

**Грес Л.П.
Карпенко С.А.
Науменко А.А.
Иващенко В.П.
Ерёмин А.О.
Каракаш Е.А.
Гупало Е.В.**

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВА ДОМЕННОГО ДУТЬЯ

МОНОГРАФИЯ

**Под общей редакцией доктора технических наук, профессора
ЛЕОНИДА ПЕТРОВИЧА ГРЕСА**

ПОСВЯЩАЕТСЯ

**Научному и творческому
сотрудничеству коллективов
концерна «СоюзЭнерго»**

и

**Национальной металлургической
академии Украины**

**ДНЕПР
2021**

УДК 629.162.2:658.567.1

ББК 31.3

Г80

Рекомендовано ученым советом Национальной металлургической академии Украины

Рецензенты: Маслов В.А. – доктор технических наук, профессор кафедры тепло-энергетических установок и теплоснабжения, ПТТЭУ, г. Мариуполь)
Меркулов А.Е. – доктор технических наук, зам. директора Института черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной Академии наук Украины (г. Днепр)

Авторы благодарят сотрудников кафедры ЭТОТ НМетАУ:

к.т.н., доц. А.В. Сибиря, к.т.н. Ю.М. Флейшмана, к.т.н. Т.В. Самойленко, А.Е. Быстрова, сотрудников концерна «СоюзЭнерго»: А.С. Лушникова, Н.И. Мулявку, С.А. Науменко, Н.Е. Ковтун, Н.А. Мусиенко за участие в выполнении научных исследований.

Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья:

Г80 Монография / Л.П. Грес, С.А. Карпенко, А.А. Науменко, В.П. Иващенко, А.О. Еремин, Е.А. Каракаш, Е.В. Гупало / под общей ред. д.т.н., проф. Л.П. Греса. – Д.: 2021. – 612 с.

ISBN 978-617-518-207-9

Приведена общая характеристика теплообменников регенеративного и рекуперативного типов и методы повышения энергоэффективности, а также способы модернизации существующих воздухонагревателей и теплообменников для нагрева компонентов горения.

Предназначена для специалистов металлургических и машиностроительных предприятий, проектных и научно-исследовательских институтов, а также студентов, аспирантов и докторантов металлургических специальностей вузов.

УДК 629.162.2:658.567.1

ББК 31.3

ISBN 978-617-518-207-9 © Л.П. Грес, С.А. Карпенко, А.А. Науменко, В.П. Иващенко, А.О. Еремин, Е.А. Каракаш, Е.В. Гупало, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Горно-металлургический комплекс является базовой отраслью промышленности, однако черная металлургия страны потребляет до 30 % общего расхода теплоносителей в промышленности, при этом удельные расходы условного топлива на производство 1 т. Чугуна составляет 637,8 кг/т, в странах ЕС – 483,4, а в Китае – 474,4 кг/т.

Энергоэффективная технология – это технология, при которой энергетические и материальные ресурсы имеют минимальные удельные значения (расходы топлива, электроэнергии, воды, пара, различных материалов), а также вредных выбросов в атмосферу.

Доля потребления твердого топлива в черной металлургии составляет 55 % от общего потребления энергоносителей, а на металлургическом заводе с полным циклом доля твердого топлива составляет 95 %. Доменный цех и связанный с ним сырьевой комплекс – крупнейшие потребители ископаемых топлив. В настоящее время расход топлива в целом по металлургическому комплексу, отнесенный к 1 т. выплавляемого чугуна, очень высокий и составляет более 1,6 т. условного топлива.

Удельный расход кокса, характеризующий энергоэффективность доменного производства, в значительной степени зависит от количества вдуваемых в доменную печь заменителей кокса (пылеугольное топливо, природный газ, мазут и пр.), качества шихтовых материалов и уровня температур горячего дутья. Последний определяется эффективностью работы воздухонагревателей, сроком их службы и режимами сжигания топлива.

Нагрев доменного дутья требует особенного подхода для решения проблем от проектирования воздухонагревателей до их эксплуатации. При усовершенствовании режимов сжигания топлива необходимо рассматривать вопросы как высвобождения природного газа, так и повышения стойкости кладки и снижения вредных выбросов в окружающую среду. Увеличение кампании воздухонагревателей приводит не только к уменьшению инвестиций, но и к экономии кокса, так как при преждевременной остановке на ремонт одного из 4^х воздухонагревателей наблюдается снижение температуры дутья на 50-80 °С, что приводит к увеличению удельного расхода кокса на 8-10 кг/т.

Для обеспечения температуры дутья 1150-1250 °С уровень теплоты сгорания доменного газа является недостаточным, поэтому его обычно обогащают природным газом в количестве, что соответствует 15-20 млн. м³ в год для доменной печи объемом 1513 м³. В то же время теплота отходящих дымовых газов не используется, что приводит к перерасходу топлива.

Известно, что капитальные затраты на увеличение энергоэффективности в 3-4 раза меньше затрат на производство энергоносителей. Поэтому сбережение энергоресурсов для Украины является приоритетным направлением, одним из важных факторов обеспечения конкурентоспособности продукции на мировом рынке.

Экономия энергетических и материальных ресурсов обеспечивает не только экономический эффект, но и улучшает экологическую обстановку промышленных зон. Уменьшение расхода топлива пропорционально снижает выбросы вредных веществ, потребление кислорода и выделение теплоты в окружающую среду. При этом улучшается экологическая ситуация в местах добычи топлива, сырья, а также на огнеупорных заводах.

При подготовке монографии авторы использовали обобщенные результаты научных разработок Концерна «СоюзЭнерго» и кафедры экологии, теплотехники и охраны труда Национальной металлургической академии Украины, включая материалы докторской диссертации (разделы: 5; 8.4.4; 8.8; 10.1; 10.2; 11) кандидата технических наук, доцента Каракаша Е.А.

1. НАГРЕВ ДОМЕННОГО ДУТЬЯ В ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯХ

1.1. Развитие конструкций доменных воздухонагревателей

Первоначально (начиная с 1828 г.) доменное дутьё нагревали в чугунных рекуператорах [1]. При этом температура дутья не превышала 300-400 °С, но это позволило снизить удельный расход кокса на 50-60 % по сравнению с холодным дутьём.

Значительный эффект от увеличения температуры дутья и невозможность достичь этого с помощью рекуператоров привели к их замене на отапливаемые регенераторы, предложенные в 1857 г. Е.А. Каупером. Поэтому эти регенераторы называют кауперами или доменными воздухонагревателями.

В дальнейшем наблюдалось развитие различных по конструкции и тепловой мощности воздухонагревателей, в том числе комбинированных (рекуперативно-регенеративных) [2, 3].

В настоящее время наибольшее распространение получили воздухонагреватели с внутренней боковой камерой горения. Они громоздкие, материалоемкие и соответственно дорогие. Например, блок из четырёх воздухонагревателей доменной печи 3000 м³ имеет высоту 50 м, наружный диаметр 10 и 11 м соответственно для нижней и высокотемпературной зон, масса огнеупорных материалов на блок составляет около 20 тыс. т, тепловая мощность – 200 МВт, нагревают дутьё до 1100-1200 °С в количестве до 5700-6000 м³/мин.

Такой воздухонагреватель (рис. 1.1) представляет собой цилиндр, который сверху закрыт полусферическим куполом 1, а снизу – плоским днищем 2, закрепленным в фундаменте 3 анкерами. Кожух выполняется сварным из низколегированных конструкционных сталей 09Г2С или 10Г2С1 толщиной 20-30 мм и хорошо герметизирован.

Кожух защищают от воздействия высоких температур огнеупорной многослойной кладкой. Она состоит из нескольких слоёв: внутренний выполняется из плотного высокоогнеупорного материала, тип которого зависит от температурных зон (динас, муллито-корундовые огнеупоры типа МКВ-72, шамот класса А), далее следует теплоизоляционный слой (шамот-легковес, динас – легковес) и слой, компенсирующий температурное расширение кладки при её разогреве (муллито-кремнеземистые плиты).

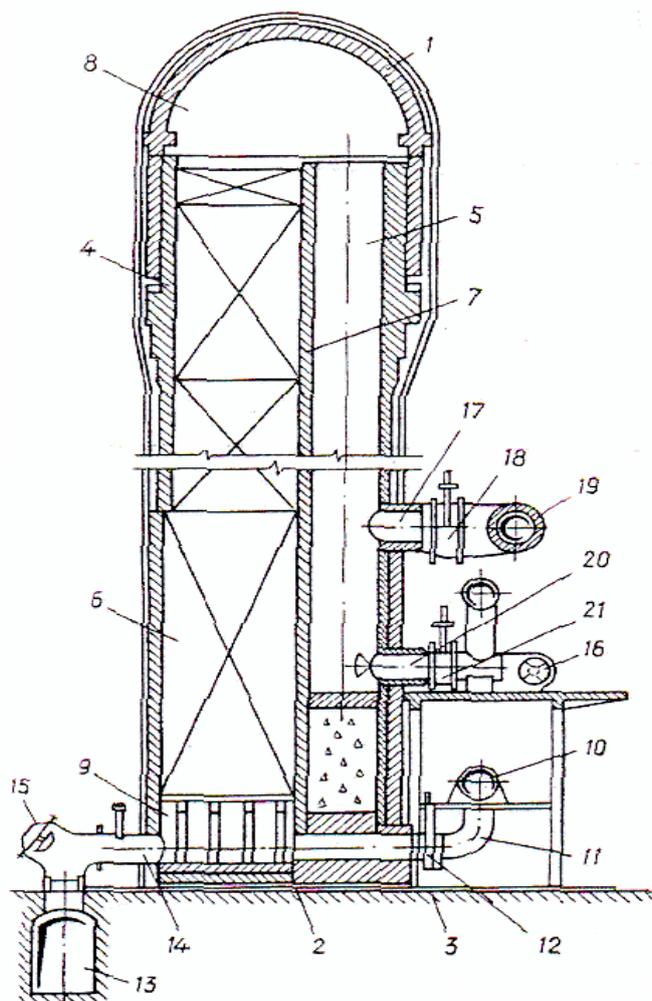


Рис. 1.1. Общий вид воздухонагревателя с внутренней камерой горения:

- 1 – купол; 2 – днище; 3 – фундамент;
- 4 – стена; 5 – камера горения;
- 6 – камера насадки;
- 7 – разделительная вертикальная стена;
- 8 – подкупольное пространство;
- 9 – поднасадочное пространство;
- 10 – трубопровод холодного дутья;
- 11 – патрубок холодного дутья;
- 12 – шибер холодного дутья;
- 13 – дымовой боров;
- 14 – дымовой патрубок;
- 15 – дымовой клапан;
- 16 – вентилятор горелки;
- 17 – штуцер горячего дутья;
- 18 – шибер горячего дутья;
- 19 – воздухопровод горячего дутья;
- 20 – газовая горелка;
- 21 – шибер горелки

Для снижения тепловых потерь и обеспечения независимости расширения кладки купола и стен толщина радиальных стен в верхней части увеличена, а купол опирают на дополнительные стены 4.

С целью создания более газоплотной и прочной кладки предусматривают определенный подпор со стороны кожуха на кладку при её расширении (около $2 \cdot 10^5$ Па).

Внутреннее пространство воздухонагревателя состоит из камеры горения 5 и камеры насадки 6, разделенных вертикальной стеной 7, подкупольного и поднасадочного пространства 8, 9. Последнее соединено с трубопроводом холодного дутья 10 с помощью патрубка 11 с шибером холодного дутья 12, а также с дымовым бором 13 посредством двух дымовых патрубков 14 с клапанами 15. Обычно нижняя часть камеры горения на высоту 2,5-3,5 м заполняется боем кирпича и не используется. Выше этой границы устанавливают газовую горелку. На практике используют в основном два типа горелок:

металлическая типа "труба в трубе" или керамическая с отдельным подводом газа и воздуха в камеру сгорания.

