

Энергосберегающие технологии

УДК 669.183.217.4:662.614.2

Технология импактных струй в активных вставках рекуператоров для повышения энергоэффективности печных агрегатов (Обзор)

Агеев К. В.

Институт газа НАН Украины, Киев

Рассмотрены некоторые аспекты технологии импактных струй. Показана актуальность научной задачи по исследованию и оптимизации процессов, протекающих в струйной вставке рекуператора. Описана модель структуры потока импактной струи. Рассмотрен процесс натекания импактной струи на поверхность теплообмена. Приведена классификация импактных струй. Установлены основные параметры, влияющие на эффективность работы активной струйной насадки рекуператора. Определены оптимальные диапазоны для значений этих параметров.

Ключевые слова: технология импактных струй, параметры струйной системы, активная насадка рекуператора.

Розглянуто деякі аспекти технології імпактних струменів. Показано актуальність наукової задачі з дослідження та оптимізації процесів, що протікають у струменевій вставці рекуператора, з використанням сучасних технологій. Описано модель структури потоку імпактного струменя. Розглянуто процес натікання імпактного струменя на поверхню теплообміну. Наведено класифікацію імпактних струменів. Визначено основні параметри, що впливають на ефективність роботи активної струменевої насадки рекуператора. Визначено оптимальні діапазони значень цих параметрів.

Ключові слова: технологія імпактних струменів, параметри струменевої системи, активна насадка рекуператора.

Повышение энергоэффективности печных агрегатов и снижение потребления топлив за счет повышения эффективности их использования в условиях промышленности Украины является актуальной научной задачей. Рекуперация теплоты обеспечивает экономию топлив, расширяет возможности их использования, повышает термический КПД печей. Рекуперативный подогрев воздуха обеспечивает уменьшение расхода топлива, позволяет использовать низкокалорийные топлива [1].

В последнее время для повышения эффективности металлических трубчатых рекуператоров применяются внутренние вставки в трубы. Эти вставки могут иметь форму трубы, спирали и др. Установка вставок позволяет увеличить температуру подогрева воздуха до 80 °С при той же температуре уходящих газов или уменьшить температуры горячей стенки рекуператора на 70–80 °С при той же температуре подогрева воздуха, что значительно продлевает срок службы теплообменника в условиях агрессивных сред.

Однако указанные выше вставки, по существу, можно охарактеризовать как пассивные. Применение таких вставок повышает эффективность работы рекуператоров благодаря повышению коэффициента теплоотдачи и увеличению поверхности теплообмена. Действительно, при диаметре вставки $d_{\text{вст}} \approx 1/2 d_{\text{трубы}}$ поверхность теплообмена увеличивается на $\sim 50\%$, а если вставка выполнена в виде полосы, то поверхность теплообмена может увеличиваться до $\sim 30\%$.

Следует принимать во внимание, что, как утверждает гидродинамическая теория теплообмена, увеличение коэффициента теплопередачи сопровождается пропорциональным увеличением гидравлического сопротивления на пути воздушного потока.

Одним из методов дальнейшего повышения эффективности теплообмена в рекуперативной насадке является применение технологии импактных струй (impinging jets technology). При струйном натекании воздуха на теплообменную поверхность интенсивность теплоотдачи увеличивается в 2–4 раза по сравнению с другими методами интенсификации теплообмена при одинаковых затратах энергии и равном подогреве воздуха [2].

Зависимость теплоотдачи труб от угла атаки φ показана на рис.1. В практических расчетах изменение теплоотдачи в зависимости от угла атаки может быть учтено введением поправочного коэффициента ϵ_{φ} . Он представляет собой отношение теплоотдачи α_{φ} при угле атаки φ к теплоотдаче при $\varphi = 90^\circ$ [2].

Конструкция этих перфорированных активных вставок в рекуператорах предполагает увеличение коэффициента теплоотдачи за счет варьирования угла атаки воздуха по отношению к поверхности теплообмена (целевой поверхности — target plate) вплоть до истечения нагреваемого воздуха перпендикулярно горячей стенке рекуператора.

