

- металлургии. — Л.: ЛДНТП, 1984. — 23 с.
7. Савицкий А.П. Технологические процессы получения порошковых алюминиевых материалов. // ЦНИИ экономики и информ. цв. металлургии. — М., 1983. — Вып.1. — 61 с.
 8. Савицкий А.П. Состояние и перспективы развития порошковой металлургии алюминия // Порошковая металлургия. — 1985. — №10. — С.41.
 9. Овчинников В.В., Колчин Р.Л., Волков В.И., Волочко А.Т., Ласковнев А.П., Макарова Ж.Е. Магнитные сепараторы и их место в современном литейном производстве. Переработка отходов (алюминиевая стружка) с целью дальнейшего использования в собственном производстве на базе ПРУП «ММЗ» // Лите и металлургия. — 2007. — №2. — С. 175–177.
 10. Гопиенко В.Г. [и др.]. Спеченные материалы из алюминиевых порошков. — М.: Металлургия, 1993. — 320 с.
 11. Электроразрядное спекание смесей порошков алюминия и меди / М.З. Кольчинский [и др.] // Порошковая металлургия. — 1977. — № 7. — С. 13–16.
 12. Дорожкин Н.Н. Электрофизические методы получения покрытий из металлических порошков / Н.Н. Дорожкин и [др.]. — Рига: Зинатне, 1985. — 131 с.
 13. Ramasaray K. Kinellus der sinterofenluft auf die Elgerischaften der Aluminiumlegierungen / K. Ramasaray, P. Namakrishnan // Powder Met. Conf., Florence, June 20—25, 1982. — 1982. — S. 527–534.
 14. Никифоров, Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов / Г.Д. Никифоров. — М.: Машиностроение, 1972. — 264с.
 15. Савицкий А.П. Жидкофазное спекание систем с взаимодействующими компонентами / А.П. Савицкий. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. — 184с.
 16. Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г., Щербань Н.И. Конструкционные порошковые материалы. — Киев: Техніка, 1985. — 152 с.
 17. Method of making composite bearing materials: Patent 1349523 GB, МКИ С 22 С 33/02 / G.K.N. Group Servies ltd: — No GB19700005693; заявл. 02.06.70; опубл. 03.04.74.
 18. Способ изготовления пористой спеченной детали из алюминия или его сплава: заявка 61-48566 Япония, МПК4 В 22 F 5/00, 3/14, С 22 С 1/08 / Ниппон дайакурэбайто К.К. — №55-50075; заявл. 15.04.80; опубл. 24.10.86 // Изобретения стран мира. — 1987. — № 8. — С. 72.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

*Гринчук П.С., Якутович Н.В., Ознобихин А.Н., Торопов В.В.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси*

В настоящее время машиностроение, станко-строение и металлообработка являются одними из ключевых составляющих промышленного потенциала Республики Беларусь. Существенная доля энергозатрат в этих секторах промышленности связана с термической обработкой металлов в печах. По причине низкой энергоэффективности работы большей части существующего печного оборудования, несколько лет назад в Институте тепло- и массообмена были начаты интенсивные работы по исследованию перспективных направлений модернизации печного парка промышленных предприятий. В данной статье приведены качественные оценки технических решений, которых следует придерживаться при модернизации старых и разработке новых печных агрегатов.

Для выполнения исследований по проблемам печного нагрева металла в Институте тепло- и массообмена был создан экспериментальный стенд — нагревательная печь с выкатным подом. Общий вид стенда представлен на рис. 1.

Печь представляет собой тепловой агрегат с выкатным подом, совмещенным с дверью камеры. Боковые поверхности камеры, под, свод и дверь футерованы волокнистой теплоизоляцией, под печи имеет жесткую раму, изготовленную из нержавеющей стали, необходимую для размещения нагреваемых стальных заготовок. Конструкция рамы позволяет дымовым газам со всех сторон омывать заготовку, что повышает равномерность ее нагрева. Печь имеет плоский свод. Выкатка пода осуществляется электромеханическим электроприводом.