Воздух на сгорание подают с помощью индивидуального вентилятора *16* или системы централизованной подачи воздуха с помощью одного мощного вентилятора, иногда с очисткой воздуха от пыли.

Для отбора горячего дутья в средней части камеры сгорания установлен штуцер горячего дутья *17* с шибером *18*, соединенный с фурмами доменной печи посредством прямого *19* и кольцевого воздухопроводов.

Камера насадки *6* заполнена огнеупорным кирпичом или блоками таким образом, что образуется большое количество вертикальных сквозных каналов. Насадка является основным теплообменным элементом воздухонагревателя.

В период нагрева с помощью газовой горелки *20* сжигают топливо (природно-доменную или коксодоменную смесь или чистый доменный газ) в камере сгорания. Образующиеся продукты сгорания поднимаются вверх по камере сгорания, проходят подкупольное пространство и под действием тяги дымовой трубы и давления газозадушной смеси устремляются вниз по каналам насадки. Проходя по этим каналам, продукты сгорания отдают теплоту насадочному огнеупору, нагревая его. Температура продуктов сгорания на входе в насадку поддерживается постоянной и составляет 1300-1450 °С (в зависимости от типа применяемых воздухонагревателей и огнеупоров). На выходе же из насадки их температура увеличивается от 100-150 °С в начале нагрева до 350-400 °С в конце нагрева, затем продукты сгорания проходят через поднасадочное пространство *9*, дымовые патрубки *14*, боров *13* и через дымовую трубу выбрасывают в атмосферу.

В период нагрева шибера холодного и горячего дутья *12*, *18* закрыты, а шибер газовой горелки *21* и дымовые клапаны *15* открыты.

В период охлаждения холодное дутьё с постоянной температурой 80-150 °С (в зависимости от давления дутья) поступает через патрубок холодного дутья *11* в поднасадочное пространство *9*, а затем в каналы насадки. При движении дутья в каналах происходит его нагревание за счет аккумулированной теплоты насадочным огнеупором в период нагрева, затем горячее дутьё проходит через подкупольное пространство *8*, часть камеры сгорания, штуцер *17* в тракт горячего дутья и попадает в доменную печь. При этом шибера холодного и горячего дутья открыты, а шибер горелки и дымовые клапаны закрыты.

Температура нагреваемого дутья на выходе из воздухонагревателя переменна: в начале периода охлаждения насадки она максимальная и практически равна температуре продуктов сгорания на входе в насадку, а затем уменьшается и в конце нагрева она снижается на 150-200 °С. Для поддержания постоянной температуры дутья, поступающего в доменную печь, используют автоматическую систему, в которой применяют подмешивание части холодного дутья к горячему. Расход дутья, проходящего через насадку, переменный и он регулируется с помощью смесительного клапана, который часть дутья от общего его расхода пропускает, минуя насадку, и подмешивает к горячему дутью, снижая тем самым его температуру до заданного уровня. Датчиком служит термопара, установленная в воздухопроводе горячего дутья.

Такой способ регулирования температуры горячего дутья неэффективен, поскольку его температура стабилизируется на уровне минимального значения, которое имеет место в конце дутьевого периода. При наличии четырех воздухонагревателей в блоке печи для стабилизации температуры горячего дутья можно использовать попарно-параллельный режим работы воздухонагревателей. В этом случае на дутье находятся два аппарата и их длительность дутья смещена на полпериода. Поэтому при смешивании двух более и менее нагретых потоков дутья происходит стабилизация температуры общего расхода дутья.

Обеспечение попарно-параллельного режима работы воздухонагревателей вызывает определенные трудности, а иногда невозможно его осуществить. Это связано с тем, что необходимо сжигать увеличенное количество газа (примерно в 1,5 раза), предусмотреть мероприятия, связанные с увеличением давления газа и воздуха горения перед горелкой (в 2,0-2,5 раза), установить клапаны для автоматической регулировки расхода холодного дутья у каждого воздухонагревателя.

Длительность периода дутья при последовательном режиме работы воздухонагревателей составляет $\tau_0 = (m - 1) \cdot \tau_n$, а при попарно-параллельном – $\tau_0 = \tau_n$, где n – количество воздухонагревателей в блоке печи, а τ_n – длительность периода нагрева.

Воздухонагреватели отапливают доменным газом, а когда его теплота сгорания не обеспечивает заданную температуру под куполом, то его обогащают природным газом (2,5-4,5 % об.) или же подогревают доменный газ и вентиляторный воздух.

На рис. 1.2 показано изменение температуры теплоносителей (продукты сгорания, воздух) и насадки в течение периодов нагрева (охлаждения) по высоте насадки. Из рисунка видно, что температура дыма t_d на входе в регенератор остается постоянной, а на выходе из него (период насадки) возрастает: $t_d^{\text{кон}} > t_d^{\text{нач}}$.

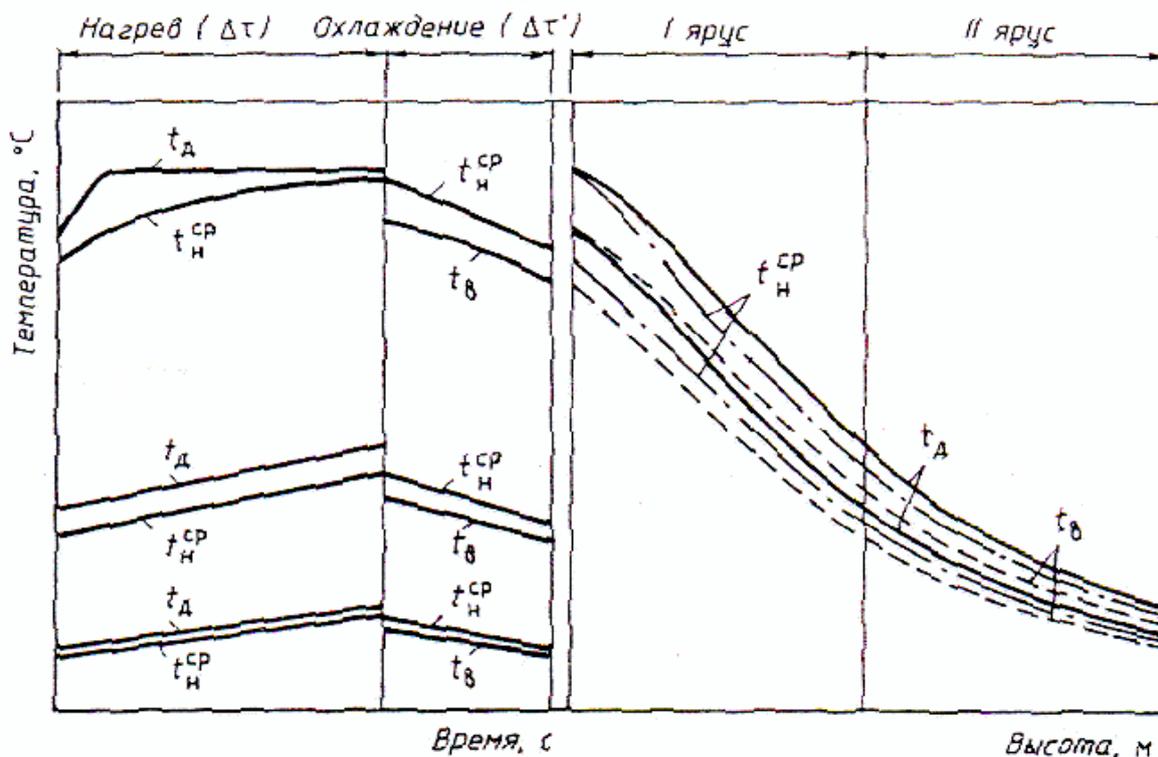


Рис. 1.2. Изменение температуры дыма t_d , кирпича насадки t_n^{cp} и воздуха t_b в течение цикла работы регенератора и по его высоте

В период охлаждения насадки воздухом справедливо соотношение $t_b^{\text{кон}} > t_b^{\text{нач}}$, где $t_b = \text{const}$, и соответственно во времени $t_b^{\text{кон}} > t_b^{\text{нач}}$.

При переключениях воздухонагревателей с режима нагрева на дутьё и наоборот – с дутья на нагрев необходима пауза, в период которой воздухонагреватель не отапливается, а дутьё не нагревается.

При периоде с режимом нагрева на дутьё закрывают газовые дроссели, и прекращается подача газа. Затем отключается электродвигатель вентилятора горелки и рабочее колесо вентилятора, двигатель по инерции, во избежание взрыва, обеспечивает вентиляцию рабочего пространства воздухонагревателя в течение около 1,5 мин. Затем закрывается шибер горелки 21 и дымовой клапан 15. Таким образом, в этот момент воздухонагреватель отделен, т.к. у него закрыты: шибера холодного, горячего дутья и горелки; газовые дроссели и

дымовой клапан. Затем открывается перепускной клапан (на рис. 1.1 не показан) и воздухонагреватель наполняется дутьём до заданного давления. После этого открываются шиберы холодного *12* и горячего дутья *18*, и в доменную печь поступает нагретое дутьё от этого воздухонагревателя.

При переходе с режима дутья на нагрев закрываются шиберы холодного *12* и горячего дутья *18* и открывается перепускной клапан для снижения давления в воздухонагревателе до атмосферного. При этом остаток дутья не направляется в дымовой боров, как это было предусмотрено ранее, а проходит через специальную свечу и выбрасывается в атмосферу. В этом случае на некоторых заводах предусматривают специальный глушитель.

На рис. 1.3 представлена схема комплекса доменной печи с газовыми и воздушными магистралями, оборудованные отделительными и регулирующими устройствами. Она включает собственно доменную печь *1*, блок воздухонагревателей *2*, систему очистки доменного газа, состоящую из пылеуловителя *3*, скруббера *4*, трубы-распылителя *5*, водоотделителя *6* и дроссельной группы *7*. К чистому доменному газу подмешивается природный (коксовый) газ и эта смесь направляется для отопления воздухонагревателей. Воздухонагреватели оборудованы шиберами холодного и горячего дутья *9*, *10*, обычно двумя дымовыми патрубками с клапанами *13*, перепускным клапаном *14*, дымовой трубой *15*, газовыми клапанами *16*, газовыми дросселями *17*, горелкой с вентилятором *18* и её отсечным шибером *19*.

Холодное дутьё от воздухоудовки поступает в смеситель *11* и на воздухонагреватели, где нагревается и затем поступает в тракт горячего дутья. В смесителе *11*, оборудованном дросселем *12*, происходит стабилизация температуры дутья, которое затем через фурмы попадает в доменную печь.

При уменьшении или полном прекращении подачи дутья в печь без изменения режима работы воздухоудовной машины предусматривают воздушно-выпускной клапан *8*.

Для обеспечения кратковременных остановок доменной печи используют тяговую трубу с обычным шибером.

Основным недостатком воздухонагревателей с внутренней боковой горелкой является температурный перекоп по горизонтальному сечению кладки воздухонагревателя, приводящий к образованию значительных термонапряжений и наклону камеры горения на насадку (явление "банана"). При этом срок службы камеры горения составляет 3-5 лет.

