же]. Преимуществом схемы, показанной в [Там же], является минимальный расход электроэнергии на прокачку холодного воздуха через рекуператор. При этом проявляется главный из недостатков керамических рекуператоров - переток вторичного теплоносителя в дымовой тракт (до 30÷70%). Большие перетоки вторичного теплоносителя обусловлены значительными перепадами давлений теплоносителей.

Разность давлений $\Delta p^{гор}$ по второй схеме предопределяет подсос дымовых газов во вторичный теплоноситель на горячей стороне и воздуха в первичный - на холодной (подсосы зависят от абсолютных значений $p_{ух.г}$ и $p_{в.о}$ по тракту рекуператора). Поэтому в связи с низкой газоплотностью керамических рекуператоров нужно стремиться к ограничению $\Delta p^{гор}$ и $\Delta p^{хол}$. Обычно принимают $\Delta p^{гор}$ = 50÷100 Па и $\Delta p^{хол}$ = 150÷200 Па при скоростях продуктов сгорания и воздуха соответственно 1,4÷1,8 (на входе в рекуператор) и 0,8÷1,3 м/с (на выходе).

В керамических регенеративных воздухоподогревателях осуществляется подогрев до 1500 К (третий температурный уровень). Применяются при мартеновской плавке стали, варке стекла, производстве чугуна (кауперы) и др. В регенеративных теплообменниках процесс теплопередачи между теплоносителями разделен на два периода. В первом нагревается керамическая насадка (поверхность нагрева) теплообменника. Насадка собирается из нормализованных прямоугольных шамотных, одинаковых, хромомагнезитовых, шамотно-карборундовых элементов. В течение второго периода (охлаждения насадки) происходит нагревание воздуха за счет отвода ранее аккумулированного тепла. Обычно $\tau_н = \tau_о = \tau_ц / 2$, где $\tau_н$, $\tau_о$ - продолжительность периодов нагревания и охлаждения насадки; $\tau_ц$ - продолжительность рабочего цикла, равна 0,3÷0,6 ч. Для непрерывности получения подогретого воздуха регенератор состоит из двух насадок [Там же].

К основным характеристикам керамических регенеративных теплообменников следует отнести: характерный размер элемента насадки x, равный половине толщины; удельную поверхность 1 м насадки $f_о$ ($f_о$ = 15÷20 м^2/м^3); коэффициент заполнения кирпичом 1 м регенератора k, характеризующий его теплоаккумулирующую способность (k = 0,4÷0,8 м^3/м^3).

Тепловой расчет подразделяется на поверочный и конструкторский. Значения температур первичного и вторичного теплоносителей на выходе из рекуператора определяются в соответствии с тепловым балансом [1; 17; 20]. Значение коэффициента теплоотдачи излучением в керамических регенераторах может быть выбрано [8; 17] Для получения расчетного значения коэффициента теплоотдачи излучением необходимо значение $\alpha_л$ умножить на поправочный коэффициент k, приведенный в номограмме: $\alpha_л = \alpha'_л \cdot k$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией на воздушном и дымовом трактах находится по формулам, приведённым в [17; 20]. Коэффициент теплопередачи $k_{рег}$ за период для высокотемпературных регенераторов составляет 2÷3 для (верхней) горячей части насадки и 1,5÷2 Вт/(м^2·К) для нижней холодной. Значение $k_{рег}$ зависит от температуры поверхности нагрева, и там, где насадка наиболее нагрета, оно выше. Наряду с малым значением коэффициента теплопередачи такие теплообменники имеют еще один существенный недостаток, исключающий их широкое применение. Переключение регенеративных насадок влечет за собой бестопливные простои рабочей камеры основной теплотехнологической установки, составляющие 2÷4% всего рабочего времени. Последнее вызывает нарушение температурного режима в технологической камере, ее температурного уровня, что усиливает циклические колебания температуры дутья, поскольку вначале имеет место холодное дутьё, а затем - горячее.

5. Необходимость использования перспективных теплообменных аппаратов в современных перспективных металлургических процессах

Рассмотренные технологические процессы, применяемые в современном металлургическом производстве, позволяют заключить, что температурные интервалы, реализуемые в этих процессов довольно широки, поэтому для обеспечения необходимой точности и надёжности этих температурных режимов следует применять теплообменные аппараты трубчатого типа с интенсифицированным теплообменом, которые имеют стойкие теплообменные характеристики в широком диапазоне температур [11; 12].

Применение теплообменников может повысить ремонтопригодность металлургического оборудования [20].

При высоких температурах используются значительно меньшие давления, чем при низких.

В теплообменниках в металлургической промышленности редко применяются избыточные давления свыше (0,1÷0,2) МПа, тогда как в криогенной технике обычными являются давления 5 МПа и выше.

В то же время реакции зачастую протекают при высоких давлениях и температурах.

Поэтому применяемые там теплообменники должны одновременно выдерживать высокие температуры и высокие давления.

Следовательно, при очень высоких температурах в первую очередь требуется высокая жаростойкость конструкционных материалов при умеренных механических нагрузках [21].

Высоким температурам, например таким, какие используются в металлургической промышленности (до 1500°С и выше), и в настоящее время лучше всего противостоит огнеупорный кирпич.

Поэтому при температурах выше примерно 500°С широко используются огнеупорный кирпич и керамические материалы, хотя до температур около 1200°С можно использовать специальные жаростойкие стали, а также графит.

При высоких температурах, особенно в металлургической промышленности, выбор больших поперечных сечений, чем при низких температурах, объясняется, однако, не только материалом, но и более низкими, чем в криогенной технике, давлениями, а следовательно, и меньшими допустимыми потерями давления и скоростями потоков.

Кроме того, большие объемы при высоких температурах благоприятствуют теплообмену излучением [14].

Напомним, что температурные режимы, реализованные в металлургических технологических процессах, уже были приведены выше, поэтому теперь следует привести только основные характеристики теплоносителей и теплопередающих труб, применяемых в теплообменных аппаратах трубчатого типа, которые необходимо применять в перспективном металлургическом производстве.

Данные, приведённые в [11; 12], позволяют с полным на то основанием установить, что имеющиеся характеристики теплоносителей и теплопередающих труб, применяемых в теплообменных аппаратах трубчатого типа, позволят обеспечить тепловые режимы современных металлургических процессов с высокой точностью и надёжностью, поскольку основные характеристики теплоносителей (рабочих тел) и труб перекрывают требуемые вышеприведённые температурные режимы, являющиеся неотъемлемой частью современного металлургического производства [20].

Данный анализ позволяет сделать следующий основополагающий вывод: на современном этапе развития металлургического производства задача реализации необходимых температурных режимов, являющихся неотъемлемой частью технологического металлургического процесса с более высокой точностью, надёжностью и с гораздо меньшими энергетическими потерями, чем существующие методы, а также задача повышения ремонтопригодности металлургического оборудования, может быть успешно решена в результате применения как теплообменных аппаратов регенеративного типа, так и трубчатых теплообменных аппаратов рекуперативного типа с интенсифицированным теплообменом [4; 5; 6; 7; 8; 9; 23].

Применение поверхностных поперечно расположенных турбулизаторов потока в теплообменных аппаратах позволит при прочих равных условиях значительно интенсифицировать процесс теплообмена при относительно незначительной конструктивной девиации [8; 11; 12].

Интенсифицированный теплообмен можно исследовать как экспериментально [8; 13], так и теоретически [4; 5; 6; 7; 8; 9; 23].

На данном этапе развития математического моделирования теплообмена можно констатировать, что теоретические методы обладают существенными преимуществами перед экспериментом [9].

