

Зменшення внутрішніх напружень зумовлено тим, що під час розпилювання колоди під кутом до її осі відбувається перерізаня річних кілець і деревних волокон, тому випиляна під кутом пилопродукція не містить довгих ділянок річних приростів з неперерізними волокнами. Це призводить до зменшення внутрішніх напружень у пилопродукції під час її експлуатації. Зменшення напружень сприяє зменшенню величини внутрішньої (результуючої) сили в ділянках річних приростів.

Окрім запропоновані варіанти схем набору КЩК з урахуванням текстурних особливостей наведено на рисунку.

Передумовою реалізації запропонованих варіантів (рис.) у виробничих умовах є вирішення таких основних завдань, як дослідження перспективного попиту (соціологічний показник) на пропоновану продукцію та забезпечення експлуатаційних показників КЩК, зокрема їх формостійкості.

Висновки:

1. З метою урахування текстурних особливостей у процесі виготовлення КЩК із дотриманням вимог їх міцності та формостійкості запропоновано проектно-технологічні рішення, реалізація яких у виробничих умовах сприятиме як вирішенню поставлених завдань, так і раціональному використанню деревини.
2. Запропоновані варіанти схем набору КЩК з урахуванням текстурних особливостей дадуть змогу урізноманітнити дизайнерські рішення у виробництві виробів із деревини.

Література

1. Рыбицкий П.Н. Технологические варианты производства мебельных щитов / П.Н. Рыбицкий, Н.В. Лебединская // Современные проблемы конструирования и производства художественных изделий из древесины. – Архангельск : Изд-во АГТУ. – 2006. – С. 161-167.
2. Боровиков А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев / под ред. Б.Н. Уголева. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1989. – 294 с.
3. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Gen. Tech. Rep. / FPL–GTR–190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2010. – 508 p.
4. Войтович І.Г. Основи технології виробів з деревини : навч. посібн. / І.Г. Войтович. – Львів : Вид-во УкрДПУ, "Інтелект-Захід". – 2004. – 143 с.
5. Маєвський В.О. Дослідження формостійкості клеєних щитів з масивної деревини дуба / В.О. Маєвський, Ю.В. Бєнях // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2005. – Вип. 15.5. – С. 199-208.
6. Пат. 91374 Україна, МПК (2009) B27 M 3/00. Спосіб виготовлення клеєного щита зі збереженням текстури деревини / В.О. Маєвський, В.М. Максимів, В.С. Каленський; заявник і патентовласник ДВНЗ Націон. лісот. ун-т України. – заявл. 25.02.2008; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14.
7. Majevskyy V. The effect of a sawing angle on wood texture / V. Majevskyy, V. Maksymiv, I. Sopushynskyy, A. Teischinger // Folia Forestalia Polonica, Series B. – Poznan : Wyd-wo "Drzewnictwo". – 2008. – Issue 39. – Pp. 45-54.
8. Пат. 31116 Україна, МПК (2006.01) B27V 1/00. Спосіб отримання пилопродукції з U- та O-подібною текстурою деревини / В.О. Маєвський; заявник і патентовласник ДВНЗ Націон. лісот. ун-т України. – заявл. 03.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.

Маєвський В.А., Удовіцка М.В. Основные направления исследований в производстве клееных щитовых конструкций из древесины с соблюдением текстурных особенностей

Охарактеризованы основные способы изготовления клееных щитовых конструкций. Проанализированы традиционные технологические подходы по обеспечению их прочности и формоустойчивости, отмечены недостатки существующего производства.

Предложены проектно-технологические решения изготовления клееных щитовых конструкций, а также варианты схем их набора с соблюдением текстурных особенностей, прочности и формоустойчивости. Предложены пути обеспечения стабильности формы этих конструкций, которая проявляется в способности сохранять свои структурные размеры в переменных климатических условиях.

Ключевые слова: клееные щитовые конструкции, текстурные особенности, формоустойчивость, схемы набора, проектно-технологические решения.

Majevskyy V.O., Udovityska M.V. Main Research Areas in the Field of the Wood Laminated Panel Constructions Production with Textural Features Compliance

Existing ways of making laminated panel constructions are characterized. Traditional technological approaches to ensure laminated panel constructions strength and shape stability are analysed. The shortcomings of existing production are highlighted. Design and manufacturing technology solutions of making laminated panel, and also variants of a set of texture features, strength and shape stability are proposed. Ways of ensuring the shape stability of these structures, which manifest themselves in the ability to retain its structural dimensions in variable climatic conditions, are proposed.

Key words: wood panel design, texture features, shape stability, circuit set, design and technology solutions.

УДК 621.4

Науч. сотрудник К.В. Азеев – Институт газа НАН Украины

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕКУПЕРАТОРОВ СО ВСТАВКАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧНЫХ АГРЕГАТОВ 1

Рассмотрены основные подходы в конструировании и приведены типичные конструкции рекуператоров для нужд промышленности. Предложена классификация рекуператоров на основе аэродинамических схем движения нагреваемого воздуха для интенсификации теплообмена на воздушной стороне. Показано, что одной из современных тенденций в конструировании рекуператоров является комбинирование различных схем взаимного движения дымовых газов и воздуха в рекуператорах, создание многозаходных теплообменников, интенсификация теплоотдачи на воздушной стороне за счет использования теплообменных труб фасонного сечения и изогнутого профиля, установки оребренных, применения технологии импульсных струй для создания общего турбулентного вихря. Отмечено, что значительное повышение скоростей нагреваемого воздуха на входе в рекуператор (создание высокоскоростных теплообменников) применялось ранее лишь в системах горелочных устройств. Показано, что в конструировании высокотемпературных рекуператоров для крупногабаритных печей обычно прибегают к традиционной компоновке, а модернизация рекуператоров за счет установки в них активных перфорированных вставок может применяться для средних и компактных теплообменников. Приведены классификации рекуператоров по различным классификационным признакам, указаны трудности при их сравнении. Предложена классификация конструкций рекуператоров, в основу которой положена аэродинамическая схема, используемая для повышения эффективности теплоотдачи на воздушной стороне, а также предложено конструктивное решение для формирования в рекуператоре турбулентного вихревого движения нагреваемого воздуха за счет совместного действия истекающих из перфорированной вставки струй и дополнительных завихрителей.

Ключевые слова: аэродинамическая схема рекуператора, турбулентный вихрь, импульсные струи, распорки-завихрители.

1 Автор выражает искреннюю благодарность А.А. Кадочникову и Ар.А. Кадочникову, на практике продемонстрировавшим автору высокую эффективность движения по спиральным вихревым траекториям.