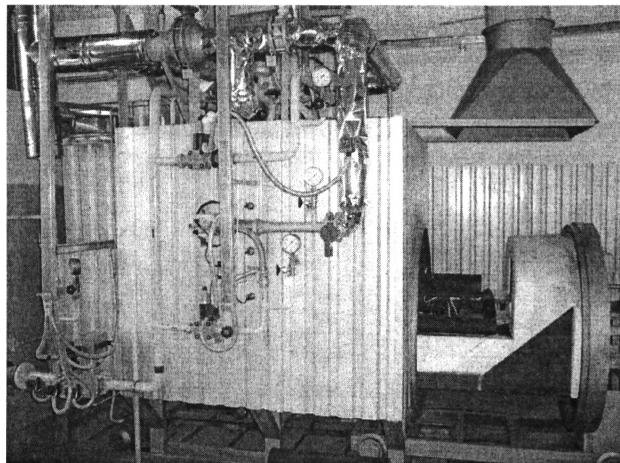


Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда «Нагревательная печь с выкатным подом»

На боковых поверхностях печи расположены две короткофакельные горелки (модель ВИС 100, производитель Kromschroder, Германия). На своде печи установлена одна плоскопламенная горелка (модель ВЮ 140, производитель Kromschroder, Германия). При истечении из горелки пламя формируется таким образом, что не вступает в соприкосновение с садкой, значительный импульс истечения газов при этом обеспечивает интенсивный конвективный теплообмен садки и дымовых газов.

Воздух на горение подается посредством напорного вентилятора по системе воздухопроводов. Отвод продуктов горения принудительный и осуществляется тягой дымососа. Печь оборудована recuperатором, в котором холодный воздух, подаваемый на горение, подогревается за счет тепла уходящих дымовых газов.

Контроль процесса нагрева осуществляется автоматической системой управления, которая полностью разработана и изготовлена сотрудниками ИТМО. При необходимости управление процессом горения может выполняться в ручном режиме непосредственно с экрана промышленного компьютера, на котором установлена программная часть системы управления. При управлении процессом контролируются следующие параметры:

- температура в рабочей камере печи в 4-х точках;
- температура нагреваемых стальных заготовок (в 4-х точках);
- температура внутри футеровки печи на различной глубине;
- температура нагрева первичного воздуха, подаваемого на горение;
- соотношение газ/воздух при любой мощности горелок (поддерживается постоянным);
- химический состав дымовых газов;

- температура дымовых газов перед recuperатором;
- температура дымовых газов перед дымососом;
- разрежение в печи.

Стенд позволяет проводить исследования различных режимов нагрева стальных и чугунных заготовок и готовых изделий (нагрев под отпуск, закалку, отжиг, ковку) и режимов сжигания природного газа, отрабатывать алгоритмы автоматического управления тепловыми процессами в печи, исследовать стойкость различных футеровочных материалов для различных режимов нагрева, конструкции газогорелочных устройств (их применимость для конкретной технологии нагрева), конструкции recuperаторов тепла дымовых газов и ряд других параметров. Созданная печь характеризуется высокой эффективностью использования тепла сжигаемого природного газа: для режимов нагрева стальных заготовок до температур закалки (800-850°C) тепловой КПД печи составляет 40-41%. Этот показатель в 2,5-3 раза выше, чем в средний КПД аналогичных печей, эксплуатируемых в настоящее время на промышленных предприятиях республики.

На экспериментальном стенде были использованы все современные технические устройства и элементы, позволяющие повысить энергоэффективность работы печей.

Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования показали, что для повышения энергоэффективности работы печи принципиальными являются четыре составляющие: 1) современные газогорелочные устройства, 2) автоматизированная система управления тепловым процессом, 3) легковесные волокнистые футеровочные материалы, 4) recuperация тепла уходящих дымовых газов. Остановимся ниже подробнее на каждом из перечисленных элементов с точки зрения их использования в широком спектре печного оборудования.

На современной печи необходимо использовать двухпроводные газогорелочные устройства, на которые газ и воздух для горения подаются принудительно. Именно это обстоятельство позволяет регулировать мощность горелки в широком диапазоне и recuperировать тепло уходящих дымовых газов, т.е. подогревать воздух, поступающий в горелки.

Основные типы горелок, которые сегодня предлагают производители, это факельные (короткофакельные и длиннофакельные), плоскопламенные, recuperативные, радиационные трубы и др. (рис. 2-5).

Особенностью факельных горелок (рис. 2) является высокая скорость истечения пламени (фактически горячей газовой смеси) из сопла горелки. Эта скорость достигает 100-150 м/с, что позволяет интенсивно перемешивать печные газы и интенсифицировать процесс теплообмена в рабочем пространстве печи. Однако такие горелки рекомендуется располагать таким образом, чтобы струя пламени не контактировала с садкой печи и не создавала локальных перегревов металла. Отметим, что короткофакельные горелки, в которых используется закрутка газового потока в продольном направлении, имеют меньшую длину факела (при мощности горелки в 100 кВт длина факела может составлять менее 0,5 м). За уменьшение длины факела приходится платить уменьшением скорости истечения газопламенного потока: 80-100 м/с у короткофакельных горелок по сравнению со 120-180 м/с у длиннофакельных.