Учитывая вышеизложенное, задача теоретического исследования интенсифицированного теплообмена в регенераторах и рекуператорах трубчатого типа с интенсифицированным теплообменом, применяемых в современном металлургическом производстве с целью обеспечения более высокой точности и надёжности реализуемых температурных режимов с более высокой экономичностью и является актуальной, обусловливая необходимость их применения.

6. Металлические рекуператоры (рекуперативные воздухоподогреватели) промышленных печей машиностроительного и металлургического производства

В машиностроительном и металлургическом производстве внутреннее теплоиспользование реализуется в основном путем установки на дымовом тракте специального теплообменника рекуперативного типа для подогрева воздуха-окислителя.

Теплообменники могут изготавливаться из металла (чугун, сталь) либо из огнеупорного керамического материала. В зависимости от этого они подразделяются на металлические и керамические [17]. Последние устанавливаются на крупных печах металлургического производства.

Металлические рекуператоры в свою очередь подразделяются на блочные, отливаемые из чугуна либо стали, и трубчатые (иногда обечаечного типа - радиационные).

Блочные рекуператоры используются, как правило, на нагревательных и термических печах машиностроительного производства.

Блочные рекуператоры собираются из нормализованных игольчатых элементов, изготавливаемых заводами в соответствии с разработанным типорядом. 17,5, состоящим из пяти типоразмеров.

Оребрение блочного элемента может быть одно- либо двусторонним.

Общий вид игольчатого элемента типа 17,5 показан в [11; 12]. Такие элементы изготавливаются серийно из жаростойкого чугуна или стали на специально для этих целей спрофилированных заводах, а в отдельных случаях по месту использования в соответствии с нормалью типоряда 17,5.

Полная характеристика типоразмеров игольчатых труб типа 17,5 приведена в [Там же].

Как видно из [Там же], игольчатый рекуператор представляет собой сборную конструкцию из отдельных нормализованных элементов.

Наиболее часто используются элементы с односторонними иглами (на воздушной стороне, где коэффициент теплоотдачи ниже, чем это имело место на дымовом тракте).

Стойкость таких рекуператоров определяется в основном материалом, из которого они изготовлены.

Например, игольчатый элемент, отлитый из высококремнистого чугуна ("силала"), устойчиво работает при температуре стенки 600°С и температуре дыма перед рекуператором $T_{ух.г}$ < 800°С.

Подогрев воздуха в рекуператорах такого вида редко превышает 400°С.

Для устранения пережога первых по ходу продуктов сгорания секций их отливают из стали со значительным содержанием хрома или разбавляют дым атмосферным воздухом, чтобы температура продуктов сгорания на газовой стороне перед рекуператором не превышала 800°С.

С учетом оребрения поверхности теплообмена коэффициент теплопередачи такого рекуператора сравнительно высок и составляет 60÷120 Вт/(м^2·К).

Основные недостатки игольчатого рекуператора - низкая газоплотность (утечки воздуха могут составлять 5÷25%) и очень большая металлоемкость по отношению к одному кубометру нагреваемого воздуха-окислителя.

Большая группа воздухоподогревателей представлена трубчатыми петлевыми рекуператорами [Там же].

Трубчатые петлевые рекуператоры используются для подогрева воздуха-окислителя для нагревательных печей металлургического производства очень часто.

Элементы трубчатых рекуператоров (отдельные петли) в отличие от игольчатых не стандартизированы, что обусловливает их разнообразие.

Поверхность нагрева набирается из петлевых цилиндрических труб диаметром 50÷110 мм.

Трубчатые рекуператоры при абсолютной газоплотности обладают в 1,5÷2 раза меньшей (по сравнению с игольчатыми) металлоемкостью.

Скорость воздуха в трубках колеблется в пределах 7÷20 м/с, а продуктов сгорания в межтрубном пространстве - 4÷15 м/с.

Коэффициент теплопередачи петлевого трубчатого рекуператора составляет 60÷120 Вт/(м^2·К) при температуре подогрева воздуха до 400°С.

В силу своей исключительной газоплотности трубчатый рекуператор может использоваться для подогрева топлива (горячий газ).

Очень часто требуется более высокий подогрев воздуха в металлическом рекуператоре - до (600÷700)°С, - тогда применяют радиационные рекуператоры обечаечного типа.

Кольцевой обечаечный рекуператор [Там же] состоит из двух коаксиальных цилиндров диаметром 0,4÷1,6 м.

Толщина кольцевого зазора между обечайками равна 20÷50 мм. Вторичный теплоноситель (воздух) с большой скоростью (порядка 30÷50 м/с) движется в кольцевом зазоре (сверху вниз).

Продукты же сгорания направляются в центральную трубу. Как и трубчатые петлевые, эти рекуператоры обладают высокой герметичностью воздушного тракта.

Рекуператоры устойчиво работают при температурах продуктов сгорания на входе $T_{ух.г}$=(900÷1100)°С. Коэффициент теплопередачи сравнительно высок и составляет 120÷300 Вт/(м^2·К).

При всех достоинствах рекуператоров нужно помнить, что они обладают очень высоким сопротивлением воздушного тракта (5÷15 кПа).

Радиационные рекуператоры, как правило, используются на крупных нагревательных печах.

7. Керамические рекуператоры (рекуперативные воздухоподогреватели) промышленных печей машиностроительного и металлургического производства

Керамическими рекуператорами оснащаются крупные методические нагревательные и термические печи. Эти рекуператоры имеют очень высокую жаростойкость, вследствие чего могут длительное время работать при высоких температурах продуктов сгорания топлива. Рекуператоры устойчиво работают при подогреве воздуха до 500÷1000°С. Основные недостатки - низкая газоплотность (при хорошем качестве изготовления утечки воздуха составляют 20÷30%) и не большой коэффициент теплопередачи, который в зависимости от скорости теплоносителей равен 20÷80 Вт/(м^2·К).

Широкое распространение получили два типа керамических рекуператоров: из блоков и с вертикальными трубами.

Конструкция рекуператора из блоков и размеры насадки в зависимости от варианта исполнения приведены на Рис. 3а, а фасонные огнеупорные элементы из шамота, применяемые для кладки насадок, показаны в [Там же]. Основные данные этих рекуператоров представлены в [Там же]. Площадь проходного сечении для прохода воздуха равна 0,013 м^2 для блоков Б-1 и 0,006 м^2 для блоков Б-2.

Рекуператор (конструкция насадки рекуператора) с вертикальными трубами показан на Рис. 3б, а фасонные элементы - в [Там же].

Трубы Т-1 изготавливают из шамота класса А, а Т-2 - из карбошамота. Трубы Т-2 обычно устанавливают в первых двух верхних рядах насадки, подверженных действию высоких температур. Площадь проходного сечения для продуктов сгорания в одном элементе Т-1 или Т-2 равна 0,011 м^2, а на 1 м^2 сечения насадки - 0,231 м^2.

Площадь проходного сечения для воздуха через проем в перекрытии, не заложенный одним кирпичом Т-6, равна 0,008 м^2, а на 1 м^2 перекрытия - 0,168 м^2. Площадь поверхности нагрева 1 м^3 насадки составляет 8,5 м^2/м^3.

8. Конструктивные особенности существующих рекуперативных теплообменных аппаратов, используемых в современных перспективных металлургических процессах

После рассмотрения процессов современного металлургического производства и способов интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах, применяемых в нём, следует перейти к рассмотрению конкретных конструктивных особенностей рекуперативных теплообменных аппаратов, используемых в современных перспективных металлургических процессах.