Согласно анализу докризисных показателей потребления природного газа отраслями национальной экономики Украины, основными его потребителями в порядке убывания являются горно-металлургический комплекс, химическая и нефтехимическая промышленность, машиностроение [1]. В настоящее время в машиностроении работают тысячи печных агрегатов для нагрева заготовок под ковку, штамповку, термическую обработку: закалку, отпуск, нормализацию.

Плавильные и нагревательные печи промышленных предприятий являются одними из наиболее крупных потребителей топлива в стране. По данным Министерства промышленной политики Украины, в докризисное время потребление природного газа в прокатном производстве составляло 1,2 млрд м³, такие же объемы, из которых значительная часть использовалась в нагревательных и термических печах, потреблялись на предприятиях машиностроения. Большинство печей имеют низкий термический КПД, иногда в пределах 15-25 %, что обусловлено большими потерями теплоты с отходящими продуктами сгорания, которые составляют 50-60 % теплоты, подводимой в печь [2].

Согласно докладу Института экономики и прогнозирования НАН Украины, экономический рост Украины в 2000-2008 гг. происходил за счет восстановительных процессов и не был связан со структурными преобразованиями в экономике, а базировался на созданных в советское время производственных мощностях, консервировал устаревшую производственную структуру [3]. Указанные процессы экономического роста определялись внешней благоприятной конъюнктурой краткосрочного характера на внешних рынках химической и металлургической продукции – основных товарных группах украинского экспорта [4].

Однако в настоящее время высокочрезвычайно и капиталоемкие мероприятия экономии энергоносителей – природного газа в промышленности такие, как переход при выплавке стали с мартеновского на конвертерный процесс, частичная или полная замена природного газа на пылеугольное топливо и введение в строй систем непрерывного литья заготовок, использование внутренних энергоресурсов, – не подкреплены бюджетным финансированием, следовательно, перекладываются на оборотные средства хозяйствующих субъектов и являются невыполнимыми в краткосрочной перспективе.

Поэтому в качестве малозатратных энерготехнологических мероприятий, экономически рентабельных даже в условиях перманентного экономического кризиса, согласно "Отраслевой программе энергоэффективности и энергосбережения на период до 2017 г." Минпромполитики, предлагаются следующие: повышение эффективности использования топлива в печах для нагревания и выплавки металла и в других печных агрегатах посредством подогрева воздуха для горения за счет использования теплоты уходящих газов в рекуператорах, рекуперативная утилизация тепла на стендах подогрева ковшей и в хозяйстве прокатных станов, утилизация физической теплоты внутренних энергоресурсов и др. [5].

Поскольку срок окупаемости данных предложений составляет, по докризисным оценкам [1], меньше 1 года, изучение современных тенденций их конструирования, основных принципов повышения эффективности теплообмена на воздушной стороне, а также разработка и внедрение таких малозатратных энергосберегающих предложений, в частности рекуперативных легких высокотемпературных теплообменников, является актуальной научной задачей.

Современные теоретические представления о процессе теплопередачи в рабочем пространстве печи как о радиационно-конвективном режиме теплообмена, в отличие от представлений этого процесса как основанного преимущественно на передаче лучистой энергии (радиационный режим), показывают, что основной вклад в интенсификацию теплообмена вносит аэродинамика движения газов, определяющая линии их тока, степень турбулентности в определенных местах дымовых каналов и местные аэродинамические сопротивления печи [6].

Повышение энергоэффективности работы металлических трубчатых рекуператоров на стороне дымовых газов может достигаться за счет увеличения поверхности теплообмена (диаметров либо длины нагреваемых труб рекуператоров), изготовления рекуператоров с фасонными нагреваемыми поверхностями, использования изогнутых трубных пучков [7]. Повышение энергоэффективности рекуператоров может достигаться в том числе за счет размещения нагреваемых труб рекуператоров в дымовых каналах печей под углами, обеспечивающими максимально эффективный теплообмен с дымовыми газами (обычно перпендикулярно их движению), за счет интенсификации процессов конвективного теплообмена на воздушной стороне рекуператора посредством увеличения скоростей воздуха либо увеличения пути его движения вдоль нагретой стенки (рекуператоры для больших металлургических печей и многозаходные рекуператоры) [8] или посредством размещения различных вставок в рекуператоры и оребрений для повышения турбулентности потока.

Известны классификации теплообменного оборудования, основанные на различных отличительных характеристиках. Так, по принципиальной конструкции теплообменников выделяют следующие типы теплообменников: типа "труба в трубе", кожухотрубные, пластинчатые теплообменники, пластинчато-ребристые или матричные теплообменники, теплообменники со вспомогательными техническими средствами и теплообменники специализированных конструкций (других типов) [9].

По схеме движения дымовых газов и воздуха в рекуператорах выделяют рекуператоры, построенные по схеме прямого тока, противотока, перекрестного тока и комбинации перекрестного тока с прямотоком либо противотоком [10]. По материалу рекуператоров и режимам теплообмена выделяют конвективные рекуператоры из чугунных труб, термо-блоки (чугунно-стальные рекуператоры), чугунные рекуператоры из гладких стальных труб, радиационные и комбинированные рекуператоры [8].

При анализе рассмотренных конструкций рекуператоров используется предлагаемая автором классификация на основе применяемых в них аэродинамических схем движения нагреваемого воздуха для интенсификации теплообмена на воздушной стороне рекуператора.

Традиционные рекуператоры. Обзор по изобретениям России (данные Федерального института промышленной собственности, РФ, <http://www1.fips.ru>), Украины (данные ГП "Украинский институт промышленной собственности" <http://www.uipv.org/>), стран СНГ и дальнего зарубежья (European Patent Office, <http://worldwide.espacenet.com/>), а также обзор литературы дает основание говорить о том, что до 1970-х годов металлические рекуперативные теплообменники в СССР разрабатывались на основе традиционных подходов, использовалась аэродинамическая схема, где нагретый и нагреваемый воздух подаются на раз-

ных уровнях либо попеременно, подобно регенераторной системе мартеновских печей, в пространство теплообменника [11]. В подобном направлении двигалось и зарубежное научное сообщество [12].

Схема рекуператора "обдув пластины". Так, известен пластинчатый рекуперативный теплообменник с перекрестным током (рис. 1), представляющий собой конструкцию из теплообменных пластин 5, соединенных известным способом (болтами либо сваркой) с холодными 3 и горячими 4 переборками (пластинами) [12]. Теплообменные пластины и переборки формируют перекрестно расположенные каналы: горячий 1 для потока дымовых газов и холодный 2 для охлаждающего воздуха. В рекуператоре подаются перекрестно направленные потоки газов и воздуха, при этом за счет теплопередачи и конвекции достигается утилизация тепла дымовых газов за счет разогрева и охлаждения теплообменных пластин 5.