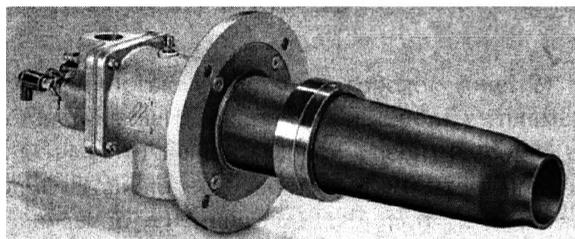


Рис. 2 – Короткофакельная горелка. Модель VIC 100 (Kromschroder, Германия) мощностью 160 кВт с керамическим насадком

Плоскопламенные горелки характеризуются тем, что благодаря конструкции головки горелки и специальной конфигурации горелочного камня пламя имеет не форму факела, а форму раскрывшегося цветка, лепестки которого закручены по спирали (рис. 3). Такая форма пламени обеспечивает большую равномерность обогрева рабочего пространства и садки печи, не приводит к локальным перегревам металла. Такие горелки удобно использовать в тех случаях, когда существуют ограничения по габаритам и необходимо исключить контакт пламени горелки и садки. Плоская форма пламени достигается сильной закруткой потока, поэтому скорость истечения пламени у таких горелок заметно ниже и составляет 20-50 м/с.

Другой тип горелок, которые производители позиционируют как плоскопламенные, представлен на рис. 4. В данном случае пламя имеет плоскую форму благодаря прямоугольной форме сопла горелки, вытянутом в одном из направлений. Данные горелки являются кислородными, имеют более узкий диапазон регулирования мощности (25-100%) и ис-

пользуются преимущественно на стекловаренных печах. Следует отметить, что форма пламени этих горелок (рис. 4, б) способствует более равномерному обогреву рабочего пространства печи.

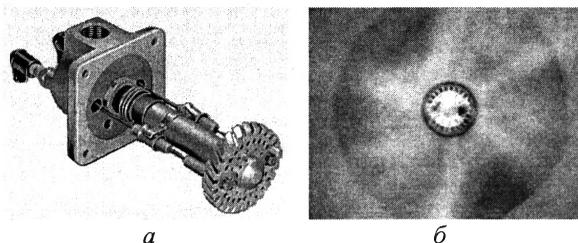


Рис. 3. Плоскопламенная горелка, работа которой построена на осевом закручивании газового потока. Модель BIO (Kromschroder, Германия): а – общий вид механической части, б – горелка в работе, вид спереди

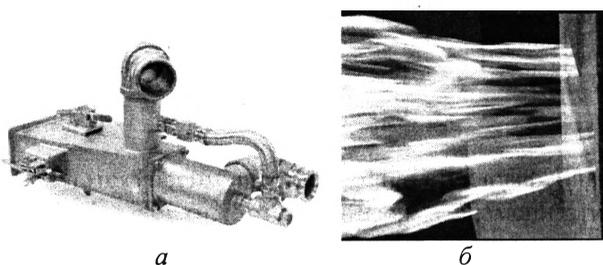


Рис. 4. Плоскопламенная горелка. Модель Eclipse PF400 (США): а – общий вид механической части; б – горелка в работе, вид сбоку

По поводу рекуперативных горелок стоит отметить следующее. Конструкция этих горелок позволяет подогревать воздух, подающийся на горение, непосредственно в самой горелке (рис. 4). Это достигается благодаря удалению дымовых газов из печи не через дымоходы, а через горелку. К достоинствам этой горелки стоит отнести высокую температуру подогрева воздуха. Недостатками этих горелок, ограничивающими их применение на печах, являются:

- 1) высокая стоимость (даже при европейских ценах на газ только для окупаемости горелок, обусловленной экономией газа, необходимо их непрерывная работа в течение приблизительно 3-4 тыс. часов);
- 2) более узкий диапазон регулирования мощности (50-100% по сравнению с 10-100% у факельных горелок);
- 3) более сложная конструкция газопроводов печи;
- 4) большие габариты (длина трубы на горелке, необходимой для рекуперации, составляет 500-600 мм, в отдельных случаях может достигать 1 м, что требует наличия стен такой же толщины);
- 5) большое давление воздуха (около 80 мбар),

требуемое для нормальной работы горелки. Такие горелки, по нашему мнению, больше подходят для работы в агрегатах, где необходимо обеспечивать постоянную тепловую мощность (например, в водогрейных или паровых котлах).