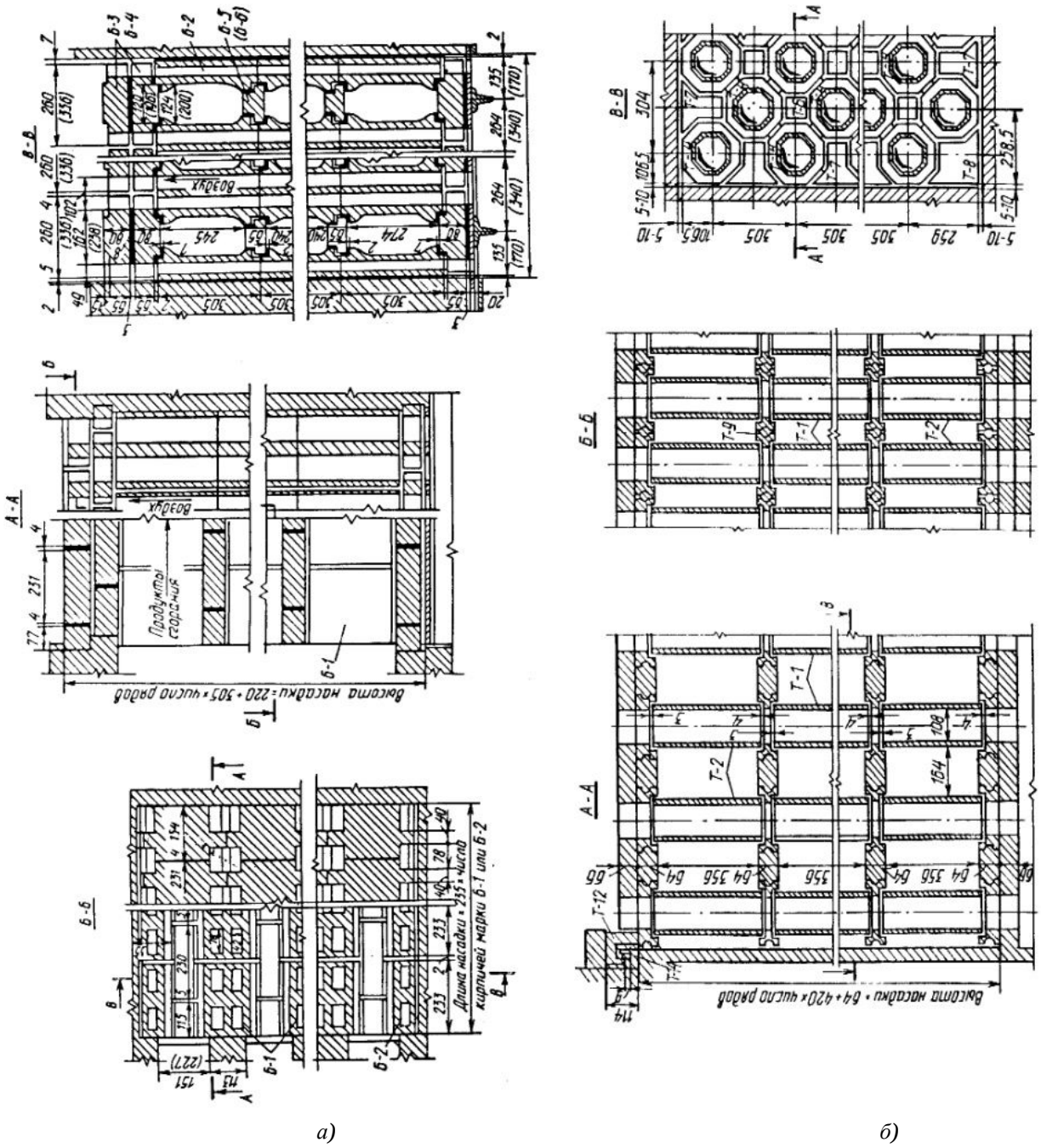


Рис. 3. *Насадка керамического рекуператора: а) из блоков типа Б; б) с вертикальными трубами типа Т*

Сначала рассмотрим полуметодические печи для нагревательного оборудования в отделениях горячей штамповки на молотах и кривошипных горячештамповочных прессах, которые значительно экономичнее камерных и позволяют механизировать процессы загрузки, перемещения и выгрузки заготовок. В [Там же] приведены разрезы механизированной печи без узлов автоматизации для малоокислительного нагрева цилиндрических заготовок под штамповку на кривошипном горячештамповочном прессе усилием 2500 т, спроектированной для массового производства. Температура нагрева заготовок - 1503 К; температура подогрева первичного воздуха - 888 К, вторичного - 588 К; средний коэффициент теплопередачи при нагреве первичного воздуха в рекуператоре - 26,3 Вт/(м^2·К); вторичного - 23,3 Вт/(м^2·К).

Для обеспечения необходимой температуры в сварочной зоне первичный воздух нагревают в рекуператоре до (873÷923) К. В данном случае имеется игольчатый рекуператор, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Для более совершенной механизированной полуметодической печи для нагрева сравнительно крупных заготовок применятся печь, показанная в [Там же], предназначена для нагрева под штамповку заготовок круглого и квадратного сечения. Температура нагрева - 1473 К; температура подогрева воздуха - 723 К. В этом случае также рекуператор, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Механизировать транспортные операции при нагреве заготовок различной формы позволяют печи с вращающимся подом. В печах этой конструкции заготовки загружают на под, имеющий сверху вид круга или кольца, который переносит заготовки, непрерывно вращаясь, которые, в свою очередь, после нагрева извлекают через окна выгрузки спецустройством, расположенным около окна загрузки.

В [Там же] показана схема одной из таких печей, предназначенных для нагрева под ковку-штамповку различных заготовок диаметром от 40 до 80 мм и длиной от 80 до 500 мм. Рабочие температуры: в печи - 1623 К, нагрева металла - (1453÷1523) К; подогрева воздуха - (350÷400) К. В дымоходе печи установлен игольчатый рекуператор из литых ребристых труб, перед которым имеются сопла для разбавления дымовых газов воздухом в целях предупреждения перегрева рекуператора и дожигания продуктов сгорания. Температура дымовых газов перед рекуператором не превышает 1373 К. Печь оборудована системой приборов теплового контроля и регулирования нагрузки. Следовательно, имеет место игольчатый рекуператор, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Двухрядная печь для нормализации стальных отливок толкательного типа с нижними топками, отапливаеваемая мазутными смесями, показана в [Там же]. Она состоит из каркаса, футерованного кирпичом, подовых направляющих, механизмов подъёма заслонок ан загрузке и выгрузке деталей, установки рекуператора и комплектуется спецмеханизмами - толкателем и вытаскивателями поддонов. В двухрядной печи один ряд используется для нагрева под заварку, другой - для отжига. Температура операции - 1173 К. Температура подогрева воздуха-окислителя - 523 К, мазута - 353 К. Имеется место соответствующий рекуператор, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Следующим рассматриваемым видом печей являются нагревательные печи металлургических заводов. В [Там же] показана методическая нагревательная печь, применяемая в современном металлургическом производстве стран СНГ и дальнего зарубежья. На ней производится операция нагрева под прокатку. Температура операции - (1473÷1523) К. Устройство для регенеративного теплоиспользования - керамический рекуператор из шамотных блоков. Температура подогрева воздуха-окислителя - до 773 К. Температура дыма перед рекуператором - 1173 К. В данном случае имеется керамический рекуператор из шамотных блоков, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Аналогичным образом работает печь, показанная в [Там же], отличающаяся от предыдущей тем, что её производительность равна не 110 т/ч, а 150 т/ч. Данная печь предназначена для выполнения операции нагрева перед прокаткой. Температура операции - (1473÷1573) К. Устройство для регенеративного теплоиспользования - металлический петлевой рекуператор. Температура подогрева воздуха-окислителя - 623 К. Температура дыма перед рекуператором - 1173 К. Здесь имеет место металлический петлевой рекуператор из шамотных блоков, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Для выполнения операции нагрева под ковку или штамповку применяется печь для безокислительного нагрева, показанная в [Там же]. Температура операции - (1473÷1573) К. Устройство для регенеративного теплоиспользования - металлический игольчатый рекуператор. Температура подогрева воздуха-окислителя - (523÷573) К. Температура дыма перед рекуператором - 1143 К. В данном конкретном случае имеется металлический игольчатый рекуператор, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Следующим рассматриваемым типом печей являются термические печи. Широкое практическое распространение получили термические печи, показанные в [Там же].