Технология импактных струй является универсальной по отношению к тому, ведется нагрев либо охлаждение целевой поверхности.

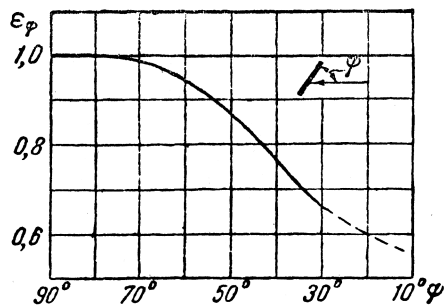


Рис.1. Зависимость теплоотдачи ϵ_{φ} цилиндра от угла атаки φ .

Эффективностью ее применения и простотой конструктивной реализации обусловлено использование технологии импактных струй в различных теплообменных системах. К ним, по иностранным источникам, также относят системы струйного охлаждения лопаток турбин и их камер сгорания, струйные теплообменники с оребрением и компактные высокоэффективные охладители (CHIC — compact high intensity coolers), которые применяются в авиации благодаря пониженному весу установки [3].

Эффективность применения струйной технологии, параметры управления процессом конвективного теплообмена в струйной насадке, а также методики расчета струйной насадки рекуперативных теплообменников рассмотрены в [4]. Для оценки работы системы импактных струй также возможно использование методик расчета газогорелочных устройств в части развития и смешивания струй [5]. Указанные методики позволяют определять конструктивные параметры активной насадки теплообменника и площадь сопел на основании определения коэффициента теплопередачи методом последовательных приближений (итераций). Однако струйная система при этом рассматривается как так называемый «черный ящик» относительно процессов, происходящих непосредственно в самой насадке. При этом не решается задача определения оптимальных параметров управления всей струйной системой, а именно: площадь сопел A_f , соотношение H/D , диаметр сопла d .

Таким образом, исследование процессов в струйной насадке рекуперативного теплообменника, в том числе с использованием методов моделирования процессов газовой динамики (CFD-моделирование), определение основных параметров управления эффективностью работы активной насадки в целом, оптимизация ее конструктивных размеров является актуальной научной задачей.

Рассмотрим некоторые аспекты технологии импактных струй. По конфигурации импактные струи можно разделить на ограниченные и неограниченные, плоские и осесимметричные, а по условиям истечения из сопел — на свободные и погруженные (рис.2) [3]. В зависимости от формы сопел импактные струи могут быть круглыми, щелевыми и эллиптическими (как разновидность щелевых).

Теплообмен при струйном натекании одиночной струи и системы струй на поверхность теплообмена (плоскую или выпуклую) исследовали отечественные и зарубежные ученые. Обобщающий анализ их работ приведен в [6, 7].

Были определены следующие параметры, влияющие на результирующее значение теплопередачи с применением импактных струй:

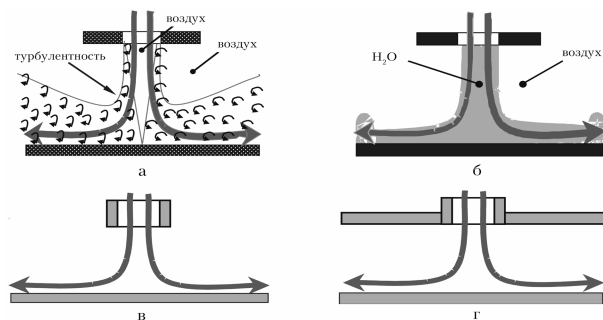


Рис.2. Классификация импактных струй по конфигурации и условиям истечения: а – погруженная; б – свободная; в – неограниченная; г – ограниченная.

форма сопла; направление и угол наклона струи; степень турбулизации потока (число Re); расстояние от сопла (jet plate) до целевой пластины (target plate); ее форма, а при использовании массива струй – и его конфигурация [4, 8–10].

Модель структуры потока импактной струи опирается на представления о турбулентном потоке в соответствии с гидродинамической теорией теплообмена. При этом в структуре импактной струи, натекающей на поверхность теплообмена, выделяют три характерные области: начальный участок ($L \sim 6d$); замороженного потока; пристенной струи [11–13]. Согласно иностранным источникам [3], это область свободной струи (free jet region), заторможенный участок (stagnation region) и пристенный участок струи (wall jet region) (рис.3).