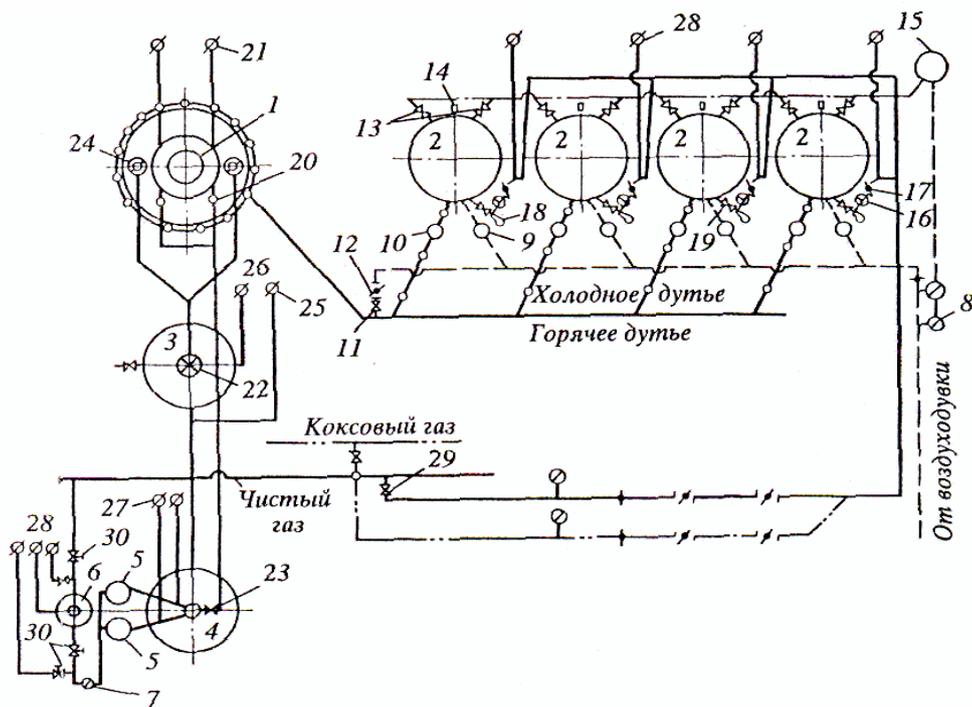


Рис. 1.3. Схема комплекса доменной печи:

- 1 – доменная печь; 2 – воздухонагреватели; 3 – пылеуловитель;
- 4 – скруббер; 5 – труба-распылитель; 6 – водоотделитель;
- 7 – дроссельная группа; 8 – воздушно-выпускной клапан;
- 9 – шибер холодного дутья; 10 – шибер горячего дутья;
- 11 – смеситель; 12 – дроссель-смеситель; 13 – дымовой клапан;
- 14 – перепускной клапан; 15 – дымовая труба;
- 16 – газовые клапаны; 17 – газовые дроссели;
- 18 – вентиляторы горелок; 19 – отсечные шиберы горелок;
- 20 – наполняющий клапан; 21 – выпускной клапан; 22 – тарельчатый
отделительный клапан; 23 – задвижка наполнительного
газопровода; 24-27 – атмосферные клапаны соответственно печи,
пылеуловителя, отделительного клапана и скруббера;
- 28 – продувочные свечи; 29 – задвижка чистого доменного газа;
- 30 – шиберная задвижка

За рубежом наибольшее распространение получили воздухонагреватели с выносной камерой горения (рис. 1.4). Впервые такой воздухонагреватель был построен в 1930 г. В Украине такие воздухонагреватели (конструкции Дидье) успешно эксплуатируются на протяжении 30 и более лет на ДП-8 ПАО "Приднепровский мет. комбинат им. Дзержинского", ДП-9 ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" и ДП-1^{бис} ПАО "Алчевский мет. комбинат".

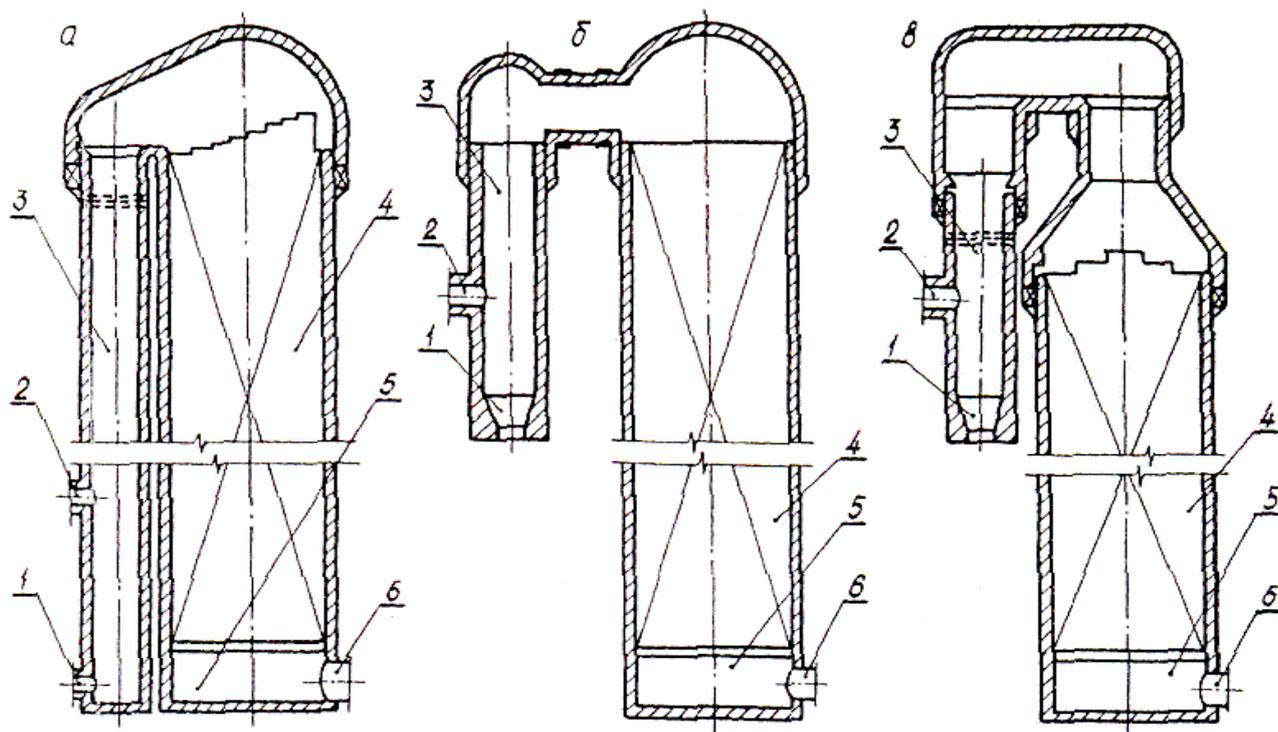


Рис. 1.4. Варианты воздухонагревателя с выносной камерой горения: а – конструкция Дидье; б – Коппера и в – Мартина-Пагенштехера: 1 – штуцер горелки; 2 – штуцер горячего дутья; 3 – камера горения; 4 – насадка; 5 – поднасадочное устройство; 6 – дымовой патрубок

Этот тип воздухонагревателей не имеет недостатков, обусловленных боковым расположением камеры горения [4, 5]. Они являются более надежными по условиям службы огнеупоров в кладке стен и насадки. Однако они характеризуются относительно повышенной материалоемкостью и высокими термонапряжениями в кладке и кожухе купольной части и сочленения с камерой горения [6, 7, 8, 9]. Их конструкция значительно сложнее и на 25-30 % дороже. Она требует больших площадей, поэтому, в основном, используется при строительстве новых доменных печей.

Рациональной представляется конструкция воздухонагревателя с внутренней центральной камерой горения (рис. 1.5), разработанная Липецким политехническим университетом.

Здесь симметричное расположение камеры горения по отношению к насадке и футеровке стен улучшает температурные условия службы огнеупоров и обеспечивает преимущество данной конструкции перед другими. Однако в настоящее время воздухонагреватели такой конструкции не только не строят, но и не рассматривают при решении вопроса о выборе типа воздухо-

нагревателя. Из этого следует заключить, что известные конструкции воздухонагревателей с центральной камерой горения [10] оказались несовершенными. Предварительный анализ показал, что главными причинами неудовлетворительной службы этих воздухонагревателей являются осложнения, обусловленные отводом горячего дутья снизу и сосредоточенным подводом дутья в поднасадочное пространство. Оба эти фактора могут привести к значительной неравномерности обогрева по периметру кладки стен и особенно камеры горения, что, соответственно, как и в воздухонагревателях с внутренней боковой камерой горения, может вызвать преждевременное разрушение камеры горения и аппарата в целом.

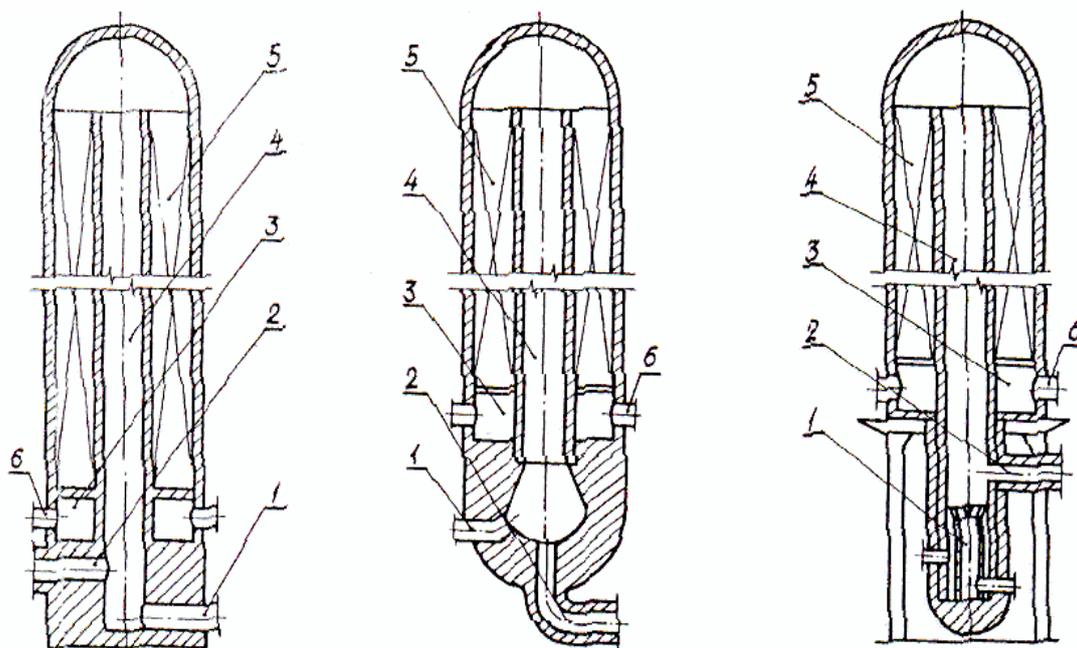


Рис. 1.5. Варианты воздухонагревателей с внутренней центральной камерой горения с отводом горячего дутья снизу: 1 – горелка; 2 – штуцер горячего дутья; 3 – поднасадочное устройство; 4 – камера горения; 5 – насадка; 6 – дымовой патрубок

Перспективной представляется конструкция воздухонагревателя с бесшахтной камерой горения (рис. 1.6). Она характеризуется меньшей материалоемкостью и благодаря симметричности не испытывает больших напряжений в подкупольной части кладки и кожуха. Однако из-за отсутствия надежных короткофакельных горелочных устройств и сложности обслуживания расположенных вверху горелочных устройств и штуцера горячего дутья их не строили. Разновидности конструкции воздухонагревателей описаны в работах [11, 12].