Для выполнения операции термообработки легированных сталей применяется термическая печь с шагающим подом, показанная в [Там же]. Температура операции - 1073 К. Устройство для регенеративного теплоиспользования - металлический игольчатый рекуператор. Температура подогрева воздуха-окислителя - 523 К. Температура дыма перед рекуператором - (1023÷1073) К. Здесь присутствует металлический игольчатый рекуператор, требующий интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Для термообработки или отжига труб применяется печь, показанная в [Там же]. Температура операции - 1173 К. Устройство для теплоиспользования - металлический термоблок. Температура подогрева воздуха-окислителя - (523573) К. Температура дыма перед рекуператором - 1023 К. Используемый в печи металлический термоблок может быть подвержен интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Заключительный пример печи может служить печь, предназначенная для отжига блюмов до 70 т, показана в [Там же]. Температура операции - (1023÷1073) К. Устройство для теплоиспользования - металлический игольчатый рекуператор. Температура подогрева воздуха-окислителя - 523 К. Температура дыма перед рекуператором - до 923 К. В этой печи реализован металлический игольчатый рекуператор, который необходимо подвергнуть интенсификации теплообмена предлагаемым методом.

Вышеприведённые печи непрерывным образом существенно дополняются последними разработками институтов Теплопроект, Стальпроект, ГМА, НИИМТ, Гипромез, Укргипромез, ИИГ АН Украины, МИСиС, УГТУ и т.п.

Окончательно резюмируя можно сказать, что во всех приведённых печах имеются как металлические, так и керамические рекуперативные теплообменные аппараты, в которых необходимо применять интенсификацию теплообмена с помощью поверхностных турбулизаторов потока в целях улучшения их массогабаритных и теплогидравлических характеристик.

9. Конструктивные характеристики перспективных рекуперативных теплообменных аппаратов с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства

В металлургическом производстве внутреннее теплоиспользование реализуется путём установки на дымовом тракте специального теплообменника рекуперативного типа для подогрева воздуха-окислителя.

Теплообменники изготовляются либо из металла, либо из огнеупорного керамического материала, которые устанавливаются на крупных печах металлургического производства.

Конструкции металлического теплообменника для металлургического производство показаны в. Интенсификация теплообмена в металлических теплообменниках с помощью применения турбулизаторов потока конструктивно показана, например, для двухсекционного игольчатого рекуператора, применяемого в металлургическом производстве в [Там же].

Керамическими рекуператорами оснащаются крупные методические нагревательные и термические печи. С точки зрения интенсификации теплообмена они могут быть подразделены на прямоугольные и многоугольные. Схема интенсификации теплообмена в прямоугольных каналах осуществляется так же, как и в плоских каналах с турбулизаторами [Там же].

Для многоугольных каналов интенсификация теплообмена осуществляется практически так же, как и для круглых труб с турбулизаторами [Там же].

В современных металлургических производствах различных схем включены теплообменные аппараты, модернизация которых требует интенсификации теплообмена. В качестве примера примера показана интенсификация теплообмена в теплообменном аппарате, применяемого при прямом восстановлении типа "BL" [22], в результате которого получается губчатое железо.

На Рис. 4 показано изменение конструкции теплообменников в результате применения поверхностных турбулизаторов потока.

Конструкция металлического теплообменника для металлургического производство показана на Рис. 5.

Интенсификация теплообмена в металлических теплообменниках с помощью применения турбулизаторов потока конструктивно показана на Рис. 6.

Более конкретно это показано на Рис. 7 для двухсекционного игольчатого рекуператора, применяемого в металлургическом производстве.

Керамическими рекуператорами оснащаются крупные методические нагревательные и термические печи.

С точки зрения интенсификации теплообмена они могут быть подразделены на прямоугольные и многоугольные.

Интенсификация теплообмена в прямоугольных каналах осуществляется так же, как и в плоских каналах с турбулизаторами (Рис. 8).

Для многоугольных каналов интенсификация теплообмена осуществляется так же, как и для круглых труб с турбулизаторами (Рис. 9).

10. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении теплоносителей в каналах

Наиболее подробно теория интенсификации рассматривалось в [9; 11; 12].

Решена задача математического моделирования интенсифицированного изотермического [4] и неизотермического теплообмена [5] при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов для труб с турбулизаторами [6].

Здесь рассматривались аспекты теории интенсификации в трубах с турбулизаторами для газообразных теплоносителей и теплоносителей в виде капельных жидкостей и вещества сверхкритического давления на основе многослойных моделей турбулентного пограничного слоя, влияние неизотермичности на теплообмен и сопротивление.

Вышеприведённое применение данного вида турбулизаторов в теплообменных аппаратах позволит при прочих равных условиях значительно интенсифицировать процесс теплообмена при относительно незначительной конструктивной девиации.

Интенсифицированный теплообмен рассчитывался и на основе интегральных соотношений для турбулентных пограничных слоёв, имеющих определённые преимущества перед многослойными моделями [9].

Локальные параметры течения и теплообмена детерминировались на основе низкорейнольдсовой модели Ментера [6], имеющие неоспоримые преимущества на данном этапе при расчёте пристенных течений. Многообразие имеющихся различных теорий, применяемых для расчёта интенсифицированного теплообмена обусловлен сложным характером реализуемых в процессе интенсификации физических процессов течения и теплообмена.