Процесс натекания импактной струи на поверхность теплообмена можно описать следующим образом. Скорость импактной струи падает по мере приближения к преграде. Если эюра скоростей в струе достаточно пологая, то в центре струи формируется потенциальное ядро. Средняя скорость потока в нем сохраняется такой же, как и на выходе из сопла. Давление в струе достигает максимального значения в той точке, где скорость падает до нуля. Это явление наблюдается в области заторможенного потока (stagnation region), которая начинается на расстоянии 1,0–1,2 диаметра сопла от целевой поверхности [4]. В струе может возникнуть седловидный профиль пульсации в случае расположения преграды в диапазоне начального участка струи, когда безразмерный параметр, характеризующий соотношение размеров сопла и расстояния до целевой поверхности $L = H/D \leq 6$.

В работах [14, 15] была получена более точная структура потока и уточнена его модель. В окрестностях критической точки обнаружена зона, названная «циркуляционный рассекаатель». В ней образуются симметричные устойчивые циркуляционные вихри при соотношении расстояния от целевой поверхности до критической зоны струи к диаметру сопла равном 0,5–1,5. Толщина ламинарного слоя возрастает по мере растекания потока по целевой поверхности (wall jet region – пристенная зона). При отношении расстояния от целевой поверхности до критической зоны струи к диаметру сопла равном 2–3 и неравномерном поле скоростей возникающая центробежная сила порождает спиралевидные вихри – «вихревые жгуты», которые разрушают ламинарный слой на поверхности и интенсифицируют теплообмен. Интенсивность вихрей в пристенной области падает, у стенки образуется вторичный ламинарный слой [4].

В работах [12, 16–18] показана пропорциональная зависимость интенсивности теплоотдачи и градиента скорости, а также большее значение коэффициента теплоотдачи одиночной осесимметричной струи и системы струй при взаимодействии с целевой поверхностью, чем для плоской струи. Аналитические и числовые решения для одиночных осесимметричных и плоских струй представлены в [19].

В [20–22] рассмотрены варианты форм сопел, в том числе с так называемыми генераторами завихрений – специальными вставками в канал сопла, имеющими форму, подобную сверлам с различными углами поворота граней, и сравнивали их эффективность по среднему значению критерия Nu . При этом изучалось влияние завихрителей на интенсивность конвективного теплообмена между поверхностью тела и потоком газа – величину Nu в критической точке струи, а также при растекании струи по преграде. Конструкция завихрителей (swirl generator) с различными углами закручивания граней показана на рис.4.

Исследования истечения многоканальной струи (MCIJ – multi-channel impinging jet) с завихрителем в канале сопла, с углом закручи-

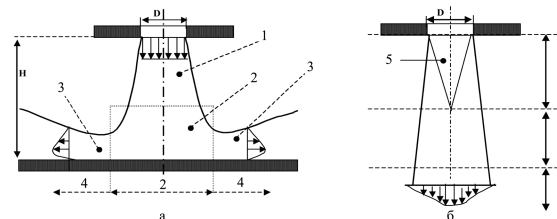


Рис.3. Зональная структура импактной струи ограниченной (а) и свободной (б): 1 – область свободной струи (free jet region); 2 – область замороженного потока (stagnation region); 3 – пограничный слой (boundary layer); 4 – пристенная область (wall jet region); 5 – потенциальное ядро (potential core); 6 – зона потенциального ядра (potential core zone); 7 – зона развития струи (developing zone); 8 – зона полного развития струи (fully developing zone).

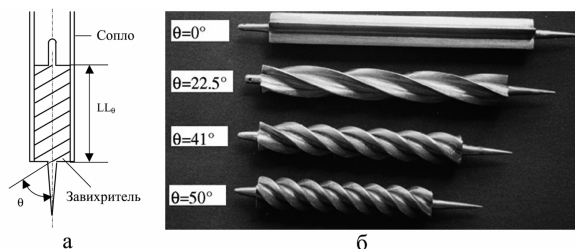


Рис.4. Схема вставки-завихрителя (а) и конструкции завихрителей с различными углами закручивания граней θ (б).