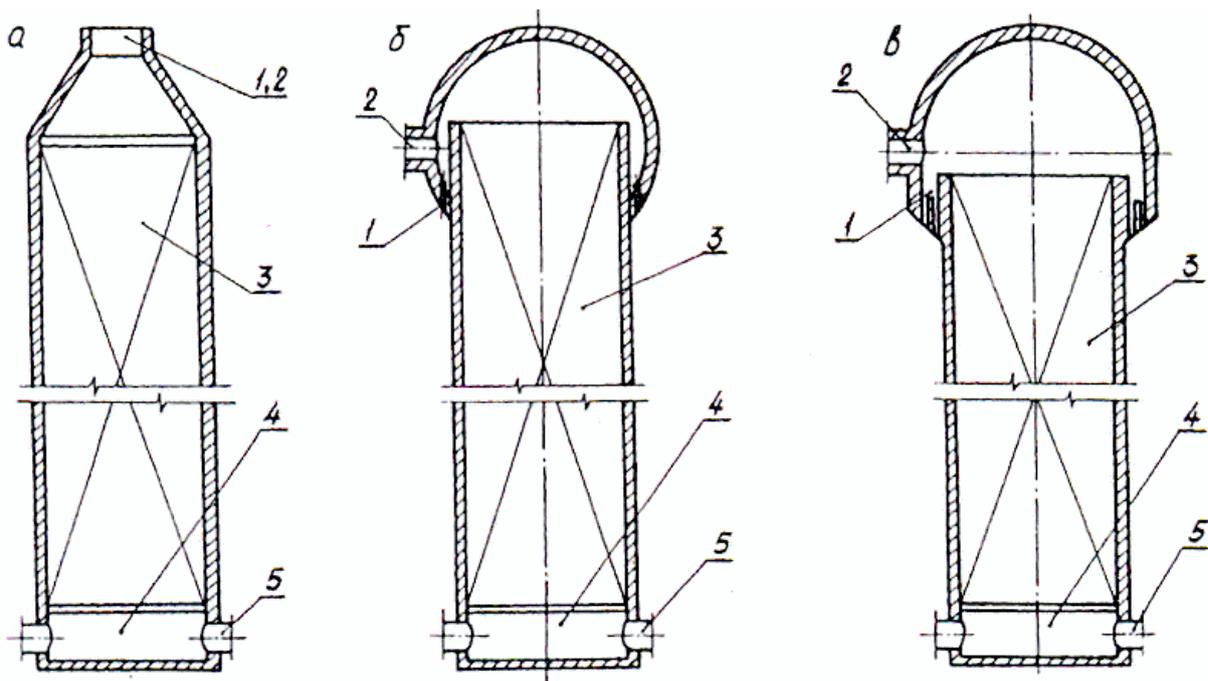


Рис. 1.6. Варианты воздухонагревателя с бесшахтной камерой горения:
а – с горелкой сверху; *б* – у основания и *в* – в полусферическом куполе:
 1 – горелка; 2 – штуцер горячего дутья; 3 – насадка;
 4 – поднасадочное устройство; 5 – дымовой патрубок

Разработанный во ВНИИМТ воздухонагреватель, оборудованный короткофакельной горелкой, опробован на НТМК [13]. Данные промышленных испытаний указывают на тяжелые условия службы огнеупоров короткофакельной горелки, надежность которой во многом определяет срок службы воздухонагревателя в целом. Кроме того, эта конструкция, также как и воздухонагреватель с выносной камерой, требует увеличения (на 20-25 %) площади, что с учетом упомянутого выше усложнения их обслуживания, затрудняет их внедрение в действующих доменных цехах.

В последние годы получило широкое распространение воздухонагревателей с купольным отоплением конструкции Я.П. Калугина [14] (рис. 1.7). Они находятся в эксплуатации как за рубежом (Россия, Китай), так и в Украине (ПАО МК "Запорожсталь" – на одной доменной печи и ПАО "Енакиевский мет. завод" – на двух печах). Они стабильно обслуживают нагрев доменного дутья до 1150-1250 °С.

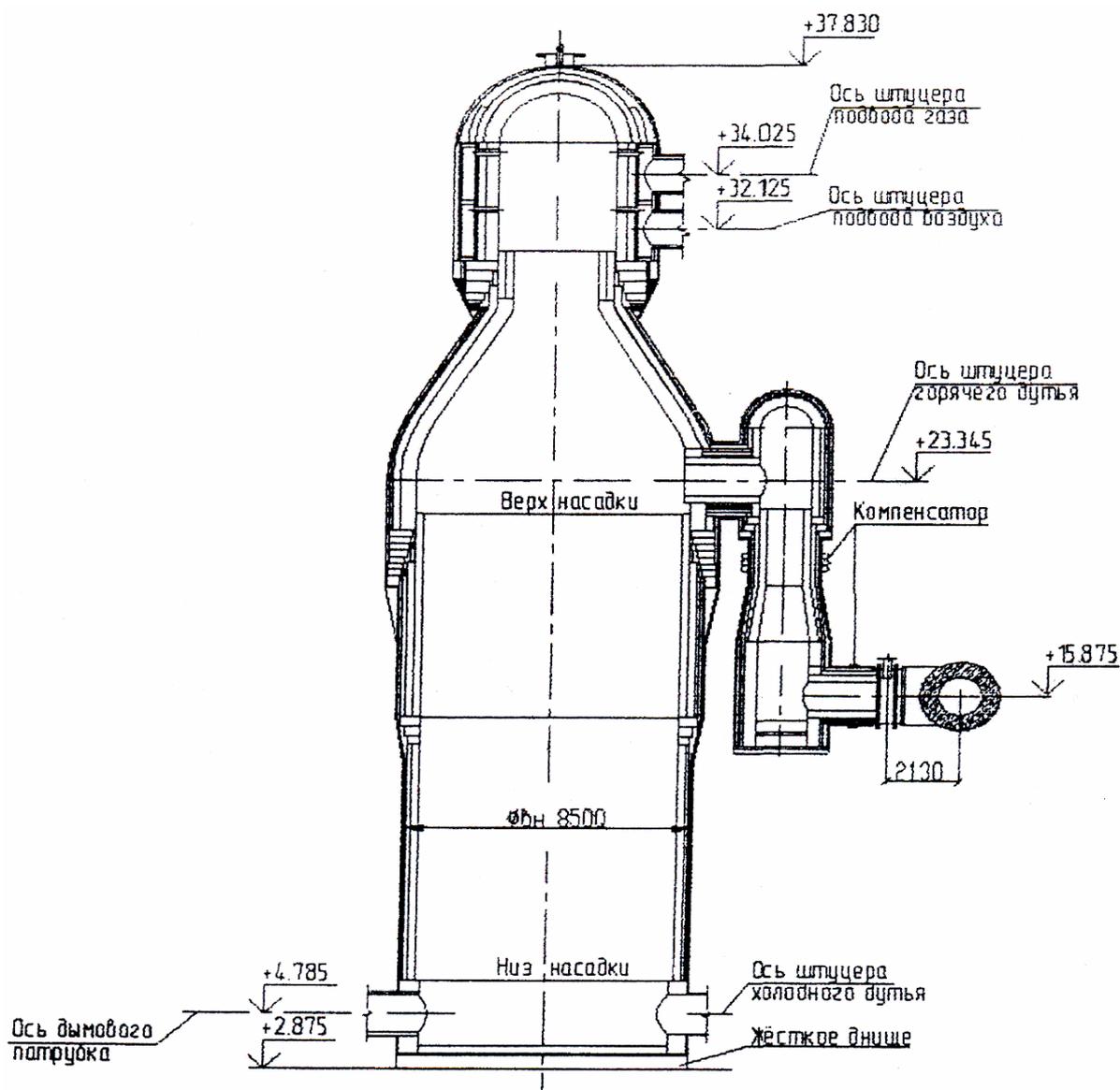


Рис. 1.7. Воздухонагреватель с купольным отоплением конструкции Я.П. Калугина

Дожигание газа происходит в форкамере, расположенной в верхней части купола.

Щтуцер горячего дутья расположен над насадкой на расстоянии до его оси не менее одного диаметра проходного сечения штоцера (рис. 1.8). Это обеспечивает хорошее распределение дутья по насадке и увеличивает её стойкость. Коллекторы газа и воздуха расположены между куполом и боковой стенкой футеровки форкамеры один над другим. Сообщающиеся с коллекторами газа и воздуха выходные каналы выполнены в вертикальной боковой стенке футеровки форкамеры. При этом направление выходных каналов непосредственно в форкамеру с возможностью подачи туда газа и

воздуха, а также отсутствие смесителей и сжигание газа непосредственно в объеме форкамеры значительно уменьшает гидравлическое сопротивление воздухонагревателя.

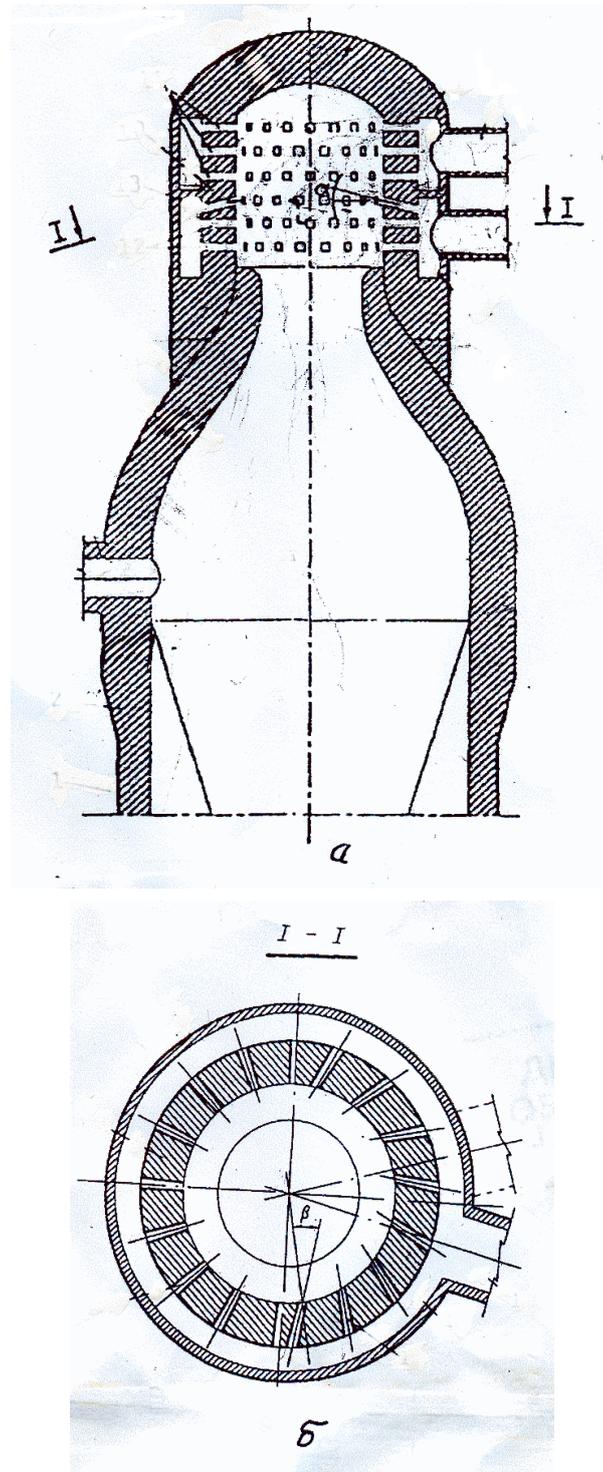


Рис. 1.8. Воздухонагреватель Калугина Я.П.:

а – вертикальный разрез;

б – горизонтальный разрез

Сжигание газа происходит в многосопловой кольцевой струйно-вихревой горелке. При этом оси каналов верхнего ряда из нижнего коллектора направлены к оси форкамеры и смещены вверх от горизонтальной плоскости на угол до 30° . Это обеспечивает раннее загорание газа в верхней части форкамеры, увеличивает температуру её кладки в местах выхода каналов в период нагрева. Оси всех остальных каналов расположены в горизонтальной плоскости и направлены под углом $15-30^\circ$ к радиусам форкамеры, проходящим через центры их выходных сечений. Это сохраняет общую высокую закрутку потока, что обеспечивает полное выгорание газа до входа в насадку и равномерный вход потока в насадку.