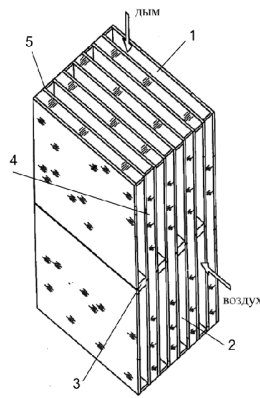


Рис. 1. Пластинчатый рекуперативный теплообменник с перекрестным током [12]: 1) горячий канал (дымовые газы); 2) холодный канал (воздух); 3) холодная переборка; 4) горячая переборка; 5) теплообменная пластина

Пластинчатые рекуператоры используются при температурах подогрева теплоносителя до 150-273 °С, состоят из ряда параллельных гофрированных пластин, обеспечивающих турбулизацию потока, а также обладающих достаточной жесткостью. Последнее условие требует изготовления самих пластины в ограниченной номенклатуре толщин (0,1-1 мм), типоразмеров для строго определенной области применения [9].

К недостаткам указанных рекуператоров можно отнести необходимость применения исключительно тонкостенных ребер малой высоты, что связано с необходимостью сохранения работоспособности ребер по всей высоте и необходимостью недопущения "выхолаживания" ребра, которая проявляется в снижении эффективности при высоте ребер более 4 мм [13]. В настоящее время в рекуперативных теплообменниках, сконструированных по этой аэродинамической схеме, активно применяются фасонные профили для теплообменных поверхностей [14] (рис. 2).

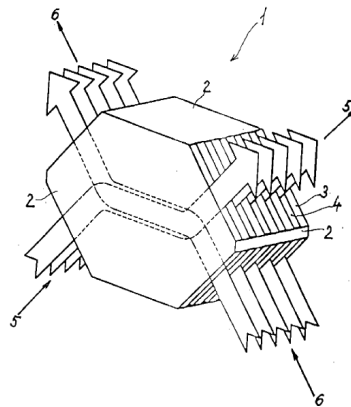


Рис. 2. Противоточный рекуперативный теплообменник [14]: 1) теплообменник; 2) барабан (корпус); 3, 4) переборки (ламель); 5, 6) подвод и отвод потока

К рекуператорам традиционных конструкций также можно отнести рекуператоры для больших металлургических печей, обычно применяемые для подогрева воздуха до 500-700°С. В нем нагреваемый воздух движется в трубах большого диаметра и длины, рекуператор обеспечивает многозаходность циркуляции нагреваемого воздуха. К недостаткам этого рекуператора можно отнести сложность и металлоемкость конструкции. Нагреваемые металлические трубы за счет прогорания от переизлучения из предрекуператорного пространства требуют установки дополнительной сложной системы противовесов-рычагов для предотвращения их провисания, а также установки перед входом в рекуператор дополнительных защитных, обычно радиационных, рекуператоров, подобных конструкции, описанной в [8].

Рекуператоры на основе технологии импактных струй. Активное использование принципа рекуперации тепла от нагретой стенки теплообменника за счет формирования системы натекающих на нее импактных (ударных) струй завоевало популярность в СССР в конце 1970-х годов и успешно применяется до настоящего времени. Зарубежные источники показывают широкое использование технологии струй, в том числе импактных совместно с применением сложных фасонных профилей, в системах охлаждения и рекуперации тепла: в высокоэффективных компактных теплообменниках [15], в системах вентиляции и кондиционирования [16], в турбинной технике, авиации и пр. [17].

Теоретическое описание процессов истечения струй из перфорированного воздуховода (вставки) и расчет его коэффициента сопротивления приводятся в работах по аэродинамике [18], в теории турбулентных струй [19] рассматриваются теоретический расчет коэффициента сопротивления при движении потока в зазоре коаксиальных цилиндров и его верификация данными эксперимента, накоплен значительный практический опыт расчетов истечения струй из отверстия в стенке и их траекторий в сносящем потоке внутри горелочных устройств [20], а также для неизотермических струй, влияние раскателей и завихрителей различной формы исследовались, в том числе в работах, проведенных Институтом газа НАН Украины в рамках исследований по программам УНТЦ [21], влияние воздушных решеток, лопаток турбин рассматривается в теории авиационных лопаточных машин [22].

Схема рекуператора "обдув перфорированной пластины". Во многих случаях при конструировании рекуператоров и в настоящее время применяется аэродинамическая схема обдува перфорированной пластины-раскателя с отверстиями разных диаметров и формы [23] (рис. 3), либо приведенная ранее система [7], которая представляет собой пакет перфорированных пластин или пучков труб без перфорации, куда нагретый и охлаждающий воздух подаются на разных уровнях либо попеременно, подобно регенераторной системе мартеновских печей.

Это объясняется простотой расчета аэродинамики движения газа и учета местных сопротивлений в таком теплообменнике [18], поскольку схема истечения струй из отверстий (сопел) в цилиндрической стенке не позволяет обеспечить их натекание под оптимальными (в диапазоне 45-90° [19]) углами и, следовательно, такая аэродинамическая схема затрудняет управление эффективностью рекуперации теплоты.

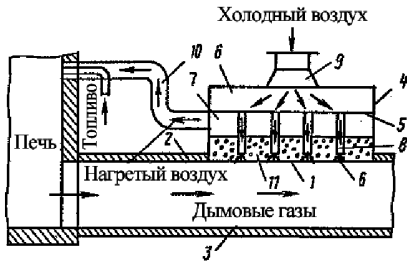


Рис. 3. Схема способа рекуперативного подогрева воздуха [23]:

- 1) теплообменная поверхность;
- 2) стенка; 3) газоход; 4) воздушный короб; 5) перегородка; 6) разводящий воздушный отсек; 7) собирающий воздушный отсек; 8) воздухоподающий патрубок; 9) воздухоподводящая труба; 10) воздухоотводящая труба; 11) расплав синтетического шлака

Рассмотренная выше аэродинамическая схема натекания охлаждающего воздуха на перфорированную пластину положена в основу струйного рекуператора конструкции Института газа НАН Украины [24]. При работе рекуператора формируется хорошо управляемая и аэродинамически достаточно просто рассчитываемая система истекающих (под углами, близкими к 90°) импактных струй, которая обеспечивает максимальную эффективность теплопередачи в точке контакта (удара). Популярность применения указанных конструктивных решений обусловлена и тем, что аэродинамический расчет данной схемы базируется на теоретических зависимостях, полученных благодаря аналитическому решению уравнения Навье-Стокса для случая обтекания воздухом бесконечной пластины при различных режимах потока [19].

Промышленные образцы рекуператора [24] при температурах дымовых газов (рекуператор РМС 1000) в рабочей камере $t_{гс} = 700-1065\text{ }^{\circ}\text{C}$ и теплообменной поверхности $t_{гп}$ до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволили получить температуру подогрева воздуха на выходе $t_{в}$ до $330\text{ }^{\circ}\text{C}$, для рекуператора РМС 500 $t_{гс} = 870-990\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{гп} = 230-390\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{в}$ до $280\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данный рекуператор относится к теплообменникам радиационного типа и предназначен для работы при температурах продуктов сгорания до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25].