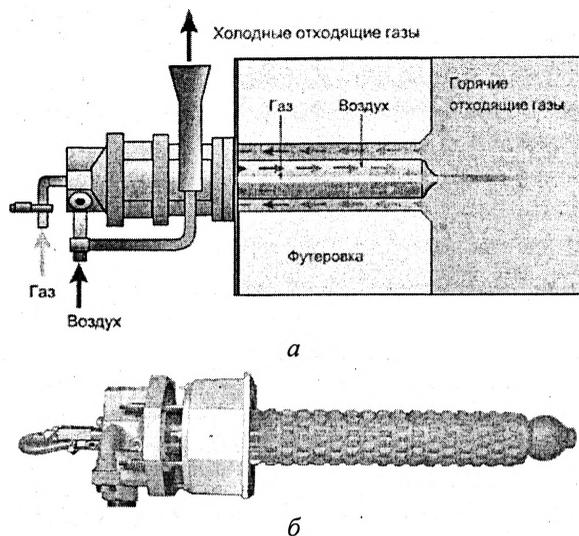


Рис. 5 – Recuperативная горелка Rekumat C100 (Германия) мощностью 20 кВт: а - принцип работы; б – общий вид

Радиационные трубы используются в тех случаях, когда технология нагрева требует строгого контроля состава атмосферы в рабочем пространстве печи. В этом случае сжигание газа происходит внутри закрытой керамической трубы. Нагретые изнутри стенки трубы своим тепловым излучением нагревают садку металла. Данная технология является высокоэффективной с точки зрения качества нагрева, но более дорогой по сравнению с перечисленными выше.

Анализ целой совокупности факторов показывает, что для использования на промышленных печах в условиях Республики Беларусь целесообразно применять факельные и плоскопламенные горелки. Здесь необходимо отметить, что в настоящее время в Республике нет собственных производителей качественного газогорелочного оборудования. Учитывая потребности в таком оборудовании, представляется актуальным вопрос об кооперации науки и производства и организации выпуска собственных газогорелочных устройств.

По поводу автоматизированной системы управления (АСУ) тепловыми процессами в печах отметим следующее. АСУ выполняет две основные функции: собственно точная регулировка параметров процесса и поддержание теплового режима и оперативное реагирование на аварийные ситуации (погасание пламени горелки, останов

электродвигателей, скачки давления газа и т.д.). Преимущества использования АСУ состоят в исключении субъективного человеческого фактора из сложного технологического процесса; экономии топлива за счет строгого соблюдения режима нагрева; повышенной безопасности эксплуатации (автоматическая отработка аварийных ситуаций); уменьшении вредных выбросов (CO , NO_x) за счет использования газоанализатора; уменьшении угара металла (окаинообразования) за счет автоматического поддержания заданного коэффициента избытка воздуха (малоокислительная атмосфера). Прямой эффект от использования АСУ, связанный с экономией газа, может составлять по разным оценкам от 15 до 30%. Однако косвенный эффект, связанный с качеством термообработки металла и соответственно, качеством готовой продукции, может существенно превышать прямой. Опыт разработки АСУ для печей показал, что данная система должна иметь следующий минимальный набор функций:

1) *Контроль температуры дымовых газов* в рабочем пространстве печи. Сигнал по температуре должен являться основным сигналом для системы управления, по которому выполняется регулирование мощности горелок. Количество и места расположения термопар (контрольных точек) должны быть привязаны к зонам печи (для проходных печей) или к группам горелок (для камерных печей).

2) *Регулирование мощности горелок* посредством исполняющих механизмов (как правило, это управляемые заслонки и клапана). Важным вопросом при изменении мощности горелок является поддержание заданного соотношения газ/воздух. Контроль этого соотношения целесообразно строить на измерении давления газа и воздуха непосредственно перед горелками. Для корректировки этого соотношения необходимо, чтобы АСУ контролировала температуру воздуха, подаваемого на горение. Отметим, что существующие системы управления мощностью, основанные на использовании импульсных трубок (по данной трубке давление воздуха управляет изменением давления газа, причем вмешаться в это управление можно только на стадии наладки), показали свою плохую работоспособность при изменении мощности горелок в широком диапазоне. Логичное в данном случае использование расходомеров для непосредственного регулирования мощности и соотношения газ/воздух наталкивается на проблему подбора оборудования с приемлемыми техническими характеристиками: существующие расходомеры

обеспечивают стабильное и точное измерение расходов при избыточном давлении газообразной среды около 1 атм. Газопламенные печи работают, как правило, с избыточными давлениями газа и воздуха в районе 0,05 атм. Поэтому использование расходомеров затруднено низкими давлениями газовых сред.