1.2. Развитие типов и конструкций насадочных изделий

Насадка ВН является неподвижным промежуточным теплоносителем при передаче теплоты от продуктов сгорания доменного или смешанного газа к дутью доменной печи в условиях регенеративного противотока. При этом КИТ и КПД процесса, а также достигаемая максимальная температура горячего дутья зависят от интенсивности теплообмена, величины теплообменной поверхности, аккумулирующей массы насадки, ее теплофизических свойств и др. Металлургические предприятия стремятся оснастить ВН насадкой, отвечающей требованиям:

- максимально возможное снижение материалоёмкости (снижение затрат на приобретение насадочных и других огнеупоров, затрат на кожух и поднасадочное устройство) за счёт высокой удельной поверхности нагрева насадки;

- необходимые показатели крипа насадочных кирпичей для высоких стойкости ВН и их межремонтных периодов;

- блочное исполнение насадочных изделий, что облегчает выполнение ремонтов и увеличивает устойчивость насадки и её строительную прочность;

- приемлемая стоимость насадки;

- обеспечение высоких коэффициентов теплоотдачи в насадке за счёт, например, рациональной формы её каналов;

- минимальные потери энергии потока в насадке в газовый и воздушный периоды.

Насадки из прямого кирпича размером 230x130x40 мм на ВН уже практически не сохранились, т.к. у них наихудшие теплотехнические характеристики и неудовлетворительные показатели по стойкости (при разрушении разделительной стены ВН с внутренней камерой горения эта насадка высыпается через образовавшееся отверстие в камеру горения). Также такая насадка в значительной степени подвержена крипу (ползучести). Повсеместно насадка из прямого кирпича заменяется на блочную, которая имеет:

- высокую устойчивость благодаря перевязке блоков, наличию замков;
- возможность довести толщину простенка между каналами и диаметр канала до минимума, особенно при изготовлении блоков по японской технологии – литьем под высоким давлением с последующим обжигом, а также благодаря использованию горизонтальных каналов между вертикальными;
- существенную турбулизацию потоков дыма и дутья, связанную с технологической конусностью каналов, зазорами шириною 5 мм в замках, что интенсифицирует конвективную теплоотдачу;
- наибольшую гибкость в отношении выбора наиболее выгодного использования массы насадки и формы ее каналов.

В настоящее время появились ВН с насадкой, имеющей ячейки $\varnothing 30$ мм и $\varnothing 26/35$ («ёлочка»), имеющие удельную поверхность нагрева соответственно 48 и $48,6 \text{ м}^2/\text{м}^3$ вместо $32,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$ у насадок с ячейками 40/41 мм (ГОСТ 20901-75).

Известен способ увеличения теплоотдачи конвекцией в канале насадочного кирпича за счет выполнения каналов в виде конических отверстий [15-17] (рис. 1.9).

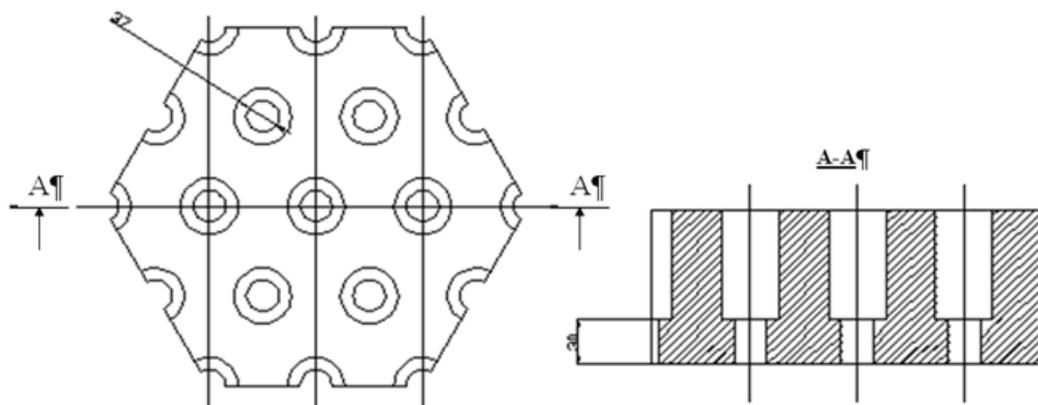


Рис. 1.9. Насадочный кирпич с местным уменьшением диаметра

Выполнены исследования [18] турбулентного теплообмена, его интенсификации, потерь давления и картины течения жидкости в трубах с периодическим расширением и сужением проходного сечения (в каналах диффузор – конфузор – диффузор – ...) при различных параметрах (рис. 1.10).

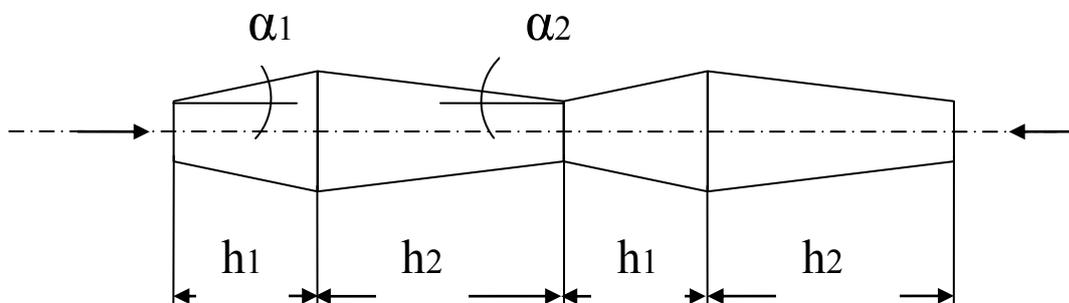


Рис. 1.10. Канал типа конфузор – диффузор

Аналогичные исследования применительно к насадочным каналам ВН позволили отказаться от двух форм диффузор – конфузор и перейти в динасовой зоне к каналам типа «елочка», в которых эффективной оказалась лишь одна составляющая системы диффузор – конфузор (рис. 1.11).

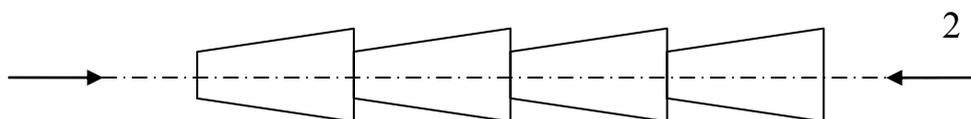


Рис. 1.11. Канал типа «елочка»

В [19] установлены зависимости $Nu = f_1 (Re)$ и $Eu = f_2 (Re)$. Насадка с каналами системы «елочка» имела размер канала $d = 26/35$ мм и коэффициент теплоотдачи в 1,5 раза больший, чем в практически цилиндрических каналах $d = 30$ мм. Газодинамическое же сопротивление насадки типа «елочка» в среднем составило 6,35 мм вод. ст./м.п. против 2 мм вод. ст./м.п. для насадок с цилиндрическими каналами $d = 41$ мм.

Подобные исследования были проведены также В.К. Мигаем и И.В. Житомирской на моделях кубов воздухоподогревателей котлов [20] для различных значений геометрических параметров трубы типа диффузор – конфузор (рис. 1.10).

В [21, 22] приведена информация об использовании в Великобритании при реконструкции ВН компактной динасовой насадки с диаметром отверстий 10 мм, уложенной в верхней ее части. Это увеличило КПД ВН на 5 % и уменьшило расход топлива на 8,5 %. Во ВНИИМТ на горячем стенде исследованы теплообмен и газодинамика блочной шестигранной насадки из корунда и муллита (62 % Al_2O_3) с ячейками $d = 4$ мм и удельной поверхностью $f_{\text{уд}} = 184 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Используются [21] насыпные насадки (шаровые, в форме цилиндра, тел неправильной формы – крошки (фарфор, корунд, шамот с 85 % Al_2O_3) с $f_{\text{уд}} = 260 \text{ м}^2/\text{м}^3$), что позволяет сократить объем насадки в 7-10 раз против насадки по ГОСТ 20901-75 (с ячейками $d = 41$ мм, $f_{\text{уд}} = 32,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$), сократить капитальные затраты, увеличить КПД блока ВН, сэкономить 5-10 % топлива. С 80-х годов XX века на Косогорском (Тульской области) металлургическом заводе эксплуатировались 2 ВН с шариковой корундовой насадкой ($d = 20$ мм), отапливаемых природным газом. Температура горячего дутья составляла 1400-1500 °С (доменная печь выплавляет Fe-Mn). Эти ВН имели малые размеры: диаметр насадки 6 м, ее высота 5 м. Воздухонагреватели работали в режиме со смесителем.

Используется [23] новый способ турбулизации потоков в каналах, который может быть применен для интенсификации конвективного теплообмена в новых насадочных изделиях ВН. Суть способа: на поверхности каналов (в месте «разъема» двух блоков в горизонтальной плоскости) создают полусферические углубления (лунки), которые при прохождении потока являются генераторами вращающихся вихрей (малых «торнадо»), турбулизирующих проходящий поток.

Приведены результаты исследования теплообмена за двумя рядами углублений различной геометрической формы [24], показавшие, что форма и глубина углублений для исследованных условий оказывает незначительное влияние на интенсивность теплообмена (поверхностные углубления – генераторы вихрей).

Представлены результаты [25] обобщения опытных данных по теплообмену и газодинамическому сопротивлению в плоских каналах со сферическими углублениями на одной или двух сторонах канала; получены тепловые и газодинамические характеристики каналов.

Выбор способов интенсификации теплообмена определяется соотношением между достигаемым эффектом интенсификации теплообмена и мощностью, необходимой для прокачки теплоносителя. Традиционные способы

интенсификации теплообмена (оребрение, выступы, закрутка потока и его турбулизация) связаны с опережающим ростом газодинамического сопротивления из-за генерации диссипативных (распадающихся) структур, превращающихся в теплоту. В каналах же с поверхностными углублениями, являющихся генераторами вихрей, степень роста теплообмена при определенных условиях опережает рост аэродинамических потерь, что связано с формированием и выбросом в основной поток вихря «торнадо». Частота вихревых пульсаций определяется режимными факторами и геометрическими характеристиками канала.

Используются [26] конструкции насадок воздухонагревателей из блочного кирпича с горизонтальными проходами двух типов: с вертикальными полуцилиндрическими выступами (рис. 1.12, а) и со щелевыми каналами (рис. 1.12, б). Особенностью этих насадок, а также блочных шестигранных насадок КНР с горизонтальными проходами является то, что горизонтальные проходы соединяют только часть вертикальных каналов между собой, не образуя сплошной всеобщей связи одного канала со всеми другими каналами.