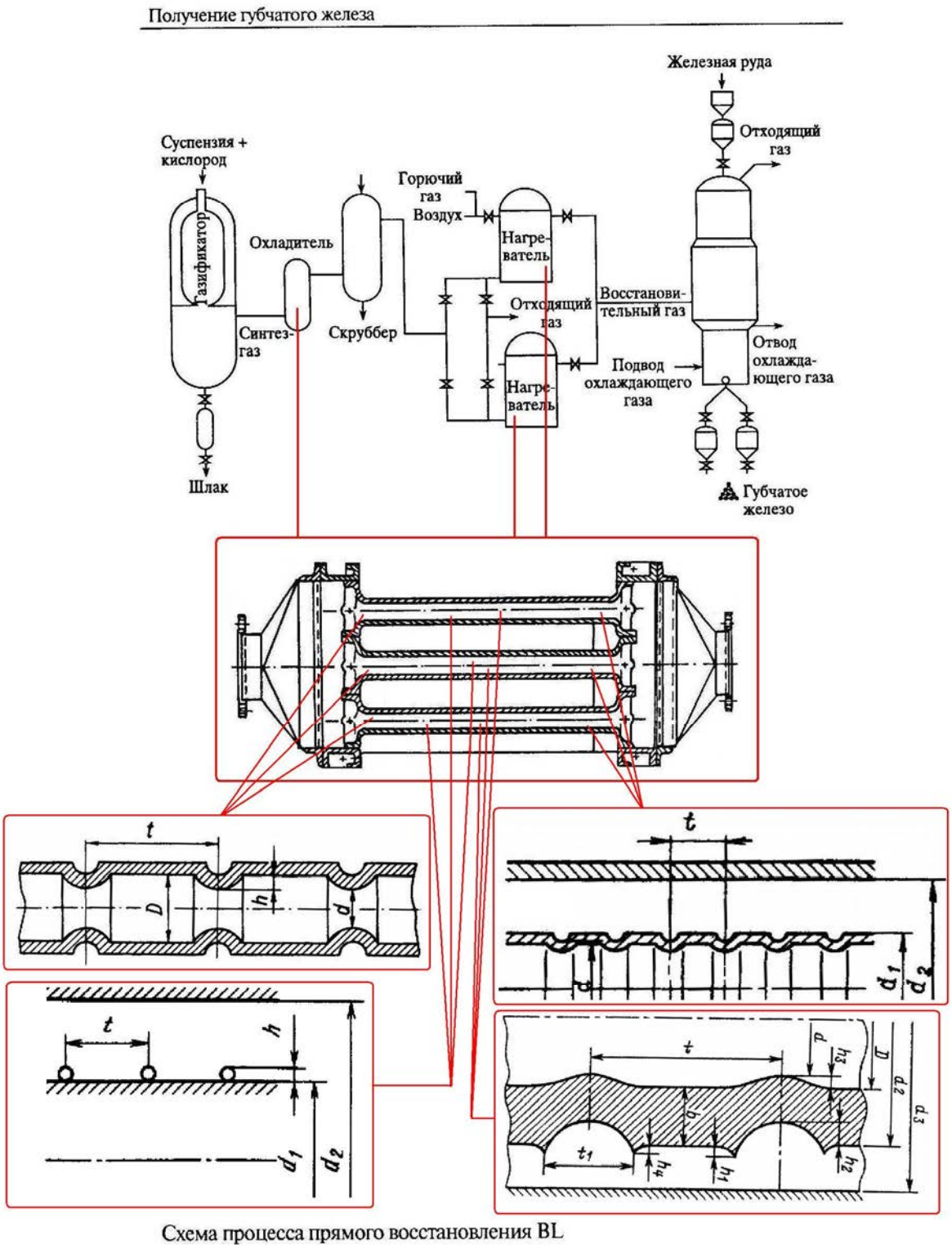
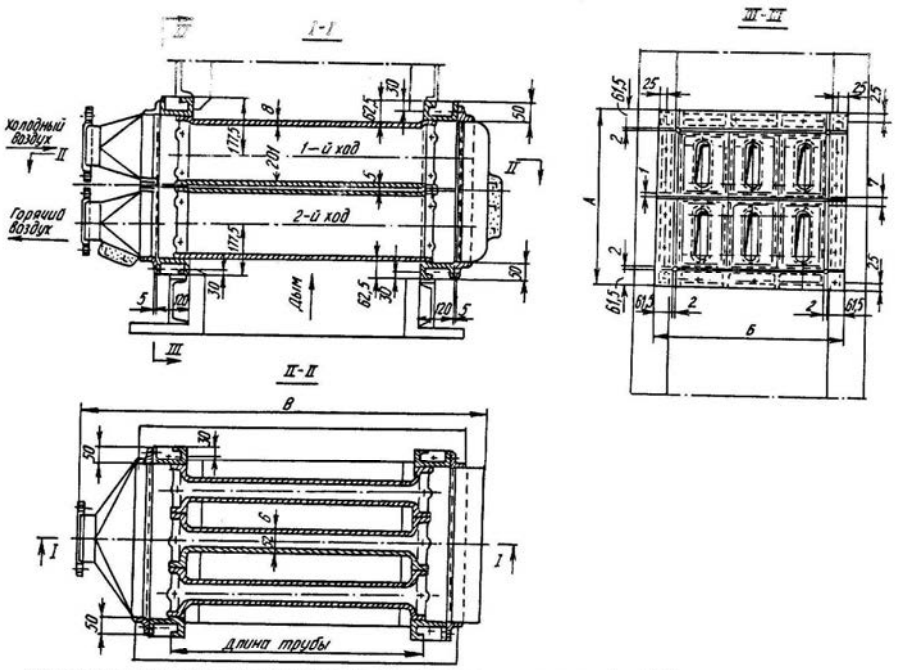
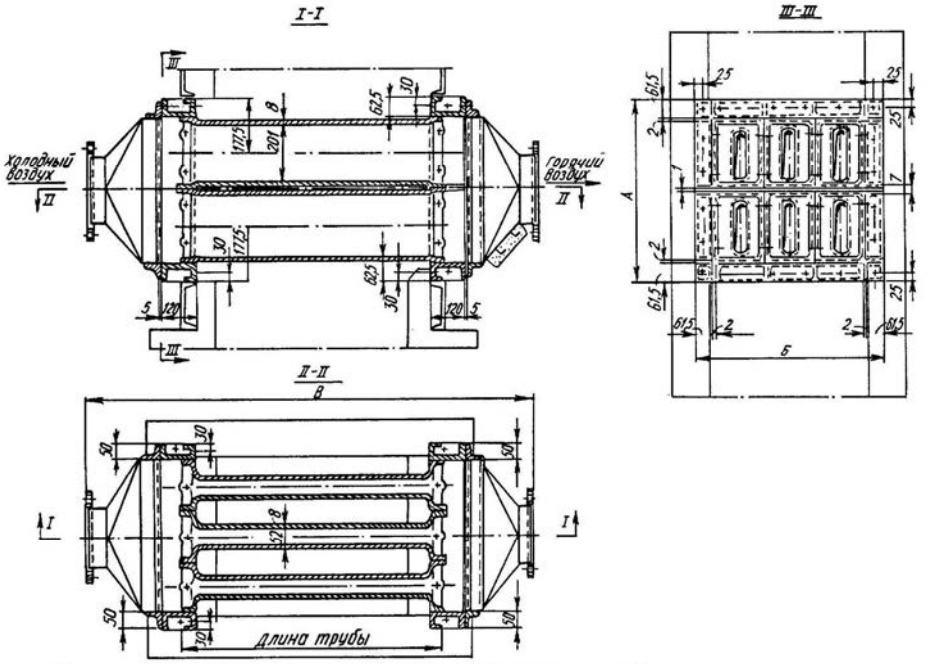


Рис. 4. *Интенсификация теплообмена длятеплообменников, применяемом в «процессе прямого восстановления BL»*



Пример компоновки одноходового игольчатого металлического рекуператора (тип 17,5)