Несмотря на простоту конструкции рекуператора и эффективность рекуперации тепла на воздушной стороне для приведенной аэродинамической схемы такой рекуператор при установке в рабочем пространстве печного агрегата будет на дымовой стороне недостаточно участвовать в конвективном теплообмене с печной атмосферой, отходящими дымовыми газами, разогреваясь лишь за счет лучистого теплообмена и переизлучения от кладки. Следовательно, для обеспечения эффективности нагрева его рабочей поверхности может потребоваться его установка в предтопках, либо непосредственно в рабочем пространстве печи (репортные методические печи).

Схема рекуператора "истечение струй из цилиндрической стенки".

Учитывая указанные выше ограничения для рекуператоров, построенных по аэродинамической схеме обдува перфорированной пластины [23] (рис. 3), применение технологии струй в рекуператорах параллельно развивалось по схеме истечения струй из отверстий в цилиндрической стенке. Конструктивно это выражалось в попытках установки различных вставок (в том числе перфорированных или так называемых активных) в трубчатые металлические рекуператоры и рекуператоры других конструкций [25].

Так, известен трубчатый рекуператор двойной циркуляции [8] (рис. 4, а).

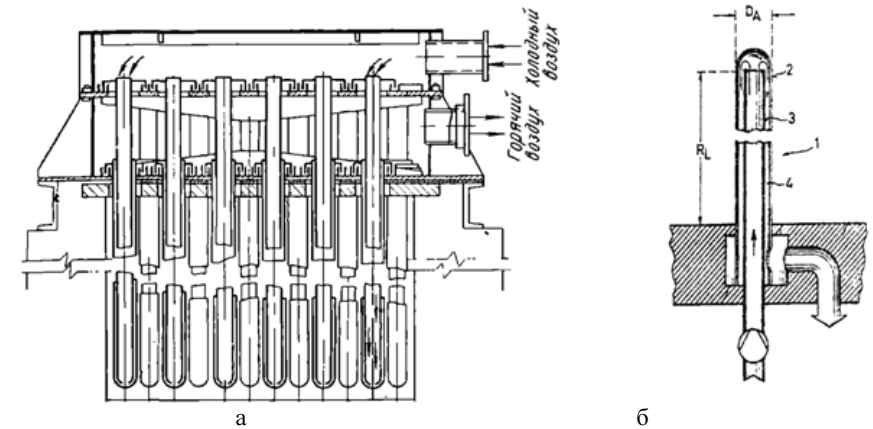


Рис. 4. Трубчатый рекуператор двойной циркуляции (а) [8], рекуператор Didieder-Werke AG (Вайсбаден) (б) [28]: 1) рекуператор; 2) наружная труба; 3) внутренняя труба; 4) осевой зазор; 5) отводящий патрубок

Рекуператор включает прямоугольный корпус с установленной в верхней части трубной доской (плитой) и смонтированными в ней в гнездах трубными вставками, а также трубной доской в нижней части, куда смонтированы нижние концы трубных вставок. Трубные вставки расположены в шахматном порядке. На нижнем конце вставки соединены с системой подвода нагретых дымовых газов из печи, на верхнем конце – с системой отвода дымовых газов. Посредине в верхней части корпуса перпендикулярно стенке установлен патрубок для подвода холодного воздуха во внутреннюю полость рекуператора, посредине в нижней части корпуса перпендикулярно стенке установлен патрубок отвода нагретого в рекуператоре воздуха.

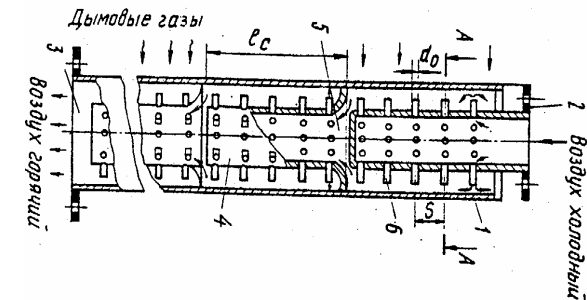


Рис. 5. Струйный рекуператор [26]: 1) корпус; 2) патрубок подачи холодного воздуха; 3) выходной патрубок нагретого воздуха; 4) поля вставки; 5) входной проем; б) газовыпускное отверстие с патрубком

Для нивелирования сносящего потока, который формируется при аэродинамической схеме истечения струй из отверстий в цилиндрической стенке, применялись струеобразователи в форме патрубков, расположенных перпендикулярно активной перфорированной вставке [26] (рис. 5), перфорация выполнялась

под углом 45° (сопла располагались в шахматном порядке либо были выполнены равномерно по длине вставки [27]).

Рекуператоры на основе вихревой технологии. Создание универсального рекуперативного теплообменника невозможно, поэтому технология струй в совокупности со вставками и оребрением различной формы применялась и для модернизации традиционных конструкций рекуператоров: U-образных, термоблоков и др., что позволило повысить эффективность рекуперации тепла при их неизменных габаритах. Прообразом активных вставок можно считать рекуператор двойной циркуляции [8] и его более поздняя зарубежная реализация фирмой Didieder-Werke AG [28] (рис. 4, б).

Например, известен U-образный теплообменник, в котором внутри воздушных U-образных труб для повышения эффективности теплоотдачи на воздушной стороне установлены закрученные ленточные вставки с различным шагом закрутки [29] (рис. 6).

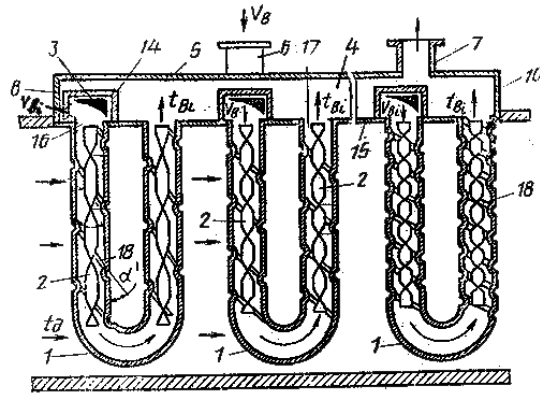


Рис. 6. Рекуператор [29]: 1) U-образная труба; 2) закрученная вставка; 3) воздушный короб; 4) короб нагретого воздуха; 5) крышка; 6) подводный патрубок; 7) отводящий патрубок; 8, 9, 10, 11) боковые стенки; 12) разделительная стенка; 13) отверстия; 14) П-образная раздаточная труба; 15) распределительная пластина; 16, 17) впускное и выпускное отверстие; 18) многозаходные спиральные выступы

С 1990-х годов до настоящего времени состояние дел в промышленности Украины характеризовалось резким падением количества патентуемых государственными НИИ конструктивных решений по рекуперативным теплообменникам. В основном патентная защита оформлялась на модернизированные теплообменники старых конструкций советского производства, которые реально показали свою эффективность в рамках того или иного предприятия. При этом рекуператоры, сочетающие в своей конструкции комбинации перечисленных выше подходов к интенсификации теплообмена и техническому исполнению, предлагались хозяйствующими субъектами с акционерной формой капитала, общественными фондами, либо индивидуальными изобретателями.