3) *Контроль разряжения в рабочем пространстве.* Этот вопрос важен с точки зрения энергоэффективности работы печи. Поддерживая близкое к нулю разряжение в печи мы добиваемся устранения паразитных подсосов холодного воздуха в печь. Теплофизические расчеты показали, что, например, для камерной печи при поддержании разряжения в рабочей камере на уровне 30-50 Па и наличии отверстия в ограждающих конструкциях суммарной площадью в 20-30 см² (это соответствует щели в 2-3 мм суммарной протяженностью 10 м) подсосы холодного воздуха превысят по объему количество воздуха, подаваемого напрямую в горелки. Данные подсосы при неправильной нерегулируемой работе печи могут снижать ее КПД на 15-20%. Наша рекомендация состоит в установке регулируемой заслонки на тракте дымоудаления печи. Положением данной заслонки достаточно легко контролируется уровень разряжения в рабочей камере при работе дымососа с постоянной мощностью.

4) *Контроль состава дымовых газов.* Наиболее важным компонентом, содержание которого необходимо контролировать в дымовых газах, является кислород. При корректной работе горелок и вентиляторов печи содержание кислорода в дымовых газах должно находиться на уровне 0.5-1 %. Контроль этого параметра несет на себе две функции: индикация наличия подсосов холодного воздуха в печь и контроль правильной установки соотношения газ/воздух на горелках. Вторая функция необходима потому, что установка соотношения газ/воздух по давлению выполняется АСУ на основе расчета, а не прямого измерения расхода, и поэтому всегда имеет определенную погрешность.

5) *Контроль безопасности работы печи.* Эта функция включает в себя контроль герметичности запорной газовой арматуры, контроль погасания пламени, контроль отключения вентиляторов и ряд других. Наличие этих возможностей, безусловно, только повышает надежность работы печи и не нуждается в отдельных комментариях.

На проблеме рекуперации тепла в промышленных печах в данной работе мы не будем подробно останавливаться. Рекуператор, подогревающий воздух до средней температуры в 200-250°C, по-

зволяет экономить 7-9% природного газа. Этой теме посвящено достаточно много специальной литературы. Здесь отметим только тот факт, что не существует универсальных рекуператоров и в каждом конкретном случае требуется индивидуальный подход, учитывающий конструктивные особенности печи и особенности режима нагрева. Хорошо известно, что коэффициент теплообмена при обтекании дымовыми газами и воздухом какой-либо поверхности пропорционален коэффициенту трения. Соответственно чем больше тепла мы хотим забрать у дымовых газов, тем большую потерю давления мы будем иметь на рекуператоре. Поэтому желание повысить эффективность работы рекуператора зачастую приводит к необходимости установки мощных вентилятора и дымососа. Это, в свою очередь, может привести к увеличению подсосов холодного воздуха, об отрицательной роли которых сказано выше. С другой стороны, регулирование мощности горелок в широком диапазоне может привести к ситуации, когда на определенных стадиях процесса нагрева удельная мощность, возвращаемая в систему за счет рекуперации тепла дымовых газов может оказаться меньше, чем электрическая мощность дымососа, затрачиваемая на осуществление такой рекуперации. Отметим также, что рекуператор, позволяющий подогревать воздух до высоких температур, должен иметь развитую теплообменную поверхность. Такой рекуператор является металлоемким и требует использования большого количества дорогостоящей жаропрочной стали. Срок окупаемости такого высокоэффективного рекуператора будет приблизительно равен сроку его эксплуатации.