Пример компоновки двухходового рекуператора из литых элементов типа 17,5

Рис. 5. *Металлические рекуператоры для металлургического производства*

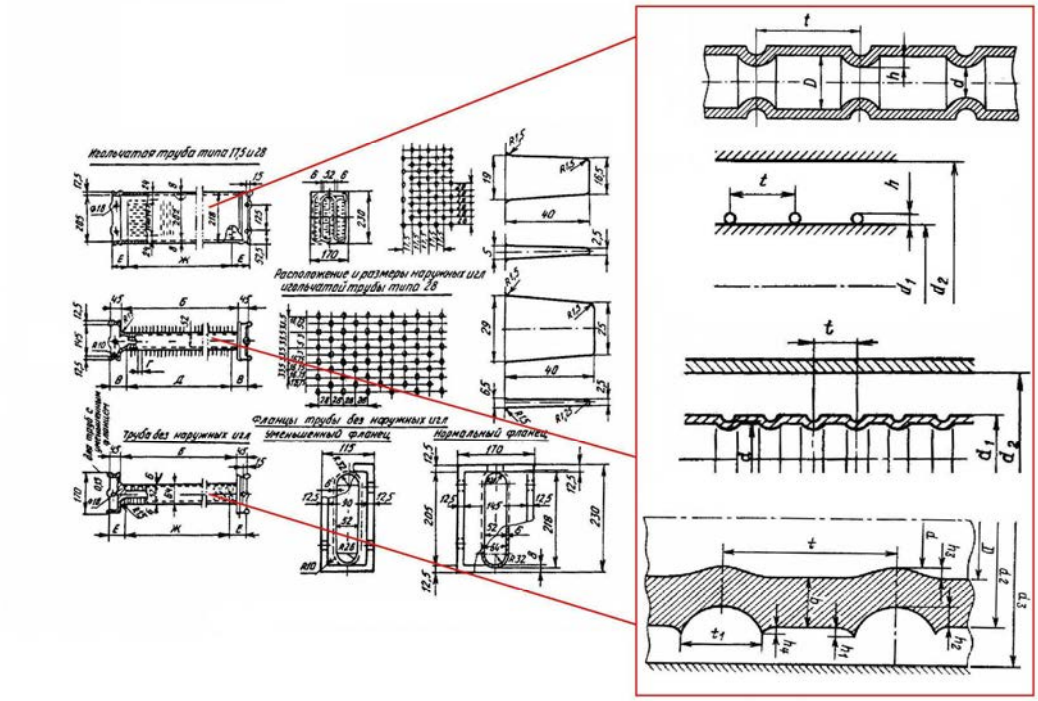


Рис. 6. *Интенсификация теплообмена для металлических рекуператоров металлургического производства*

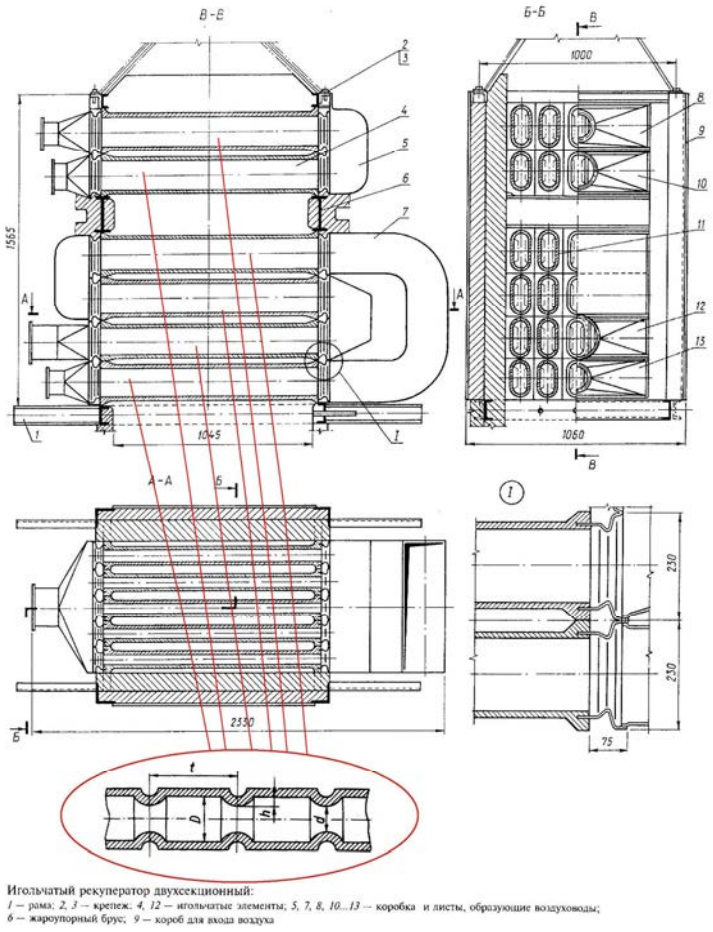


Рис. 7. *Интенсификация теплообмена для игольчатого рекуператора*

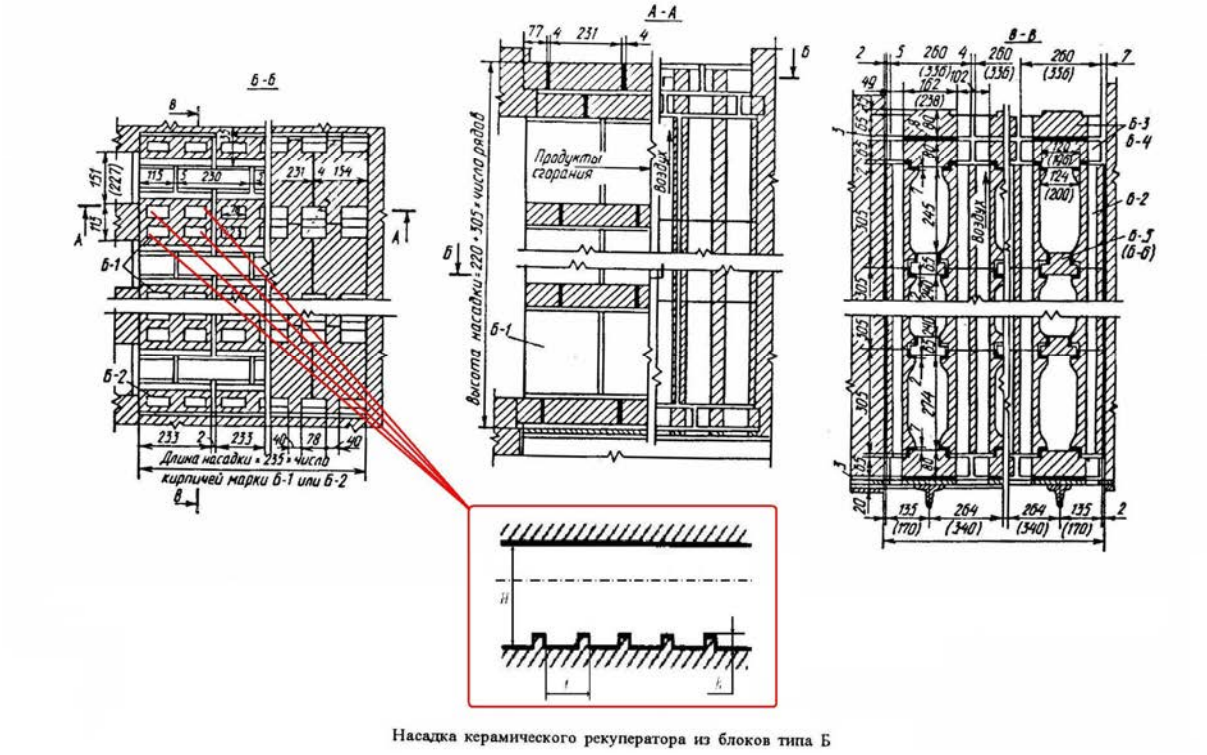


Рис. 8. *Интенсификация теплообмена для керамического рекуператора с прямоугольными каналами*