вания граней $\theta = 0^\circ$ [20] и расстоянием струя – поверхность большим начального участка струи ($H/D = 8$) показали незначительное преимущество перед соплом без завихрителя – обычным соплом (CIJ – conventional impinging jet), а также падение величины теплообмена и турбулизации при увеличении этого угла. Эллиптическая форма сопел [21] обеспечивала большую турбулизацию струи при контакте с преградой, нежели круглая, влияние завихрителя было незначительным при большом расстоянии струя – поверхность $H/D > 10$ [22], при $H/D = 2$ для любых углов граней завихрителя сопла с рассекателями обеспечивали большую турбулизацию, чем простые сопла.

Анализ результатов исследований теплообмена при взаимодействии одиночной струи с нормально расположенной поверхностью в работах [23–28] показывает неоднозначность при определении оптимума теплоотдачи при различных расстояниях струя – поверхность. Так, в [23] оптимальным признано значение $H/D = 8$ для плоской струи и $Re = 1800–1900$, в [24], где исследуются сопла круглой формы большого диаметра (8–30 мм), отмечено монотонное падение теплоотдачи при $H/D > 6,2$, в [27, 28] также установлено монотонное падение теплоотдачи с ростом H/D . Применение результатов исследования теплообменных процессов одиночной струи или их аппроксимация для системы струй затруднительно, вследствие взаимодействия струй между собой и с целевой поверхностью и вызванного этим изменения характера теплообмена.

При исследовании теплопередачи системой струй дополнительными факторами, влияющими на теплоотдачу, будут сносящий поток, кривизна целевой поверхности, а также открытая свободная площадь струй A_f .

$$A_f = \Sigma F_o / F_{\text{ТП}},$$

где ΣF_o – суммарная площадь сопел, мм^2 ; $F_{\text{ТП}}$ – площадь теплоотдающей поверхности со стороны продуктов сгорания, мм^2 .

В [29, 30] показано, что оптимальной является величина $A_f = 3–5\%$ для струйной системы без учета расхода энергии на перемещение воздуха, в [30] для минимальных расходов воздуха на обдув $A_f = 0,5\%$, а с увеличением A_f расход воздуха растет прямо пропорционально, средний коэффициент теплоотдачи увеличивается в меньшей степени. В [31] в качестве оптимальной величины площади струй приводится $A_f = 1,5\%$. В [4] приведены экспериментальные данные по оптимизации геометрических и режимных характеристик струйных рекуператоров, предназначенных для использования в промышленности со следующими характеристиками: размер сопла $d = 10$ мм; $4,5 \leq H/D \leq 5,0$.

В системе теплообмена струя – поверхность эффективность теплопередачи конвекцией будет оптимальной при протекании процесса с оптимальным расстоянием H от сопла (струи) до целевой поверхности. Величина этого расстояния определяется размерами потенциального ядра импактной струи [32]. Так, при небольших значениях H удар импактной струи о поверхность теплообмена будет приводить к падению скорости струи. При увеличении H турбулизация струи увеличивается за счет перемешивания, будет возрастать коэффициент теплоотдачи α , критерий Nu и, следовательно, эффективность теплообмена. При увеличении расстояния до целевой поверхности (поверхности теплообмена) H эффективность теплообмена падает за счет перемешивания струи с окружающей средой. Следовательно, варьирование расстоянием от среза струи до целевой поверхности необходимо вести в диапазоне расстояний существования потенциального ядра импактной струи. Однако значения величины ядра, полученные разными исследователями, различны.

Для исследования процессов, протекающих в системе струй, применяют различные методы. Визуализация процесса теплопередачи от импактных струй к целевой поверхности осуществляется методом жидких кристаллов для измерения температур поверхностей с использованием цифровых кадровых захватчиков (фото- и видеокамер) и фиксации температурных полей. Этот метод широко используется зарубежными исследователями [3, 33–35].