Известен радиационно-конвективный спиральный теплообменник, имеющий конусообразную, спирально-ступенчатую форму с патрубками подвода и отвода греющей и нагреваемой сред, в стенке которого имеется канал L-образного

(углового) сечения в виде конической спирали. В теплообменнике противоточком движутся вихри нагреваемого воздуха и высокотемпературных дымовых газов [30] (рис. 7). При этом множественная циркуляция достигается установкой внутри конусообразного корпуса фасонного патрубка с внутренним и наружным спиральным оребрением, которое согласуется по направлению винтовой линии со спиральными поверхностями внутреннего профиля конусообразного корпуса [31].

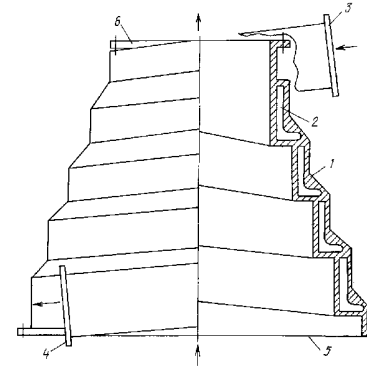


Рис. 7. Радиационно-конвективный теплообменник спирального типа [30]:

- 1) корпус;
- 2) L-образное сечение в корпусе;
- 3) патрубок подвода нагреваемой среды;
- 4) патрубок отвода нагреваемой среды;
- 5) подвод греющей среды;
- 6) отвод греющей среды

Также известен противоточный цилиндрический рекуператор для систем цеховой вентиляции и отопления, который представляет собой оребренную поверхность, выполненную в виде винтовых спиральных ребер [32]. Теплообменник включает внешнюю и внутреннюю трубные вставки с оребренными поверхностями, которые выполнены в форме винтовых продольных спиральных ребер, представляющих продольные спиральные завихрители. Эти спиральные завихрители на поверхности внешней и внутренней трубных вставок расположены коаксиально и с обоих концов теплообменника образуют кольцевой распределитель с входным и выходным каналами для впуска цехового и выпуска холодного воздуха одновременно (рис. 8).

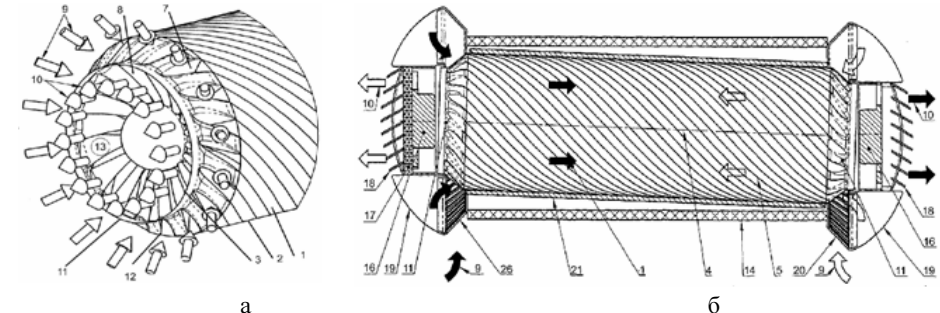


Рис. 8. Противоточный цилиндрический рекуперативный теплообменник [32]:

- 1) рекуперативный теплообменник, 2) наружная труба, 3) внутренняя труба, 4) продольная ось, 5) поверхность теплообмена, 6) внешняя винтовая линия, 7) входной канал, 8) выходной канал, 9) подвод воздуха, 10) отвод воздуха, 11) распределитель, 12) внешняя распределительная зона, 13) внутренняя распределительная зона, 14) корпус, 15) внешняя защитная труба, 16) нагнетатель, 17) фильтр, 18) выхлопная решетка, 19) крышка, 20) решетка всасывания, 21) наружная трубная вставка

Струйно-вихревые рекуператоры. Однако существует объективный предел повышения эффективности рекуперации на стороне дымовых газов за счет наращивания площади теплообменной поверхности, а также очевидны недостатки истечения струй из отверстий в перфорированной цилиндрической вставке. И если для компактных металлических теплообменников целесообразна модернизация на основе технологии струй, установки вставок и оребрения, то для крупных рекуператоров (длиной 5 м и более) основное влияние будет оказывать фактор масштаба, сложность инженерного расчета и изготовления теплообменника больших размеров, что по-прежнему вынуждает применять в таких случаях традиционные подходы при их конструировании, а именно: многократность циркуляции нагретого воздуха (многозаходный рекуператор), увеличение диаметров и длины труб, либо их изгиб [34].

Таким образом, задача повышения эффективности рекуперации тепла в настоящее время решается на основе комбинирования режимов (прямоток, противоток, комбинированный противоток) взаимного перемещения нагретых дымовых газов и охлаждающего воздуха в рабочем пространстве рекуператора. При этом очевидно достижение эффекта синергии за счет совместного действия различных факторов интенсификации теплообмена таких, как установка оребрений, применение в рекуператоре труб фасонного сечения, применение технологии импульсных (ударных) струй [24], формирование многозаходного потока газов и воздуха и прочие решения, которые объединяют в одной конструкции металлического теплообменника сразу несколько из рассмотренных выше подходов.

Предлагаемая автором оценка эффективности конструкции рекуператора на основе аэродинамической схемы, применяемой для повышения эффективности теплообмена конвекцией на воздушной стороне, в отличие от других оценочных критериев (таких как рабочие температуры, материал либо особенности конструкции) открывает возможности для интенсификации научно-технического творчества и позволяет на основе физических принципов давать оценку этим новым конструктивным решениям. В особенности это касается перспективных конструкций теплообменников, которые можно отнести к специализированным типам (рекуператоры других конструкций) [9], для оценки энергоэффективности и расчетов которых неприменимы либо не существуют стандартные методики и нет достоверных данных стендовых экспериментов и промышленных испытаний.

Именно на основании описанного выше подхода в Институте газа НАН Украины, согласно патенту № 104396 от 27.01.14, Бюл. № 2 по патентной заявке на изобретение № а 2013 04891, предложен рекуператор с прямыми трубчатыми каналами, аэродинамика работы которого основана на принципе комбинированной струйно-вихревой технологии (рис. 9) [33].