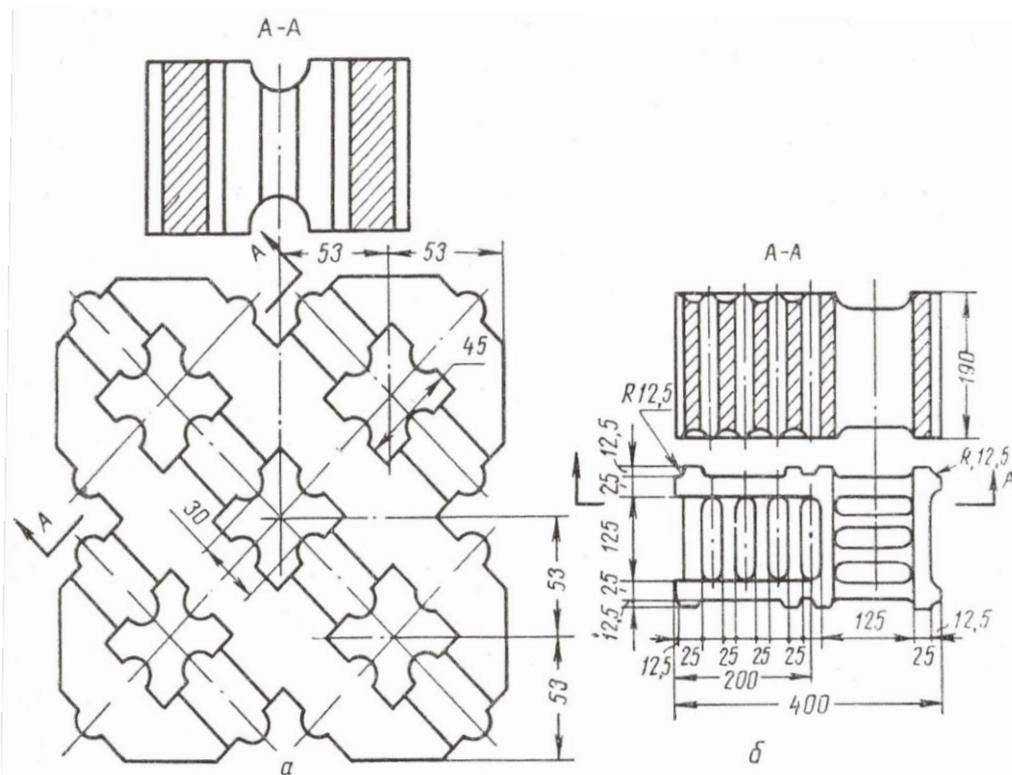


Рис. 1.12. Конструкции насадок ВН из блочного кирпича с горизонтальными проходами: а – с вертикальными полуцилиндрическими выступами; б – со щелевыми каналами

Липецким политехническим институтом [27] была предложена конструкция блочных элементов (рис. 1.13) и варианты насадок из них (рис. 1.14, 1.15).

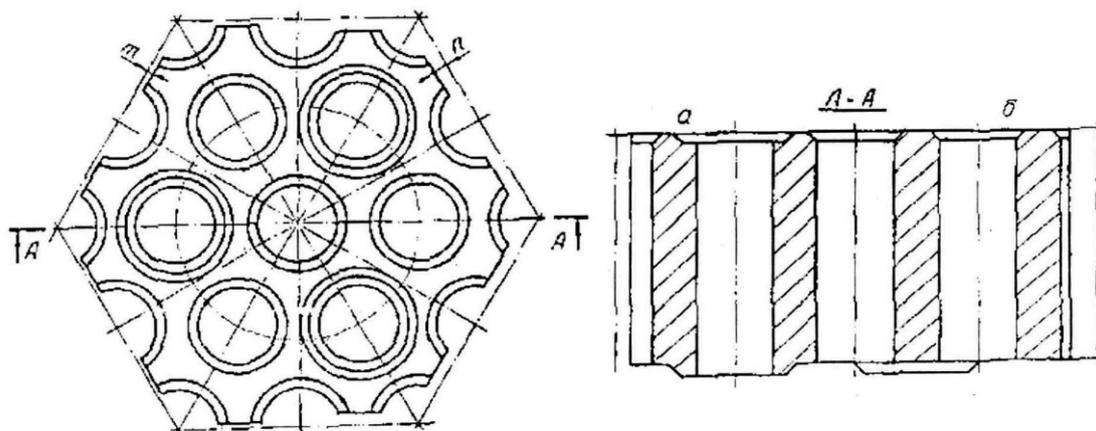


Рис. 1.13. Улучшенные элементы блочной насадки: а – блочный элемент с фаской сверху отверстий; б – блочный элемент с фаской вверху отверстий и укороченными ребрами; м – уменьшение толщины ребер для компенсации температурного расширения; н – уменьшение толщины ребер, как для компенсации температурного расширения блочных элементов, так и для образования горизонтальных проходов между блоками

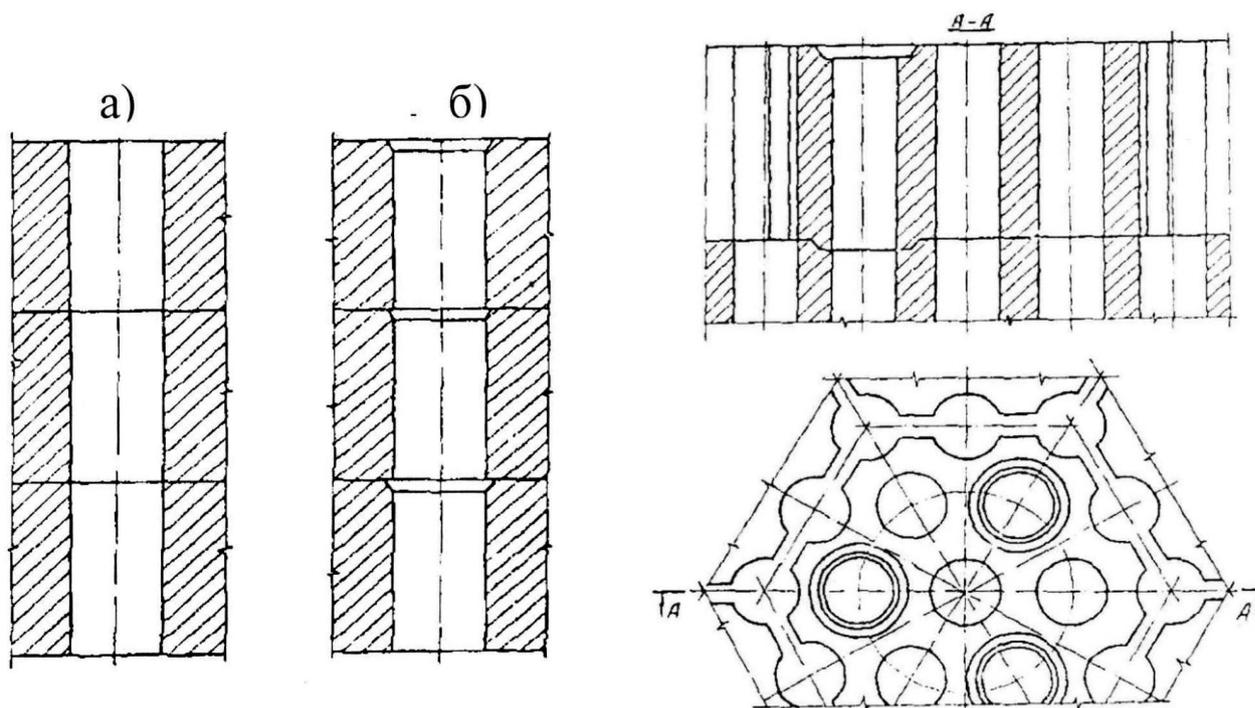


Рис. 1.14. Насадка из блочных элементов: а – из блочных элементов обычной конфигурации; б – из блочных элементов с фасками – срезами вверху отверстий

Рис. 1.15. Вариант из блочных элементов с укороченными ребрами без фасок вверху отверстий

Предложенный элемент (рис. 1.13, а) отличается наличием фаски-среза в верхнем или в верхнем и нижнем основаниях его отверстий; а элемент (рис. 1.13, б) – дополнительно уменьшенными выступами ребер. Благодаря этим изменениям

при выполнении насадки (рис. 1.14, б) из элементов (рис. 1.13, а) по высоте ее каналов (на стенках элементов) образуются кольцевые канавки, а при выполнении насадки (рис. 1.15) из элементов рис. 1.13, б (без фасок) – горизонтальные проходы между смежными элементами горизонтального ряда.

Кольцевые канавки вызывают разрушения, главным образом, пограничного слоя потока и тем самым интенсифицируют теплообмен. Горизонтальные проходы в виде узких вертикальных щелей обеспечивают возможность перетока газов в горизонтальном направлении, способствует увеличению действительной относительной поверхности нагрева, турбулизации потока и соответственно интенсификации теплообмена.

В насадке из блоков с укороченными ребрами, благодаря наличию щелей между ними, исключена возможность возникновения напряжений, обусловленных термическим расширением блоков. Это позволит снизить требования к точности изготовления блоков и уменьшить их стоимость. Насадка (рис. 1.14, б) внедрена в ВН 4 Липецкого металлургического завода «Свободный Сокол», а насадка рис. 1.15 – использована в рабочем проекте ВН 8 НЛМНК (не был реализован).

На заводе фирмы Дидье (ФРГ, Дидиер-Верке) используют блочные изделия шестигранной формы с коническими каналами: диаметром отверстий в верхней части насадки $d = 28/32$ мм, удельной поверхностью нагрева $f_{уд} = 39,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$, живым сечением $\omega = 29,75 \%$, а в нижней части насадки $d = 33/37$, $\omega = 40,5 \%$, удельной поверхностью нагрева $f_{уд} = 46,2 \text{ м}^2/\text{м}^3$, что означает увеличение эквивалентной толщины простенка между насадочными каналами в верхней части насадки и уменьшение толщины в нижней части. Высота блоков – 180 мм. Форма каналов – шестигранная, что даёт одинаковую толщину простенка по высоте блока.

В Японии [28] разработана сотовая керамическая насадка с диаметром каналов 2-4 мм, которая имеет удельную поверхность нагрева $f_{уд} > 184 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (при диаметре каналов 4 мм) и живое сечение более $0,184 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Малые размеры каналов насадки обуславливают ее недолговечность из-за засорения, а малая толщина простенков между каналами – ее невысокую прочность.

Наличие многочисленных систем насадочных блоков для ВН свидетельствует о продолжающемся поиске в оптимизации формы насадочного кирпича в направлении уменьшения диаметра каналов и толщины простенков между каналами.

Представляют интерес насадки с переменной турбулентностью [29]. При разработке многоярусных насадок с переменной теплопроизводительностью по их высоте ограничение по возможному минимальному диаметру канала насадки привело к появлению насадок с переменными по высоте коэффициентом теплоотдачи, например, насадки типа Пэти (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Насадка системы Пэти с переменной турбулентностью

В насадочных блоках квадратные каналы имеют закруглённые углы для лучшего противостояния эрозии и химическому воздействию пыли и других реагентов дымовых газов при высоких температурах. Каналы снабжены двумя или четырьмя гребнями. По высоте насадки камни разворачивают в горизонтальной плоскости. Для каналов 60 x 60 мм относительная удельная поверхность насадки достигала $40 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Удельная масса насадки уменьшается сверху вниз, а коэффициент теплоотдачи конвекцией увеличивается в том же направлении.