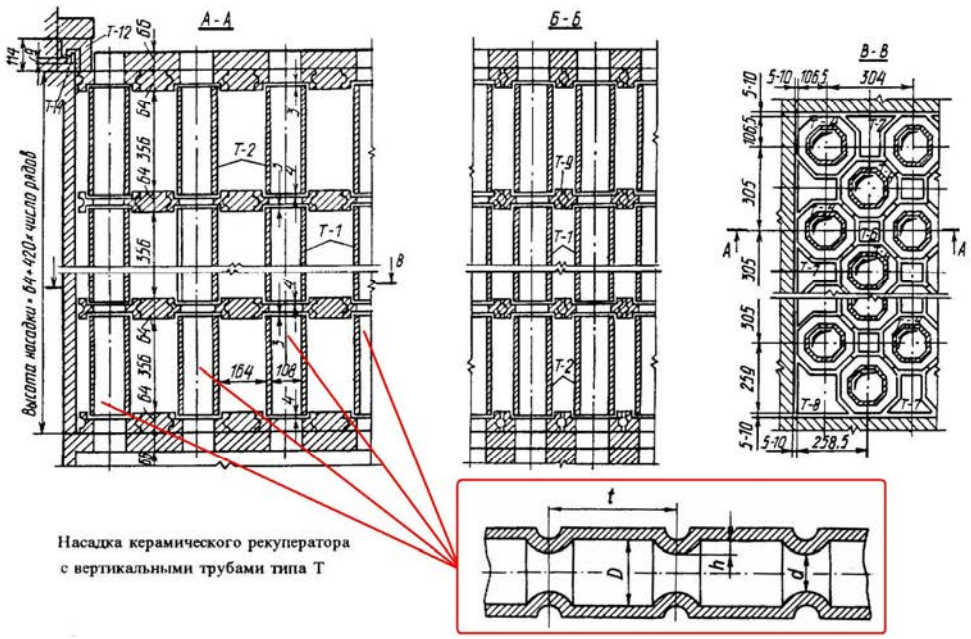


Рис. 9. *Интенсификация теплообмена для керамического рекуператора с многоугольными каналами*

Развитие основных теорий стало математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов для кольцевых [7] и плоских каналов [9] с турбулизаторами и канавками, а также теория предельного теплообмена.

Были рассмотрены неосновные аспекты расчёта интенсифицированного теплообмена для расчёта продольно обтекаемых труб с турбулизаторами при турбулентном течении [Там же].

При дальнейшем развитии теория интенсификации с единых позиций реализует математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя для круглых труб, кольцевых, плоских каналов с турбулизаторами, канавками и их комбинаций.

Супермногослойный подход был реализован к расчёту интенсифицированного теплообмена для продольно обтекаемых труб с турбулизаторами, канавками и комбинированными турбулизаторами типа "выступ-канавка" при турбулентном течении. Рассматривались также аспекты шероховатых труб с турбулизаторами, высоких чисел Рейнольдса, очень высоких турбулизаторов, предельного теплообмена с точки зрения турбулизации потока и т.д. и т.п.

Вышеуказанная теория позволяет в дальнейшем детерминировать показатели эффективности применения интенсификации теплообмена, т.к. позволяет рассчитать $Nu/Nu_{гл}$ и $\xi/\xi_{гл}$.

11. Эффективность применения теплообменных аппаратов с интенсифицированными теплообменом

Применения интенсификации теплообмена позволяет улучшить массогабаритные показатели теплообменных аппаратов, повысить их тепловую эффективность, снизить гидравлические потери на прокачку теплоносителя, в так же понизить температуру стенок теплообменника.

Основные улучшенные показатели эффективности теплообменных аппаратов, детерминированные с помощью сгенерированной теории [5; 6; 7; 9; 10; 23], хорошо коррелируют с существующими экспериментальными данными

Одним из основных показателей эффективности применения интенсификации теплообмена является отношение объёмов двух теплообменных аппаратов - одного с гладкими поверхностями и другого с приспособлениями для интенсификации теплообмена: при этом оба сравниваемых теплообменника должны иметь одинаковую тепловую мощность, расходы теплоносителя и потери давления на его прокачку [8].

В [8; 11; 12] показаны зависимости изменения объёма теплообменника от глубины накатки как для различных шагов между турбулизаторами, так и для фиксированного шага при различных режимах течения теплоносителя [Там же].

В [Там же] показаны минимумы относительных объёмов теплообменников в зависимости от определяющих параметров.

Ещё одним показателем эффективности является влияние основного геометрического параметра турбулизаторов - глубины накатки - на изменение тепловой мощности, гидравлического сопротивления теплообменного аппарата и на изменение объёма теплообменника при различных соотношениях коэффициентов теплоотдачи с наружной и внутренней сторон теплообменного аппарата [8].

На данных [11; 12] а видны для различных относительных шагов между турбулизаторами максимумы повышения тепловой мощности теплообменника, видны соответствующие минимумы гидравлического сопротивления теплообменника, минимумы относительных объёмов теплообменных аппаратов при различных соотношениях коэффициентов теплоотдачи снаружи и внутри теплообменника.

В [8; 11; 12] показаны для различных относительных шагов между турбулизаторами максимумы повышения тепловой мощности теплообменника.

В [Там же] показаны соответствующие минимумы гидравлического сопротивления теплообменника. В [Там же] показаны минимумы относительных объёмов теплообменных аппаратов при различных соотношениях коэффициентов теплоотдачи снаружи и внутри теплообменника [8].

Кроме вышеперечисленных основных показателей эффективности применения интенсификации теплообмена можно назвать так же снижение длины теплообменного аппарата, снижение площади поперечного сечения теплообменного аппарата вследствие применение интенсификации теплообмена. Например, в [8; 11; 12] показаны зависимости длины теплообменника и площади его поперечного сечения соответственно от глубины накатки *d/D* при различных шагах накатки *t/D*, которые позволяют выявить уровень их снижения в зависимости от соответствующих геометрических и режимных параметров [8].

Расчётные данные позволяют выявить минимумы снижения длин и поперечных сечений теплообменников за счёт применения турбулизаторов. Имеющаяся сгенерированная теория [5; 6; 7; 9; 10; 23] позволяет с достаточной точностью количественно рассчитать улучшение показателей перспективных теплообменных аппаратов с интенсифицированным теплообменом, применяемых с современном металлургическом производстве.

Для оценки эффективности при турбулентном течении при одинаковом числе Рейнольдса применяются следующие классические зависимости - (1)-(3) - (отношение площадей или числа труб, длин теплообменников, объёмов теплообменников с интенсификацией и без интенсификации соответственно) [8; 11; 12]:

$$\frac{F}{F_{ГЛ}} = \frac{N}{N_{ГЛ}} = \sqrt{\frac{(\xi/\xi_{ГЛ})_{Re}}{(Nu/Nu_{ГЛ})_{Re}}}; \quad (1)$$

$$\frac{V}{V_{ГЛ}} = \frac{(\xi/\xi_{ГЛ})_{Re}^{0,4}}{(Nu/Nu_{ГЛ})_{Re}^{1,4}}; \quad (2)$$

$$\frac{l}{l_{\text{ГЛ}}} = \frac{\left(\xi/\xi_{\text{ГЛ}}\right)_{\text{Re}}^{-0,1}}{\left(\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{ГЛ}}\right)_{\text{Re}}^{0,9}}. \quad (3)$$

Теоретические расчётные данные позволяют заключить, что применение турбулизаторов потока в целях интенсификации теплообмена в трубах теплообменников, применяемых в современном металлургическом производстве, очень эффективно - оно позволяет увеличить тепловую мощность теплообменника при снижении его гидросопротивления и улучшить его массогабаритные показатели [5; 6; 7; 9; 10; 23].