Рекуператор может быть использован в печах для нагревания и выплавки металла и в других печных агрегатах для повышения эффективности использования топлива посредством подогрева воздуха для горения за счет использования теплоты уходящих газов. Предлагаемый рекуператор может быть установлен в канале отвода дымовых газов. Решена задача усовершенствования рекуператора конструкции типа "труба в трубе", в котором в результате установки внутри нагреваемой трубы внутренней перфорированной трубы (перфорированной вставки) с отверстиями, расположенными по спирали, и распорок-завихрителей вдоль нее

обеспечивается повышение эффективности теплоотдачи конвекцией и повышение температуры подогрева отходящего дутьевого воздуха, за счет чего снижается металлоемкость рекуператора и повышается ресурс его эксплуатации [33].

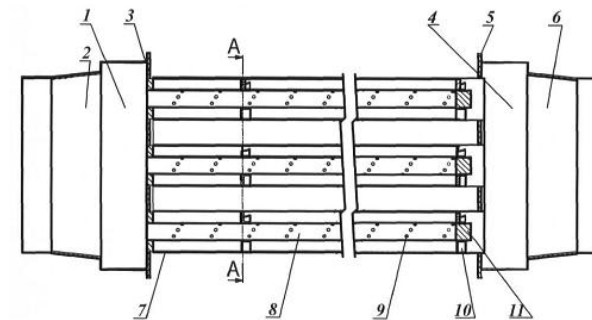


Рис. 9. Рекуператор [33]: 1) входящий воздушный короб; 2) диффузор; 3) входная перфорированная стенка (доска); 4) выходной воздушный короб; 5) выходная перфорированная стенка; 6) выходной воздуховод; 7) нагреваемая труба; 8) воздушная перфорированная труба; 9) сопла; 10) распорка-завихритель; 11) крышка

Теплообменник работает следующим образом. По дымоходу из рабочего пространства печи двигаются горячие дымовые газы. На пути своего движения они обтекают расположенные в шахматном порядке нагреваемые трубы 7 рекуператора, нагревая их поверхность до заданной температуры. Во внутренние воздушные перфорированные трубы 8 по входному воздушному коробу 1 через диффузор 2 подаются холодный воздух (20 °С). Этот воздух при прохождении по внутренним воздушным трубам 8 формирует турбулентный вихрь из импульсных (ударных) струй, которые взаимодействуют с нагретой стенкой нагреваемых труб 7, охлаждают ее и нагреваются сами, чем обеспечивают рекуперацию тепла отходящих дымовых газов.

Спиральная перфорация внутренней поверхности труб 8 при истекании воздуха формирует турбулизированный вихрь, который движется вдоль зазора между нагреваемыми трубами 7 и внутренними воздушными трубами 8. Обтекающие распорок-завихрителей 10 нагретым воздухом обеспечивают дополнительную турбулизацию сформированного вихря. Нагретый от стенки нагреваемой трубы 7 воздух подается к системе подогрева дутья горелочных устройств.

Совокупность характерных особенностей аэродинамической схемы рекуператора обеспечивает повышение эффективности теплоотдачи конвекцией за счет формирования турбулентного вихря из импульсных (ударных) струй из расположенных по спирали перфорированных отверстий и дополнительное повышение эффективности теплоотдачи конвекцией за счет закручивания формирующего вихря при обтекании распорок-завихрителей. При этом распорки-завихрители выполняют двойную функцию: кроме закручивания турбулентного вихря и обеспечения удара по охлаждаемой поверхности под углами, близкими к оптимальным для достижения максимально эффективной теплоотдачи, распорки-завихрители предотвращают провисание перфорированной вставки в случае перегрева.

Очевидно, что предлагаемая в [33] конструкция рекуператора за счет спирального расположения сопел (отверстий) в воздушной трубе (перфорированной

вставке) нивелирует взаимное сносящее действие истекающих из них струй, как основной недостаток аэродинамической схемы "истечение струй из цилиндрической стенки" и обеспечивает формирование импактных струй и их удар о негретую поверхность под оптимальными для теплообмена конвекцией углами. Кроме того, спиральное расположение сопел обеспечивает формирование закрученного турбулизированного вихря из импактных струй, который дополнительно закручивается и турбулизуется распорками-завихрителями.

Выводы. Использование высокоскоростной подачи воздуха и технологии истечения струй из отверстий в перфорированной цилиндрической стенке (трубе) с одновременным формированием с их помощью, а также благодаря завихрителям и оребрению единого вихревого турбулентного потока не применялось ранее для рекуператоров, а в основном использовалось при конструировании горелочных устройств. В частности, это можно наблюдать на примере конструктивных решений, принятых для плоскопламенной со шнеком и убывающим шагом (либо с насадкой типа "Щ") горелки, разработанной в Институте газа НАН Украины [6].

Однако в случае горелочных устройств задачей является не интенсификация теплообмена и рекуперация тепла, а обеспечение заданных параметров смешивания топлива с воздухом и формирование факела (струи) пламени с заданными параметрами. Несмотря на это, указанный подход, а именно: высокоскоростная подача воздуха в рекуператоры в сочетании со струйным истечением охлаждающего воздуха и его дополнительной турбулизацией в зоне нагрева за счет установки оребрений и трубных поверхностей сложной формы – очевидно, с успехом может применяться и для создания компактных высокоэффективных металлических рекуперативных теплообменников, что вполне соответствует современным представлениям о способах повышения тепловой эффективности рекуператоров, адекватно уровню отечественных и зарубежных научно-технических разработок.

Конкретные конструктивные решения и их эффективность рассматриваются в статье исходя из представления о режиме теплообмена в печах (рекуператорах) и других энерготехнологических агрегатах, как конвективно-радиационном. В этом случае одним из определяющих факторов повышения эффективности теплообмена на воздушной стороне, совместно с температурой процесса, может считаться аэродинамическая схема рекуператора. Выделены следующие аэродинамические схемы рекуператоров: движение воздуха внутри трубы круглого (фасонного) сечения, обдув пластины струями перфорированной насадки, истечение струй из отверстий в трубной цилиндрической стенке, закручивание потока струй внутренними оребрениями, выступами, фасонными частями, формирование многозаходного потока охлаждающего воздуха. При этом полагается, что управление аэродинамикой работы теплообменника на воздушной стороне является инструментом повышения эффективности теплообмена конвекцией.

Такой подход к конструированию рекуператоров и повышению их эффективности положен в основу предлагаемого, согласно патенту № 104396 по патентной заявке на изобретение № а 2013 04891, теплообменника с активной перфорированной вставкой и оребрениями, где истекающие из перфорированных отверстий спирального расположения струи охлаждающего воздуха дополнительно закручиваются распорками-завихрителями с формированием единого турбулен-

тного вихря между активной вставкой и нагреваемой дымовыми газами наружной трубой [33].