Второй тип насадки Жерен (рис. 1.17) также создаёт переменную турбулентность потока. Размеры каналов по высоте насадки возрастают книзу из-за уменьшающейся толщины простенков между каналами [29]. Относительная поверхность нагрева достигает $42,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Каналам придана коническая форма при наклонном направлении оси канала. Расположение блоков меняют поворотом на 180° или 90° . Таким образом получают винтовое или волнообразное движение в двух смежных рядах, что увеличивает турбулизацию и коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{конв}}$ (с возможностью изменения по высоте).

В [30] рассмотрены различные блоки для насадок регенераторов (рис. 1.18). Блоки различными способами пронизаны множеством вертикальных и горизонтальных каналов.

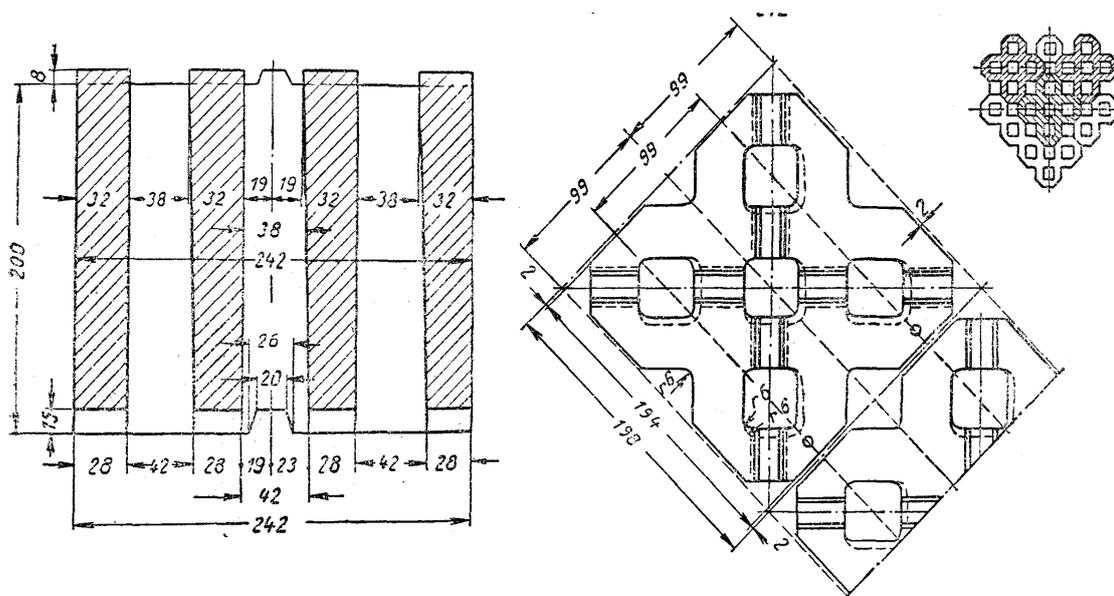


Рис. 1.17. Насадка системы Жерен с шагом между каналами 70 мм

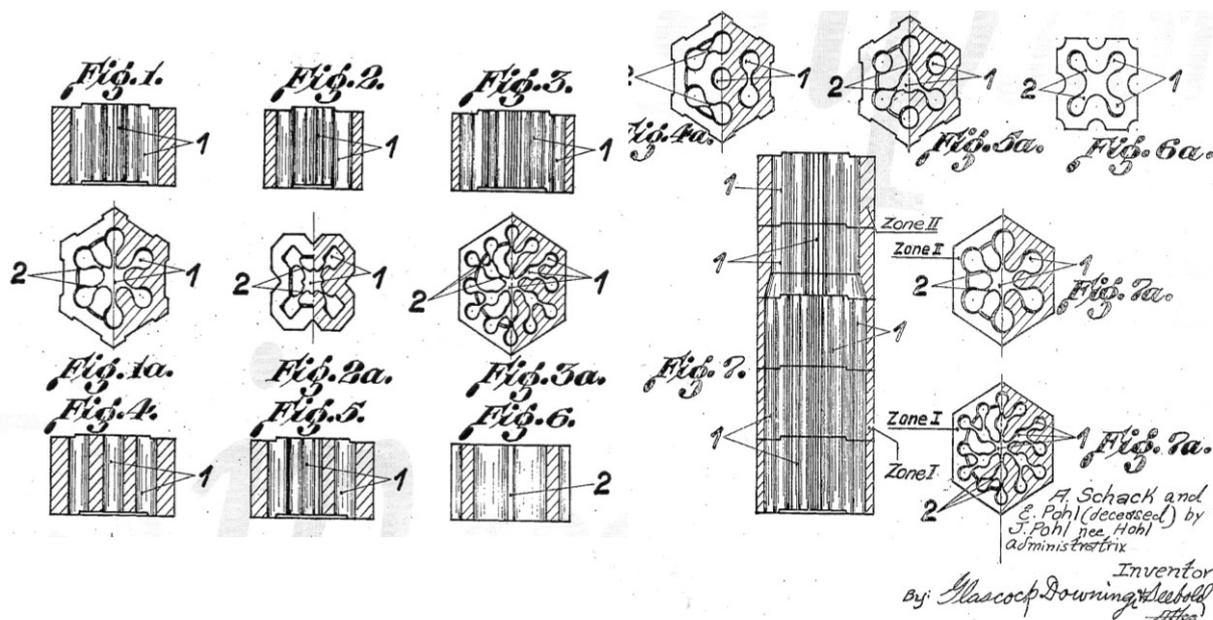


Рис. 1.18. Насадочные блоки А. Шака с оригинальным расположением горизонтальных и вертикальных каналов

Предложен [31] блок насадки регенератора, выполненный в виде параллелепипеда *1* с системой сквозных вертикальных каналов *2*, а также с фиксирующими выступами *3* и впадинами *4*, расположенными соответственно на противоположащих гранях блока симметрично относительно его центра на заданном расстоянии от последнего, причем величина расстояния *t* находится в пределах (рис. 1.19).

$$0,25 \cdot L + 0,3 \cdot d \leq t \leq 0,25 \cdot L + 0,5 \cdot d,$$

где L – длина блока; d – эквивалентный диаметр каналов 2.

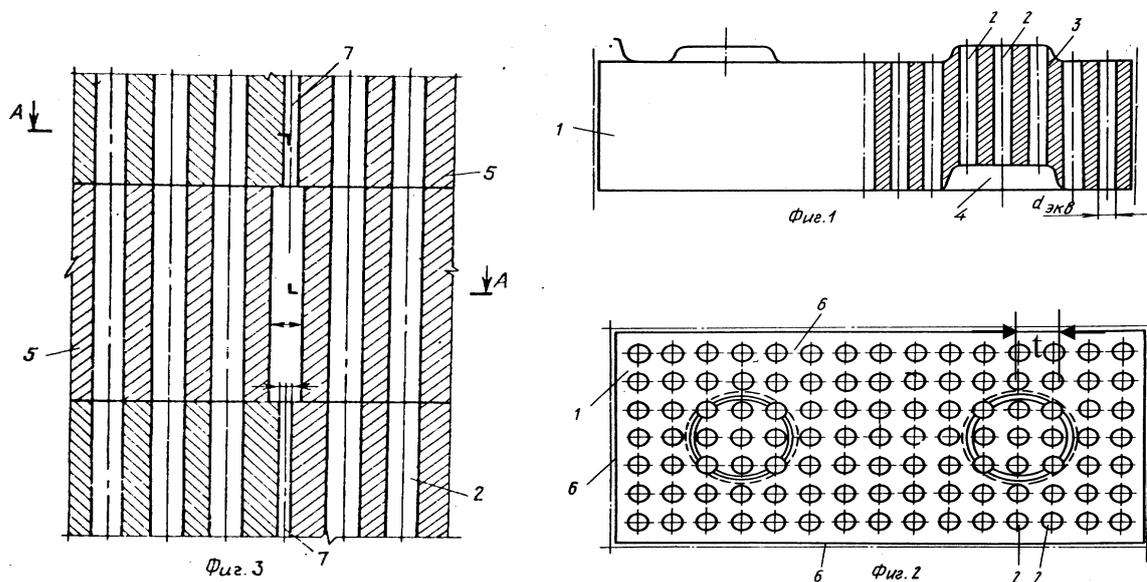


Рис. 1.19 Блок насадки регенератора

Боковые грани 6 блоков выполнены плоскими (гладкими, без выемок) и блоки уложены в слое с образованием между собой вертикальных щелей 7 шириной 0,3-0,5 эквивалентного диаметра каналов 2. Блоки уложены вперевязку в горизонтальных слоях 5 и таким образом, что по вертикали насадки щели 7 расположены соосно с каналами 2 ниже- и вышележащих смежных блоков. Выполнение вертикальных щелей между блоками шириной 0,3-0,5 от эквивалентного диаметра каналов 2 обеспечивает наилучшую равномерность распределения скоростей потоков по сечению насадки и повышает теплообмен, что обеспечивает повышение температуры дутья.

Эффективность от применения блоков предлагаемой конструкции состоит в повышении нагрева дутья на 20-50 °С.

В [32] насадка воздухонагревателя с горелкой в куполе состоит из объемных унифицированных элементов, размещенных, по меньшей мере, в два ряда, контактирующих друг с другом по площади и высоте с образованием вертикальных и горизонтальных воздушных каналов ячеистой структуры (рис. 1.20). При этом вертикальные и горизонтальные каналы объединены в чередующиеся круговые каналы и соединенные между собой линейные секции. Этим обеспечивается возможность дополнительного конвективного нагрева

воздуха за счет повышения контактной поверхности теплообмена. При этом площадь поперечного сечения одного горизонтального канала составляет не менее 0,1 площади поперечного сечения одного вертикального канала.

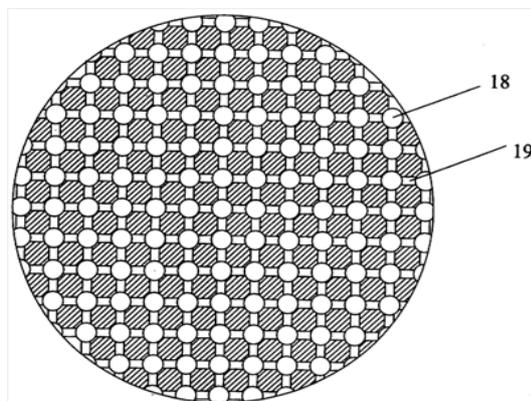


Рис. 1.20. Насадка
воздухонагревателя

Объемные унифицированные элементы насадки воздухонагревателя могут быть выполнены в виде шестигранных блоков, обеспечивающих повышение контактной поверхности теплообмена за счет увеличения количества вертикальных каналов для перемещения сгоревших газов [33, 34]. При этом каждый вертикальный канал шестигранных блоков образован технологическим усеченным конусом, меньшим основанием обращенным в направлении выхода продуктов горения. Вертикальные каналы выполнены диаметром 18-22 мм.

Для насадки воздухонагревателя с шестигранными огнеупорными блоками с центральными и периферическими каналами (блоки уложены ярусами вперевязку с образованием между них горизонтальных и вертикальных каналов) [35] предусмотрено следующее (рис. 1.21):

- верхняя и нижняя поверхность блока оснащены желобами полукруглого поперечного сечения;

- желоба соединяют центральный и периферический вертикальные каналы горизонтальными концентрическими и радиальными каналами, полученными состыковкой верхней поверхности одного блока с нижней поверхностью смежного блока;

- на верхних и нижних ребрах шестигранного бока выполнены срезы в виде четверти поперечного сечения отверстия; срезы образуют концентрические каналы при состыковке горизонтальных и вертикальных ярусов блоков.