Результаты визуализации процесса теплообмена конвекцией между нагретым воздухом, пропускаемым через диффузор и пластину с круглыми соплами при $H/D = 1–8$, для разного количества сопел приведены в [3]. Распределение температур целевой поверхности показывает, что некоторое количество струй не добивают до целевой пластины из-за сносящего потока. Показано, что при $H/D = 4–8$ с увеличе-

нием количества сопел от 24 до 54, эффективность работы струй (число струй, добывающих до целевой поверхности) снизилась.

Результаты исследований сопел неосесимметричной формы (эллиптических, представленных пересекающимися круглыми отверстиями, расположенными под углом 0° и 90° к направлению движения воздуха) показывают их преимущество над соплами традиционной круглой формы. Эллиптические сопла при отношении большой полуоси эллипса к малой полуоси $AR \sim 0,5$ при наличии турбулентного потока ($Re = 3000$) обеспечивают лучшую теплоотдачу, а эллиптические сопла с $AR = 2$ эффективнее для меньших скоростей потока при $Re = 1500$. Также было показано увеличение до 13–20 % среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией для системы струй с эллиптическими соплами [35].

При оценке поля скоростей струй использовался метод измерения скорости цифровым отображением частиц (digital particle imaging velocimetry — DPIV). DPIV использует микроскопические частицы, обычно оливкового масла, которые являются достаточно легкими, чтобы резко перемещаться под действием малейших изменений в воздушных потоках. Частицы эти подсвечиваются пульсирующим лазером и фиксируются цифровой камерой с высокой частотой кадров. При этом отмечено значительное влияние параметра H/D на величину теплообмена для системы эллиптических сопел, по сравнению с системой традиционных круглых сопел при $Re > 5000$ [35].

Выводы

Экспериментальные данные по теплообмену конвекцией для одиночной струи с преградой плохо коррелируются с теплообменом системы струй из-за перемешивания и взаимодействия между ними. Показано, что для обеспечения эффективной работы активной струйной насадки скорость воздуха, величина параметра H/D и открытая свободная площадь струй A_f являются определяющими параметрами, а форма сопел и их взаимное расположение — второстепенными. Дополнительная интенсификация теплообмена ударной струи с целевой поверхностью может достигаться варьированием формы сопла (традиционная круглая, эллиптическая, щелевая, с завихрителем).

Установлено, что существует оптимальный диапазон величин расстояний струя — поверхность теплообмена. При этом удар струи о поверхность приходится на потенциальное ядро

(начальный участок) струи, следовательно, максимальное падение скорости струи достигается в критической точке и приводит к росту турбулизации потока и увеличению эффективности теплообмена конвекцией.

Выделяют три основных диапазона изменений безразмерного параметра H/D : менее 2–4; менее 4–8; более 8–10. Эти диапазоны характеризуются возможностью роста эффективности теплообмена в диапазоне $4 \leq H/D \leq 6$, при дальнейшем увеличении диаметра сопла $H/D \geq 6$ могут генерироваться дополнительные перемешивания струй и сносящего потока, снижая эффективность теплообмена.

Оптимальной величиной открытой свободной площади струй A_f для металлических рекуператоров можно считать диапазон 1,0–5,0 %. Использование щелевых отверстий-сопел может быть эффективно при $H/D > 6–9$, когда диаметр традиционных сопел будет столь мал, что эффективность теплообмена с их помощью будет значительно снижаться. Уменьшение диаметра сопел при увеличении их количества свыше некоторой величины ($H/D > 9–10$) будет снижать эффективность теплообмена конвекцией. Увеличение H свыше оптимальных значений приводит к падению эффективности теплоотдачи за счет перемешивания струи с окружающей средой.

Показано преимущество эллиптической формы сопел над соплами круглой формы, однако применение этой формы сопла в металлических рекуператорах с активными вставками является, очевидно, более технологически трудоемким. Эллиптические сопла ($AR = 2$) целесообразно применять для низких скоростей потока воздуха ($Re = 1500$), сопла с $AR = 0,5$ — для потока с $Re = 3000$.