В заключительной части статьи остановимся на проблеме использования новых волокнистых материалов при футеровке печей. Современные волокнистые теплоизоляционные материалы можно классифицировать, прежде всего, по температуре применения. Основные интересующие нас группы выглядят так: I) температура длительного применения до 750-800°C (материалы КТПУ, БТП, Paroc); II) до 1200°C; III) до 1400°C. Эти материалы изготавливают из смеси волокон Al₂O₃ и SiO₂ толщиной 2-5 мкм, либо из базальтовых волокон (материалы первой группы). Для высоких температур применения к указанным компонентам делают небольшие добавки волокон оксида циркония. Температура применения таких материалов сильно зависит от связующего, использованного для сцепления волокон. Отметим, что каждый температурный класс материалов харак-

теризуется своим уровнем цен – чем выше температура применения, тем дороже материал. Общий уровень цен на волокнистые материалы в разы превышает цены на традиционные огнеупоры. Именно это обстоятельство сдерживает пока широкое применение данных материалов. Следует отметить, что производителями сегодня предлагается достаточно широкая номенклатура волокнистых материалов: формованные плиты различных типоразмеров и различной механической прочности, рулонные нетканые материалы, картон и бумага, формованные фасонные материалы, ленты, шнуры и т.д.

К преимуществу волокнистых материалов следует отнести низкую теплопроводность (0,1-0,3 Вт/(м К)) по сравнению с традиционными огнеупорами (0,6 Вт/(м К) легковесный шамот, 0,8-1 Вт/(м К) шамотный кирпич). Это означает, что стене из шамотного кирпича толщиной в 50 см по тепловому сопротивлению эквивалентна стена из волокнистого материала толщиной 10-15 см. Благодаря легковесности волокнистых материалов (150-450 кг/м³) и их теплоизоляционным свойствам уменьшение массы футеровки при замене ими кирпича может достигать 10-20 раз. За счет того, что эффективно на процесс нагрева в печи влияет только приповерхностный слой футеровки, потери на прогрев футеровки уменьшаются при этом в 5-10 раз. Важным свойством таких материалов является их высокая эффективная степень черноты (0,7-0,9). Благодаря этому эффективно и равномерно прогревается приповерхностный слой футеровки, после чего тепло переизлучается назад в рабочее пространство печи. Таким образом, использование данной футеровки позволяет улучшить и равномерность нагрева садки.

Одним из самых популярных и эффективных способов монтажа футеровки являются модули из рулонного материала (рис. 6). Эти модули с использованием специальной крепежной оснастки монтируются на предварительно подготовленные ограждающие конструкции печи. После крепления модулей ленты, сжимающие материал, удаляются, и за счет своих упругих свойств соседние модули поджимают друг друга, благодаря чему получается газоплотная стена. В местах с наибольшей тепловой нагрузкой (как правило, вблизи горелок), производители рекомендуют промазывать материал специальной высокотемпературной мастикой. Это упрочняет поверхность материала, уменьшает высокотемпературную абляцию.

Для уменьшения стоимости футеровки иногда применяют многослойную композицию материа-

лов. Это связано с тем, что даже если в рабочей температуре печи составляет 1250°C, то температура футеровки уже на глубине 100 мм не будет превышать 800-900°C. Соответственно возможно применить многослойную конструкцию, в которой внутренний слой имеет максимальную температуру применения, соответствующую рабочей температуре печи, а последующие слои изготавливаются из материалов со все более низкой температурой применения. При существенном снижении стоимости футеровки такой способ имеет недостаток, связанный с надежностью и долговечностью системы крепления футеровки, а также с разнородностью материалов. В этом случае экономия на материале может обернуться дополнительными эксплуатационными затратами.

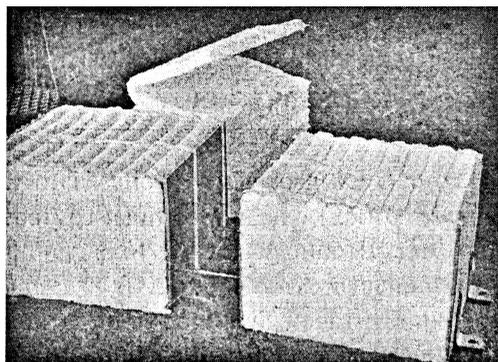


Рис. 6 – Модули из волокнистой изоляции с крепежными элементами

Относительно вопроса теплоизоляции ограждающих конструкций печи необходимо отметить, что из-за низкой механической прочности волокнистых материалов полностью исключить использование традиционных огнеупоров не представляется возможным. В каждой конкретной ситуации необходимо искать компромисс между стоимостью материалов, их теплоизоляционными свойствами и механической прочностью всей конструкции.

Представленные выше выводы и рекомендации не являются исчерпывающими. Они затрагивают лишь основные вопросы, возникающие при модернизации печного парка. Мы уверены, что только тесная кооперация науки и производства позволит создать в ближайшем будущем образцы печного оборудования, конкурентноспособного на внутреннем и внешних рынках.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. М.Л. Герману, под чьим руководством начинались работы по печной тематике.