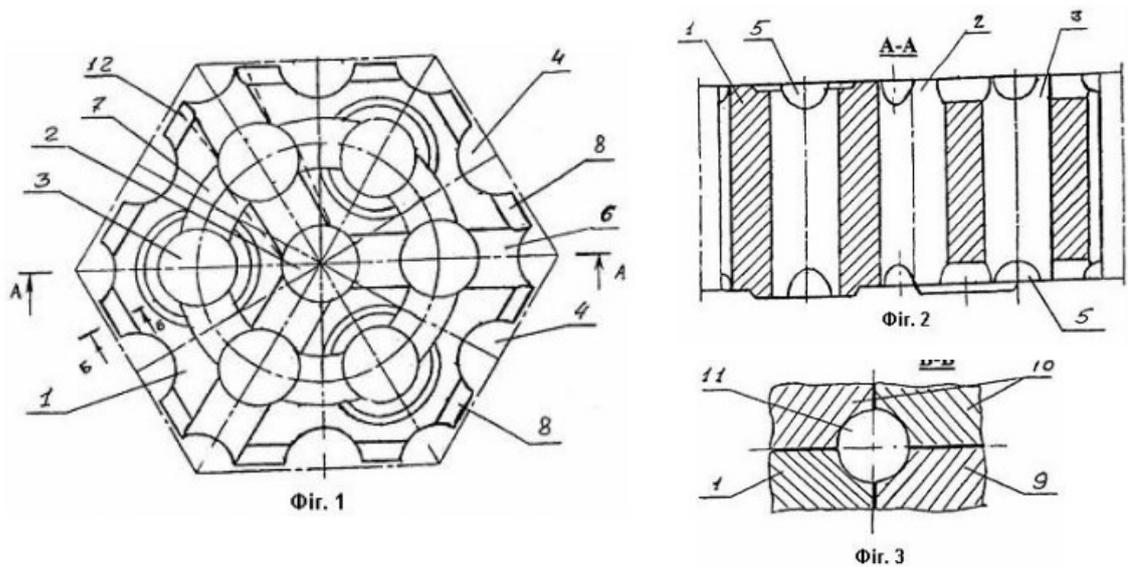


Рис. 1.21. Элемент насадки с горизонтальными проходами

Кроме того, радиальные каналы могут иметь коническую форму с постепенным увеличением диаметра поперечного сечения канала от центра до периферии блока, что благоприятствует образованию направленного турбулентного потока, который выносит пыль до разветвленной сети периферийных вертикальных каналов, образованных из полуканалов, и дальше – в насадку. В верхней, высокотемпературной зоне насадки, зола, которая попала в периферийные вертикальные каналы, плавится и стекает вдоль наклонной конической поверхности каналов 12 к периферийным вертикальным каналам, где за счет повышенной турбулентности газового потока, расплав дробится до каплеобразного состояния и, застывая в нижних ярусах, выносятся из насадки.

Использование предложенных огнеупорных шестигранных блоков позволит увеличить их площадь контакта с нагревающими и нагреваемыми газами до 20 %, благодаря развитым теплопередающим поверхностям и повысить эксплуатационные возможности за счет перетока газа между вертикальными каналами вдоль горизонтальных каналов, что позволит значительно сократить потери поверхности нагрева при засорении части каналов.

Предложено [36] объемные унифицированные элементы насадки воздухо-нагревателя выполнить в виде модульных блоков из огнеупорных фасонных изделий с образованием ограненной формы с числом граней не менее трех, обеспечивающих повышение площади контактной поверхности теплообмена за счет увеличения площади боковой поверхности вертикальных каналов, при этом вертикальные каналы выполнены диаметром в диапазоне 15-45 мм.

Элемент насадки ВН доменных и пламенных печей [37] имеет не менее трех сквозных цилиндрических каналов одинакового радиуса и не менее семи расположенных, по крайней мере, на некоторых боковых поверхностях полуцилиндрических каналов одинакового с цилиндрическими каналами радиуса (рис. 1.22).

При этом каналы расположены относительно друг друга в соответствии с соотношением $t = 10 + 25/R$, где t – расстояние между цилиндрическими поверхностями соседних каналов, измеренное по линии, соединяющей центры их поперечных сечений, мм; R – радиус каждого канала, находящийся в пределах от 8,5 до 11,5 мм. При использовании в насадке данного элемента повышается эффективность теплообмена, обеспечивается возможность создания ВН с меньшей массой насадки и уменьшенными габаритами.

Фирмой «Dalmond» (КНР) разработана широкая номенклатура огнеупоров для ВН и материалов для их изготовления. В насадочных изделиях вертикальные каналы, расположенные не в замках, оснащены тремя горизонтальными проходами. Вертикальные каналы углов блока не имеют горизонтальных проходов.

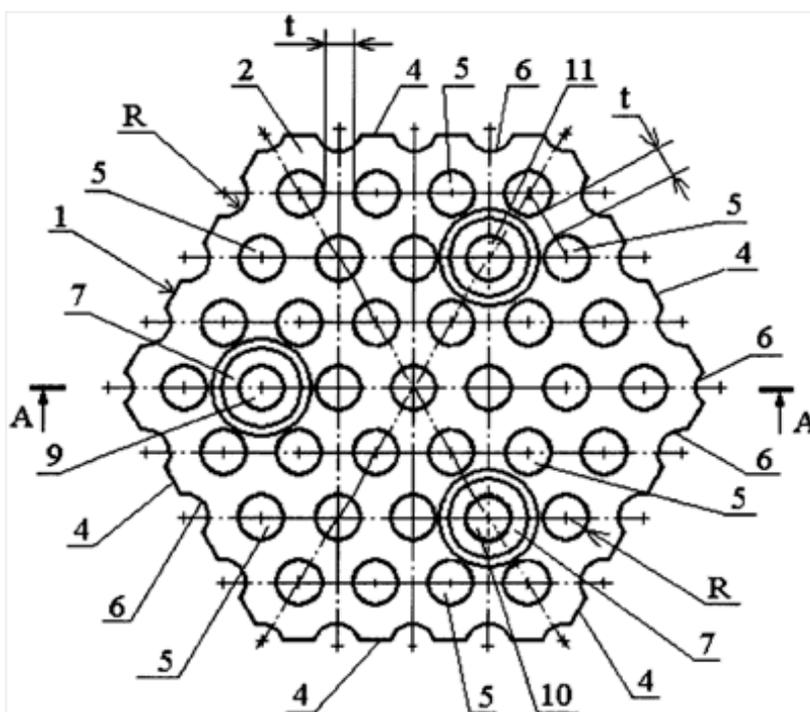


Рис. 1.22. Элемент насадки воздухонагревателя

Фирмой Paul Wurth [38] предложены различные системы насадок (рис. 1.23), параметры которых приведены в таблице 1.1.

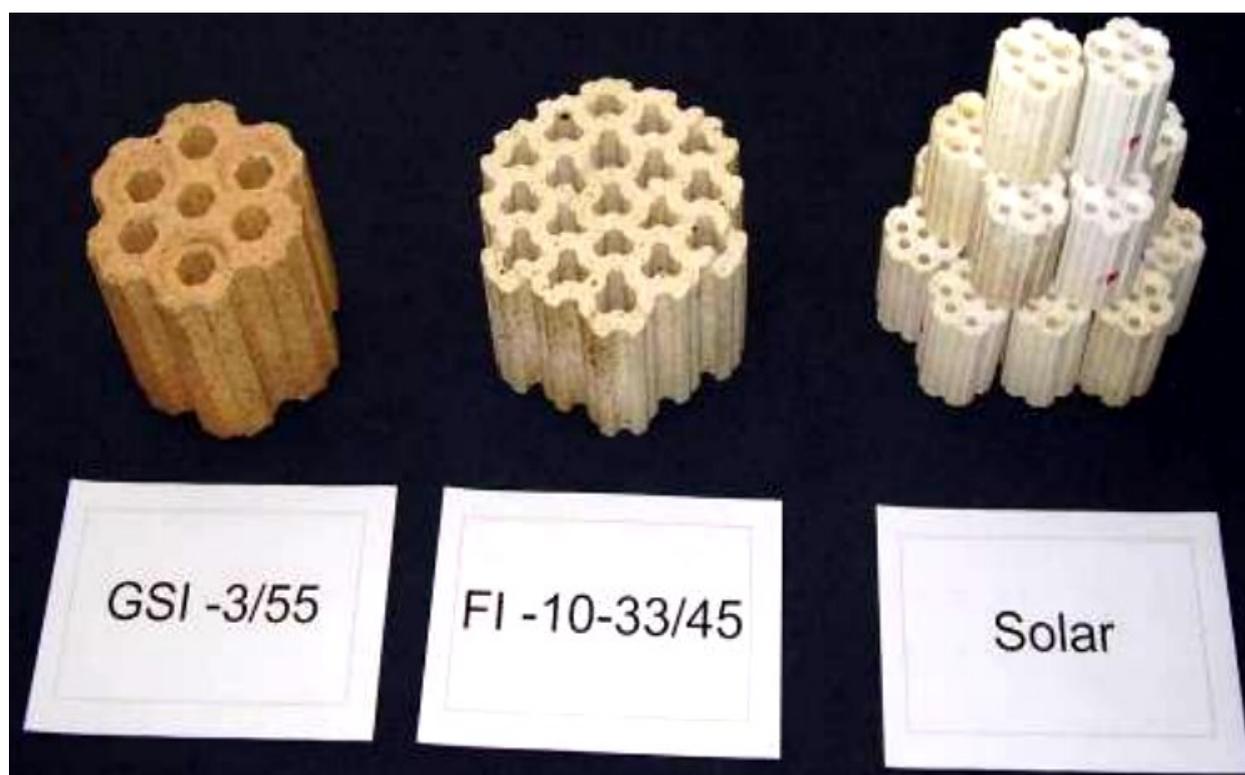


Рис. 1.23. Насадочные изделия фирмы Paul Wurth

Таблица 1.1

Насадочные системы фирмы Paul Wurth

Параметры	Типы насадочных систем				
	GSI3/55	GSI 2/55	FI-R10,5-30/45	FI-R10-33/45	Solar
Объем, дм ³	3,67	3,28	4,1	3,995	0,42
Поверхность нагрева, м ² /м ³	39,7	46,2	55,024	64,192	88,9
Свободное поперечное сечение, %	29,75	40,5	32,74	39,74	22,23
Толщина нагреваемой поверхности, мм	17,7	12,9	12,22	9,39	8,75
Количество кирпичей на 1 м ²	31,81	31,81	21,12	21,12	235,82
на 1 м ³	176,74	176,74	162,46	150,85	2358,2

Наукове видання

ГРЕС Леонід Петрович
КАРПЕНКО Сергій Анатолійович
НАУМЕНКО Олександр Олександрович
ІВАЩЕНКО Валерій Петрович
ЄРЬОМІН Олександр Олегович
КАРАКАШ Євген Олександрович
ГУПАЛО Олена В'ячеславівна

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАГРІВУ ДОМЕННОГО ДУТТЯ

Монографія

ISBN 978-617-95043-5-8

За заг. редакцією доктора технічних наук, професора Л.П. Греса
Російською мовою
Комп'ютерний набір А.В. Коршилова

Підписано до друку 27.05.2021р.
Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний.
Умовн. друк. арк. 11,6. Наклад 150 прим.
Номер заказу №2506
Видавничий договір № 5м/16

Свідоцтво ДК № 6995 від 28.11.2019 р.
Надруковано у друкарні «Профі Принт»
69097, м. Запоріжжя,
пр. Ювілейний, 27, кв. 84
тел. 050-198-30-43