Квадратные осесимметричные сопла не обеспечивают необходимой эффективности теплоотдачи за счет дополнительных затрат энергии на истечение струй, они также нетехнологичны и малоэффективны.

Показана возможность установки рассекающих (вихреобразователей) в канале сопла традиционной круглой формы с разными углами поворота граней насадки θ до 50° . Однако установка завихрителей в самих соплах насадки по экономическим и технологическим соображениям затруднительна.

Таким образом, определены основные параметры управления эффективностью работы системы струй в струйной насадке металлических рекуператоров: A_f , H/D , d , форма сопел в зависимости от параметра H/D и диапазоны

варьирования этих параметров для повышения энергоэффективности печных агрегатов.

Список литературы

1. Тебеньков В.Д. Рекуператоры для промышленных печей. — М. : Металлургия, 1975. — 294 с.
2. Михеев М.А. Основы теплопередачи. — М. : Госэнергоиздат, 1949. — 396 с.
3. Osama M. A. Al-aqal. Heat Transfer Distributions on the Walls of a Narrow Channel with Jet Impingement and Cross Flow. — Pittsburgh : University of Pittsburgh, 2003. — 117 p.
4. Создать и внедрить модульные воздухонагреватели для утилизации тепла отходящих дымовых газов технологических печей, обеспечивающие сокращение расхода газа на 20–30 процентов : (Закл. отчет) / АН УССР. Ин-т газа; Руводители темы А.Е.Еринов, Б.Д.Сезоненко. — № ГР 81091903; Инв. № РН 04.03.Ц02. — Киев, 1985. — 151 с.
5. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. — М. : Изд-во Недра, 1972. — 276 с.
6. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. — К. : Наук. думка, 1982. — 302 с.
7. Martin H. Heat and masse transfer between impinging gas jets and solid surface // *Advances Heat Transfer*. — 1977. — Vol. 13. — P. 1–60.
8. Chan T.L., Jambunathan K., Ashforth-Frost S. Jet impingement heat transfer. A bibliography: 1870–1977 // *Previews Heat Mass Transfer*. — 1999. — Vol. 25. — P. 464–473.
9. Polat S., Huang B., Mujumdar A.S., Douglas W.J.M. // *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer* / T.C.Chawla (Ed.). — 1989. — Vol. 2.
10. Jambunathan K., Lai E., Moss M.A., Button B.L. A review of heat transfer data for single circular jet impingement // *Intern. J. Heat Fluid Flow*. — 1992. — Vol. 13. — P. 106–115.
11. Абрамович Р.Н. Теория турбулентных струй. — М. : Физматгиз, 1960. — 224 с.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М. : Наука, 1974. — 712 с.
13. Жилкин Б.П., Сыромятников Н.И. О модели компактной газовой струи // *Докл. АН УССР*. — 1977. — Т. 234, № 4. — С. 784–786.
14. Жилкин Б.П., Сыромятников Н.И. Исследование влияния некоторых параметров на интенсивность струйного теплообмена // *Тр. Урал. политехн. ин-та*. — 1974. — № 227. — С. 197–199.
15. Жилкин Б.П., Сыромятников Н.И. Исследование гидродинамических условий струйного теплообмена // *Инж.-физ. журн.* — 1977. — Т. 33, № 2. — С. 210–213.
16. Смирнов А.А. Исследование конвективного теплообмена при взаимодействии струйных потоков воздуха с плоскими и цилиндрическими поверхностями : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Куйбышев, 1974. — 20 с.
17. Табаков, Клевенджер. Интенсификация теплоотдачи при ударном охлаждении газотурбинных лопаток воздушными струями различной конфигурации // *Энергет. машины и установки*. — 1972. — № 1. — С. 53–63.
18. Хуанг. Исследование коэффициентов теплоотдачи для потоков воздуха в круглых струях, ударяющих нормально в теплообменную поверхность // *Теплопередача*. — 1963. — № 3. — С. 59–69.
19. Donaldson C. du P., Snedeker K.S., Margolis D.P.A. Study of free jet impingement // *J. Fluid Mechanics*. — 1971. — Vol. 45, Pt 3. — P. 477–512.
20. Bakirci K., Bilen K. Visualization of heat transfer for impinging swirl flow // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* — 2007. — Vol. 32. — P. 182–191.
21. Lee S.J., Lee J.H., Lee D.H. Local heat transfer measurements from an elliptic jet impinging on a flat plate using liquid crystal // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. — 1994. — Vol. 37, № 6. — P. 967–976.
22. Lee D.H., Won S.Y., Kim Y.T., Chung Y.S. Turbulent heat transfer from a flat to a swirling round impinging jet // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. — 2002. — Vol. 45. — P. 223–227.
23. Андреев А.А., Дахно В.Н., Савин В.К., Юдаев В.Н. Исследование теплообмена в области градиентного течения при натекании плоской турбулентной струи на пластину, расположенную нормально к потоку // *Инж.-физ. журн.* — 1970. — Т. 18, № 4. — С. 631–637.
24. Брдлик П.М., Савин В.К. Теплообмен в окрестности критической точки при осесимметричном струйном обтекании плоских поверхностей, расположенных нормально к потоку. // *Там же*. — 1969. — Т. 10, № 4. — С. 423–428.
25. Гардон Р., Акфират Д. Характеристики теплопередачи при ударе двумерных воздушных струй // *Теплопередача*. — 1966. — № 1. — С. 110–118.
26. Спэрроу, Гольдштейн, Рауф. Влияние расстояния между соплом и поверхностью на теплоотдачу при падении на поверхность струи, взаимодействующей с поперечным потоком // *Там же*. — 1975. — № 4. — С. 34–41.
27. Юдаев Б.Н., Дахно В.Н., Андреев А.А. и др. Экспериментальное исследование теплообмена при натекании турбулентных струй на преграды // *Изв. вузов. Машиностроение*. — 1971. — № 11. — С. 81–96.
28. Vickers J.M.F. Heat transfer coefficient between fluid jets and normal surface // *Ind. Eng. Chem.* — 1959. — Vol. 51, № 8. — P. 967–972.
29. Керчер Д., Табаков В. Теплоотдача плоской поверхности, обдуваемой падающим перпендикулярно ей прямоугольным пучком круглых воздушных струй, с учетом влияния на теплоотдачу отработанного воздуха // *Энергет. машины и установки*. — 1970. — № 1. — С. 87–100.
30. Холдуорт, Берри. Теплообмен при натекании на поверхность системы струй с большим шагом