12. Основные выводы

1. В работе показано, что теоретическое исследование интенсификации теплообмена имеет преимущества перед экспериментальными исследовании, поэтому его необходимо применять для совершенствования теплообменников металлургического производства.

2. Применение турбулизации потока в целях интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах металлургического производство может проводиться без значительных конструктивных изменений при высоком эффекте.

3. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена позволяет детерминировать теплогидравлические характеристики перспективных теплообменников, применяемых в современном металлургическом производстве, которые могут быть использованы для определения эффективности применения интенсификации теплообмена.

4. Теория интенсификации теплообмена позволяет рассчитать улучшение массогабаритных показателей теплообменных аппаратов современного металлургического производства, повысить их тепловую эффективность, снизить гидравлические потери на прокачку теплоносителя, в так же понизить температуру стенок теплообменника, что обусловливает их дальнейшее совершенствование.

5. Применения интенсификации теплообмена позволяет улучшить массогабаритные показатели теплообменных аппаратов современного металлургического производства, повысить их тепловую эффективность, снизить гидравлические потери на прокачку теплоносителя, в так же понизить температуру стенок теплообменника.

6. Имеющаяся сгенерированная теория [4-6; 11; 12; 22; 23] позволяет с достаточной точностью количественно рассчитать улучшение показателей перспективных теплообменных аппаратов с интенсифицированным теплообменом, применяемых с современном металлургическом производстве, что обусловливает её дальнейшее совершенствование.

7. Теоретические расчётные данные позволяют заключить, что применение турбулизаторов потока в целях интенсификации теплообмена в трубах теплообменников, применяемых в современном металлургическом производстве, очень эффективно [10-12] с точки зрения увеличения тепловой мощности теплообменника при снижении его гидросопротивления, улучшения его массогабаритных показателей.

Список литературы

1. **Арутюнов В. А., Миткалинный В. И., Старк С. В.** Металлургическая теплотехника. М.: Металлургия, 1974. Т. 1. 269 с.
2. **Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности** / Н. А. Семененко, Л. И. Куперман, С. А. Романовский и др. Киев: Вища школа, 1979. 416 с.
3. **Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е.** Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 223-230.
4. **Дрейцер Г. А., Лобанов И. Е.** Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 54-60.
5. **Дрейцер Г. А., Лобанов И. Е.** Моделирование неизотермических теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Там же. № 3. С. 27-31.
6. **Дрейцер Г. А., Лобанов И. Е.** Моделирование неизотермических теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей в виде капельной жидкости в условиях интенсификации теплообмена // Известия РАН. Энергетика. 2005. № 2. С. 88-100.
7. **Дрейцер Г. А., Лобанов И. Е.** Моделирование теплообмена в кольцевых каналах с турбулизаторами с помощью семислойной модели турбулентного пограничного слоя // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 2. С. 184-188.
8. **Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Копп И. З.** Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
9. **Лобанов И. Е.** Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М., 2005. 632 с.
10. **Лобанов И. Е., Мякочин А. С., Низовитин А. А.** Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами на базе уравнения баланса турбулентной пульсационной энергии // Вестник МАИ. 2007. Т. 14. № 4. С. 13-22.
11. **Лобанов И. Е., Штейн Л. М.** Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства (общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве): в 4-х т. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. Т. I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. 405 с.

12. **Лобанов И. Е., Штейн Л. М.** Указ. соч. Т. II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. 290 с.
13. **Мигай В. К.** Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат (Ленинградское отделение), 1987. 263 с.
14. **Невский А. С.** Лучистый теплообмен в печах и топках. М.: Металлургия, 1971. 198 с.
15. **Промышленные теплотехнологии**: в 5 т. / под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. Минск: Вышэйшая школа, 1995-2000. 1812 с.
16. **Расчёты нагревательных и термических печей** / С. Б. Василькова, М. М. Генкина, В. Л. Гусовский и др.; под ред. В. М. Тымчака и В. Л. Гусовского. М.: Металлургия, 1983. 326 с.
17. **Тебеньков Б. П.** Рекуператоры для промышленных печей. М.: Металлургия, 1975. 182 с.
18. **Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах** / Ю. И. Розенгарт, Б. В. Потапов, В. М. Ольшанский и др. Киев: Вища школа, 1986. 232 с.
19. **Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах** / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов и др. Минск: Вышэйшая школа, 1992. 314 с.
20. **Тимошпольский В. И.** Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Минск: Навука і тэхника, 1995. 263 с.
21. **Хаузен Х.** Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрёстном токе. М.: Энергоиздат, 1981. 384 с.
22. **Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф.** Металлургия железа. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 464 с.
23. **Dreitser G. A., Lobanov I. E.** Modelling of heat transfer and hydraulic resistance of turbulent gas and liquid flow in tubes with circular turbulizers // International journal of heat exchangers. 2006. V. VII. № 2. P. 231-249.

УДК 532

Нэлли Петровна Онуфриева, Ольга Анатольевна Пыркова
ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

ПЕРЕХОД К ПОЛЯРНЫМ КООРДИНАТАМ В МОДЕЛИ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА©

Работа поддержана АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.1/500 и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

В настоящей работе рассматривается плоская задача о движении кругового цилиндра с горизонтальной образующей в поле силы тяжести.

Здесь x, y - декартовы прямоугольные координаты в плоскости перпендикулярной образующей цилиндра, $u = \dot{x}$, $v = \dot{y}$, $\mathbf{u} = (u, v) = (u_r, u\ )$ - вектор скорости в декартовой прямоугольной и полярной системах координат соответственно; - положительная постоянная; $\mathbf{f}_g = (0, -g)$, g - ускорение свободного падения; P - заданное давление.

В задаче обтекания горизонтального цилиндра, в уравнении движения [1]

$$\mathbf{u}_t + (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} + \frac{\mathbf{u}}{2}\operatorname{div}\mathbf{u} - -\Delta\mathbf{u} = \mathbf{f}_g - \frac{1}{}\nabla P \tag{1}$$

естественно перейти к полярным координатам

$$x = r\cos\quad,\ y = r\sin\quad, \tag{2}$$

центр которой расположен на оси цилиндра, а полярный угол отсчитывается от положительного направления оси абсцисс декартовой прямоугольной системы координат.

Согласно [3] уравнение (1) в полярных координатах принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_r}{\partial t} + \dfrac{3u_r}{2}\dfrac{\partial u_r}{\partial r} + \dfrac{u}{r}\dfrac{\partial u_r}{\partial} + \dfrac{u_r}{2r}\dfrac{\partial u}{\partial} - \dfrac{u^{\ 2}}{r} + \dfrac{u_r^{\ 2}}{2r} \\ \qquad - -\left(\dfrac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_r}{\partial r} + \dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial^2 u_r}{\partial^{\ 2}} - \dfrac{2}{r^2}\dfrac{\partial u}{\partial} - \dfrac{u_r}{r^2}\right) = -g\sin\quad - \dfrac{1}{}\dfrac{\partial P}{\partial r}, \\ \dfrac{\partial u}{\partial t} + \dfrac{u}{2}\dfrac{\partial u_r}{\partial r} + u_r\dfrac{\partial u}{\partial r} + \dfrac{3u}{2r}\dfrac{\partial u}{\partial} + \dfrac{3u_r u}{2r} \\ \qquad - -\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u}{\partial r} + \dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial^2 u}{\partial^{\ 2}} + \dfrac{2}{r^2}\dfrac{\partial u_r}{\partial} - \dfrac{u}{r^2}\right) = -g\cos\quad - \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial P}{\partial}. \end{cases} \tag{3}$$

© Онуфриева Н. П., Пыркова О. А., 2010