Литература

1. Карп И.Н. Количественная оценка влияния внедрения энергосберегающих технологий на экономию природного газа в промышленности и энергетике / И.Н. Карп, Е.И. Сухин // Экологическая и ресурсосбережение, 2007. – С. 24-44.
2. Парамонов А.М. Научные основы повышения эффективности работы печных агрегатов : дисс. ... д-ра техн. наук / А.М. Парамонов, 2007. – 216 с.
3. Соціально-економічний стан України: наслідки для народу та держави: національна доповідь / за заг. ред. В.М. Гейця та ін. – К. : Вид-во НВЦ НБУВ, 2009. – 687 с.
4. Фінансово-монетарні важелі економічного розвитку. – В 3 т. / за ред. чл.-кор. НАН України А.І. Даниленка. – К. : Вид-во "Фенікс", 2008. – Т. 2. – 524 с.
5. Механізми грошового та фондового ринків і їх вплив на розвиток економіки України / за ред. чл.-кор. НАН України А.І. Даниленка. – К. : Вид-во "Фенікс", 2008. – 442 с.
5. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 року. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://industry.kmu.gov.ua/industry/control/uk/publish/article?art_id=70537&cat_id=67505.
6. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах / Б.С. Сорока. – К. : Изд-во "Наук. думка", 1993. – 416 с.
7. Доп. к а.с. 954719 СССР, МКИ³ F 23 L 15/074. Секция рекуперативного воздухоподогревателя / А.А. Костюченко, Н.В. Водорез, Н.Л. Борисов, И.В. Губин. – Оpubл. 30.08.82, Бюл. № 32.
8. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей / Б.П. Тебеньков. – М. : Изд-во "Металлургия", 1975. – С. 259-262.
9. Справ очник по теплообменникам : пер. с англ.; под ред. Мартыненко. – В 2-х т. – Т. 2. – М. : Изд-во Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
10. Справ очник по теплообменникам : пер. с англ.; под ред. Мартыненко. – В 2-х т. – Т. 1. – М. : Изд-во Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
11. А.С. 106927 СССР, МКИ F 23 L 15/04. Воздухо-воздушный подогреватель для печей / Г.Т. Довжук. – Оpubл. 01.01.57.
12. Pat. US 5909767 IC⁶ F28 F 3/00 Recuperative Cross Flow Plate-Type Heat Exchanger / Paul J. Batt. – Publ. 08.06.99.
13. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников / А.В. Чичиндаев. – Ч. 1. Теоретические основы : учебн. пособ. – Новгород : Изд-во НГТУ, 2003. – 400 с.
14. Patent CZ 2007679 F28D9/00, F28D9/02, F28F3/00, F28F3/02, F28F3/04, F28F3/12. Counter-Current Recuperative Heat Exchanger / P. Hazuka, J. Chlup. – Publ. 08.04.09, Bul. 14/2009.
15. Pat. FR 2888314 IC⁸ F28F 19/00, F28 D 7/10, F27 D 17/00, F 23 L 15/04, F 28 F 21/04, 21/08. Dispositif diminuant les risques de destruction des parois internes des recuperateurs metalliques de chaleur/R. Prior. – Publ. 12.01.07, Bul. 07/02.
16. Pat. WO 2013/041066 IC8 F24 F 12/00; F24 F 7/007; F24 F 7/08; F28 D 7/10. Countercurrent Cylindrical Recuperative Heat-Exchange Apparatus with Multiple-Threaded Helically Wound Heat Transfer Surfaces Intended Particularly for Ventilation Installations / J. Chlup. – Publ. 28.03.2013.
17. Агеев К.В. Технология импактных струй в активных вставках рекуператоров для повышения энергоэффективности печных агрегатов (Обзор) / К.В. Агеев // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2010. – № 4. – С. 21-27.
18. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции : учебн. пособ. / В.Н. Талиев. – М. : Изд-во "Стройиздат". – 1979. – 295 с.
19. Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности / Г. Шлихтинг. – М. : Изд-во иностр. лит-ры 1962. – 201 с.
20. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства / Ю.В. Иванов. – М. : Изд-во "Недра" 1972. – 276 с.
21. Проект 4365 "Розробка та оптимізація конструкції високотемпературного трубчастого рекуперативного теплообмінника підвищеної стійкості (РПС)": (Промежут. отчет 6 етап) / Инт. газа НАН Украины; Руковод. темы Б.С. Сорока, № ГР 0107u011471 – К., 2009. – 15 с.
22. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. – М. : Изд-во "Машиностроение" – 1986. – 432 с.
23. А.С. 1521989 СССР, МКИ³ F 23 L 15/04. Способ нагрева воздуха / М.В. Губинский, Ю.И. Розенгарт, В.И. Губинский, А.Н. Пеккер. – Оpubл. 03.07.87, Бюл. № 42.

24. Исследование и разработка струйных рекуператоров для повышения эффективности использования топлива в промышленных печах: ил РГБ ОД 61:85-5/4756/.
25. А.С. 1695055 СССР, МКИ⁴ F 23 L 15/04. Рекуператора / Б.Д. Сезоненко, А.Е. Еринов, Т.В. Скотникова, Я.Б. Полетаев, Р.А. Пилипенко, Ю.Г. Хорунжий, Я.И. Белокопытов, Л.П. Махов, В.А. Ена. – Оpubл. 30.11.91, Бюл. № 44.
26. А.С. 1642191 СССР, МКИ⁴ F 23 L 15/04. Струйный рекуператор / Б.Д. Сезоненко, Ю.Г. Хорунжий, Т.В. Скотникова, Я.Б. Полетаев, Р.А. Пилипенко. – Оpubл. 30.03.89, Бюл. № 14.
27. А.С. 1702107 СССР, МКИ⁴ F 23 L 15/04. Трубчатый рекуператор / Б.Д. Сезоненко, Ю.Г. Хорунжий, Т.В. Скотникова, Р.А. Пилипенко. – Оpubл. 28.08.89, Бюл. № 48.
28. Pat. DE 384320, IC⁴ F23L 15/04, F28D 7/12, F28F 21/04. Recuperator/H. Kainer, J. Sommerer, R. Reichenauer. – Publ. 06.28.90.
29. А.С. 1663326 СССР, МКИ⁴ F 23 L 15/04. Рекуператор / Б.Д. Сезоненко, А.Е. Еринов, Т.В. Скотникова, Я.Б. Полетаев, Р.А. Пилипенко, Ю.Г. Хорунжий, Я.И. Белокопытов. – Оpubл. 15.07.91, Бюл. № 26.
30. Пат. RU 2219437, МПК⁷ F 23 L 15/04, F 28 D 7/02. Радиационно-конвективный теплообменник спирального типа / Н.И. Бирюков, Н.М. Башилов, Г.А. Константинов. – Оpubл. 20.08.03.
31. Пат. RU 2005128406, МПК⁸ F 28 D 7/00. Радиационно-конвективный теплообменник спирального типа "Самовар" / Н.И. Бирюков, Н.М. Башилов, В.Д. Коршиков. – Оpubл. 20.03.07.
32. Pat. WO 2013/041066 IC8 F24 F 12/00; F24 F 7/007; F24 F 7/08; F28 D 7/10. Countercurrent Cylindrical Recuperative Heat-Exchange Apparatus with Multiple-Threaded Helically Wound Heat Transfer Surfaces Intended Particularly for Ventilation Installations / J. Chlup. – Publ. 28.03.2013.
33. Пат. 104396 Укр., МПК⁹ F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Рекуператор / К.В. Агеев. – Оpubл. 27.01.14, Бюл. № 2.
34. Пат. RU 2283988, МПК⁷ F 23 L 15/04. Рекуперативный подогреватель технологического воздуха / В.Ф. Суворикин, А.М. Спектор, Г.И. Царева. – Оpubл. 20.09.06.