- отверстий // Теплопередача. — 1978. — № 2. — С. 203–209.
31. Голованов В.П. Теплообмен и гидродинамика системы импактных струй в сносящем потоке : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1981. — 25 с.
32. Gardon R., Acfirat I. The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1965. — Vol. 8, № 10. — P. 1261–1272.
33. Shou-Shing Hsieh, Huang-Hsiu Tsai, Shih-Chi Chan. Local heat transfer in rotating square-rib-roughened and smooth channels with jet impingement // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47, Is. 12–13. — P. 2769–2784.
34. Yan W.M., Mei S.C., Liu H.C. et al. Measurement of detailed heat transfer on a surface under arrays of impinging elliptic jets by a transient liquid crystal technique // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47, Is. 24. — P. 5235–5245.
35. Bertrand P.E. Dano, James A. Liburdy, Koonlaya Kanokjaruvijit. Flow characteristics and heat transfer performances of a semiconfined impinging array of jets: effect of nozzle geometry // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2005. — Vol. 48, Is. 3–4. — P. 691–701.

Поступила в редакцию 20.05.10

The Impinging Jets Technology in Recuperator Active Jet Inserts for Furnaces Units Energy Efficiency Increase (Review)

Agyeyev K.V.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The impinging jets technology aspects are discussed. The scientific urgency of the proceed processes in recuperator jet insert and their optimization is exhibited. The model of impinging jet flow structure is described. The process of impinging jet impact on heat exchange surface is considered. The impinging jets classification is adduced. Key parameters influencing on recuperator active jet nozzle operational efficiency are determined.

Key words: impinging jets technology, jet system parameters, recuperator active jet nozzle.

Received May 20, 2010