Агеев К.В. Сучасні тенденції конструювання металевих рекуператорів із вставками для підвищення енергоефективності пічних агрегатів

Розглянуто основні підходи в конструюванні та наведено типові конструкції рекуператорів для потреб промисловості. Запропоновано класифікацію рекуператорів на основі аеродинамічних схем руху повітря, що нагрівається, для інтенсифікації теплообміну на повітряній стороні. Показано, що однією із сучасних тенденцій у конструюванні рекуператорів є комбінування різних схем взаємного руху димових газів і повітря в рекуператорах, створення багатозаходних теплообмінників, інтенсифікація тепловіддачі на повітряній стороні за рахунок використання теплообмінних труб фасонного перетину і згнутого профілю, установа ребер, застосування технології імпульсних струменів для створення загального турбулентного вихору. Зазначено, що значне підвищення швидкостей повітря, що нагрівається, на вході в рекуператор (створення високошвидкісних теплообмінників) застосовувалося раніше лише в системах пальникових пристроїв. Показано, що при конструюванні високотемпературних рекуператорів для великогабаритних печей зазвичай удаються до традиційного компонування, а модернізація рекуператорів за рахунок встановлення в них активних перфорованих вставок може застосовуватися для середніх і компактних теплообмінників. Наведено класифікації рекуператорів за різними класифікаційними ознаками, вказано на труднощі при їх порівнянні. Запропоновано класифікацію конструкцій рекуператорів, в основу якої покладено аеродинамічну схему, використовувану для підвищення ефективності тепловіддачі на повітряній стороні, а також запропоновано конструктивне рішення для формування в рекуператорі турбулентного вихорового руху повітря, що нагрівається, за рахунок спільної дії струменів, що витікають з перфорованої вставки, і додаткових завихрювачів.

Ключові слова: аеродинамічна схема рекуператора, турбулентний вихор, імпульсний струмінь, розпорки-завихрювачі.

Ageev K.V. Modern Design Trends of Metal Recuperators with Inserts for Furnaces Units Energy Efficiency Increase

The main approaches in recuperator designing are considered, and typical constructions of recuperators for the industrial needs are displayed. The classification of recuperators based on aerodynamic schemes of heated air movement to intensify the heat exchange on the air side

is proposed. It is exhibited that one of the modern tendencies in recuperators design is a combination of different schemes of mutual motion of flue gases and air in the recuperators, the creation of multiple turning heat exchangers, heat transfer enhancement on the air side through the use of heat exchange tubes of shaped cross-section and a curved profile, installation of finning, the application of technology of impinging jets to create a overall turbulent vortex. It is noted that a significant increase in velocities of the heated air entering the recuperator (the creation of high-speed heat exchangers) was used previously only in burner devices systems. It is displayed that the designers usually resort to the traditional layout in the high-temperature recuperators designing for large-sized furnaces and the modernization of recuperators by installing of active perforated inserts can be applied for medium and compact heat exchangers. The classifications of recuperators on various classification criteria are given, the difficulties when comparing them are demonstrate. The classification of the recuperator designs, which is based on aerodynamic scheme, used to improve the efficiency of heat transfer on the air side, is proposed, and also a design solution to generate in the recuperator a turbulent vortex motion of heated air through the joint action of the jets which outflow from the perforated insert and additional swirlers is suggested.

Key words: recuperator aerodynamic scheme, turbulent vortex, impinging jets, cross-bar swirlers, energy efficiency.

УДК 691.11:674.8:531.717.8

Аспір І.О. Кійко¹ – НЛТУ України, м. Львів

ВПЛИВ РОЗМІРІВ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КЛЕЄНИХ ШИТІВ НА ЇХ ФОРМОСТІЙКІСТЬ

Зважаючи на економічні та технологічні переваги, одним із раціональних способів використання деревини для меблевих виробів є клеєні щити. Клеєні щити, виготовлені з деревних відходів, вдало поєднують красу матеріалу і значно здешевлюють виробництво, сприяючи вирішенню питань ресурсоощадності. Запропоновано технологічний процес виготовлення клеєних щитів із кускових відходів деревини. Отримано регресійну залежність, що дає змогу ідентифікувати вплив довжини і ширини структурних елементів клеєного щита на його формостійкість. Визначено розміри структурного елемента, за яких відхилення від площинності є мінімальним.

Ключові слова: клеєний щит із кускових відходів, відхилення від площинності, лінійні розміри структурних елементів.

Актуальність стану питання. Із зростанням попиту на продукцію, виготовлену з деревини, збільшується кількість і потужність виробництв, а відтак – і об'єми деревних відходів. Оскільки деревина має надзвичайно важливе екологічно-промислове значення, пошук нових способів переробляння деревних відходів є актуальним питанням.

Огляд літературних джерел. У процесі роботи над цією темою проаналізовано низку наукових праць і статей, дотичних до теми досліджень. Серед них праці В.Н. Биковського, Б.С. Соколовського [1], Л.М. Ковальчук [2], Н.А. Попова [3], В.Н. Волинського [4], О.О. Кривик та В.О. Маєвського [5]. Внаслідок аналізу вище перелічених робіт зроблено висновок про те, що технологічний процес виготовлення клеєних щитів із кускових відходів деревини є не до кінця вивченим і проаналізованим, оскільки дослідники не пропонували виготовлення клеєних щитів, власне з кускових відходів масивної деревини невеликих розмірів.

¹ Наук. керівник: проф. В.М. Максимів, д-р техн. наук