

U. Liush

Zaporozhye State Engineering Academy

ABOUT INFLUENCE OF STRUCTURAL FEATURES OF HEATER STOVE ON DISTRIBUTION OF TEMPERATURE INTO CHAMBER

The results of industrial experiment are In-process presented on determination of character of influence of structural parameters of stove on distribution of temperature on volume chambers. Dependences of her change are got in the zone of placing of the heated wares from the site of gas-ring devices and windows for taking of foods of combustion, and also from the change of gas expense on a stove.

Keywords: heater stove, energy efficiency, distribution of temperature, industrial experiment, thermal energy, metal heating.

1. Kachan, U.G., Optimization of heater gas-furnaces with a rolling out pallet on the criterion of energy efficiency/ V.V. Stepkin, U.B. Liush // Metallurgical and mining industry.-2013.-№3.-с.123-125.

2. U.B. Liush. Organization of industrial experiment on the study of influence of structural features of heater stove on distribution of thermal energy in the chamber// Announcer of the Khmelnytsk national university. - Khmelnytskyi. - 2015. - №2. - С.80-84

УДК 621.783.2-027.236

Ю.Б. Ліуш

Запорізька державна інженерна академія

ЩОДО ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ НА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ ВСЕРЕДЕНІ КАМЕРИ

У роботі представлені результати промислового експерименту з визначення характеру впливу конструктивних параметрів печі на розподіл температури за об'ємом камери. Отримано залежності її зміни в зоні розташування виробів, що нагріваються, від місцезнаходження пальникових пристроїв та вікон для відведення продуктів згорання, а також зміна витрат газу на піч.

Ключові слова: нагрівальна піч, енергоефективність, розподіл температури, промисловий експеримент, тепла енергія, нагрів металу.

Надійшла 15.05.2015

Received 15.05.2015

УДК 666.1.031.2/.6:66.042.882.2

А.Е. Денисова д-р техн. наук, професор, К.В. Агеев
Одесский национальный политехнический университет

СТРУЙНО-ВИХРЕВЫЕ РЕКУПЕРАТОРЫ КАК АППАРАТЫ С АКТИВНЫМИ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ

Исследование работы струйно-вихревых теплообменников и разработка математического описания процессов на воздушной стороне этих рекуператоров является актуальной научной задачей, поскольку не существует единого теоретического представления о вихревых процессах в циклонных аппаратах, где наблюдаются вихри сложной пространственной формы и направления. Актуальной проблемой является изучение параметров существования возмущений винтовой либо спиральной формы, так называемых процессов с прецессирующим вихревым ядром (вихрем винтовой формы) в струйно-вихревых рекуператорах. Для этого предложен аэродинамический стенд для физического и имитационного моделирования протекающих в рекуператоре процессов и задания на их основе граничных условий для численного CFD-моделирования.

Ключевые слова: струйно-вихревой рекуператор, физическая модель, теплотехнические аппараты с активными гидрогазодинамическими режимами.

© Денисова А.Е., Агеев К.В., 2015

Введение

В настоящее время энерготехнологические агрегаты, работа которых основана на применении закрученных высокотурбулентных потоков теплоносителей и вихревого эффекта Ранка, такие как циклонные и вихревые устройства, благодаря высокой энергоэффективности, определенной простоте конструкции, надежности и компактным габаритным размерам широко используются в различных отраслях промышленности. Одновременно для таких устройств достижимы высокие удельные эксплуатационные характеристики.

Несмотря на большое разнообразие типов и конструкций циклонно-вихревых аппаратов обычные циклонные камеры круглого поперечного сечения нашли наибольшее применение в промышленности в качестве нагревательных и теплообменных устройств.

Значительные успехи достигнуты в области исследования циклонно-вихревых потоков и вихревых камер различного технологического назначения. К устройствам данного семейства относят аппараты вихревых конструкций, позволяющие обеспечить значительную интенсификацию конвективного и лучистого теплообмена, повысить скорость, полноту и экономичность процессов тепловой обработки деталей и глубину утилизации тепла продуктов сгорания печных агрегатов промышленности, а также эффективность и экономичность нагрева с одновременным решением вопросов охраны окружающей среды и энергоменеджмента в масштабах предприятий, снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

1. Постановка задачи

Согласно существующим представлениям, весь рабочий объем циклонной камеры по характеру изменения компонент скорости условно можно разделить на три основные области: ядро потока, приторцевые зоны течения и периферийную пристенную зону [1]. В процессе работы циклонно-вихревой камеры в ее рабочем объеме наблюдаются вихри сложной пространственной формы и направления. Такое распределение с формированием сложного поля осевых скоростей определяется геометрией камеры, трением потока о стенки, а также возникающим в некоторых случаях разрежением в приосевой зоне. Кроме того, сложность картины наблюдаемого процесса дополняется взаимодействием возникшего течения с ядром потока [2].

Создание теории вихревых процессов и соответствующего математического аппарата как области исследований и по сегодняшний день остается наиболее мало изученной. Можно говорить о создании нескольких частных теорий в области аэродинамики потока. Однако все они описывают протекающие в вихревых аппаратах процессы в привязке к конкретным конструкциям либо к определенному классу аппаратов [3].

Обеспечение вихревого характера процессов, протекающих в этих аппаратах, связано со значительными затратами энергии. Например, согласно данным [4], гидравлическое сопротивление закрученного потока может до 5-ти раз превышать его значение для течений без крутки.

Поэтому исследование работы струйно-вихревых теплообменников, разработка математического описания рабочих процессов на воздушной стороне рекуператоров, выполненных на основе струйно-вихревой технологии как аппаратов с активными гидрогазодинамическими режимами, является актуальной научной задачей.

2. Теоретические основы вихревого эффекта

Теория вихрей как совокупность работ, призванных теоретически обобщить наблюдаемые в природе и технике процессы формирования вихревых спиральных структур и течений, например, смерчей и торнадо, которые имеют ярко выраженную винтовую форму, оперирует математическим аппаратом, который сложно применять для решения научно-практических задач, а также специфическим языком, не свойственным теплотехнической науке [5].

Математические исследования в теории вихрей оперируют таким основным понятием гидродинамики (научной абстракцией), как точечный вихрь (вихревая нить), который является простой моделью реальных вихрей, на основе которой возможно построение математических моделей более сложных вихревых течений — модели потоков с вихревой симметрией. При рассмотрении модели движения системы вихрей внутри вращающегося цилиндра из теории вихрей [6] следует важный вывод о высокой неустойчивости таких вихревых спиральных образований и систем вихрей ($N > 3$).

Принимая во внимание вывод о неустойчивости вихревых спиральных структур и значительное число работ, посвященных теории вихрей, практический интерес может представлять теория концентрированных вихрей, которая основана на обобщении и систематизации опытных данных. Согласно этой теории, наиболее характерными являются возмущения винтовой либо спиральной формы, широко распространенные в природе и технике, а изучению процессов с прецессирующим вихревым ядром (вихрем винтовой формы) [3] в настоящее время исследователи уделяют большое внимание.

В качестве закручивающих устройств для придания потоку вращательного движения и частичной крутки применяют три группы завихрителей [7]: тангенциальные, которые сообщают закручиваемому потоку вращательное движение за счет тангенциального или улиточного подвода потока (рис. 1 а, б),

аксиальные, придающие потоку одновременно вращательное и осевое движения и протяженные завихрители, обеспечивающие закрутку потока по всей длине канала вихревого устройства [7].

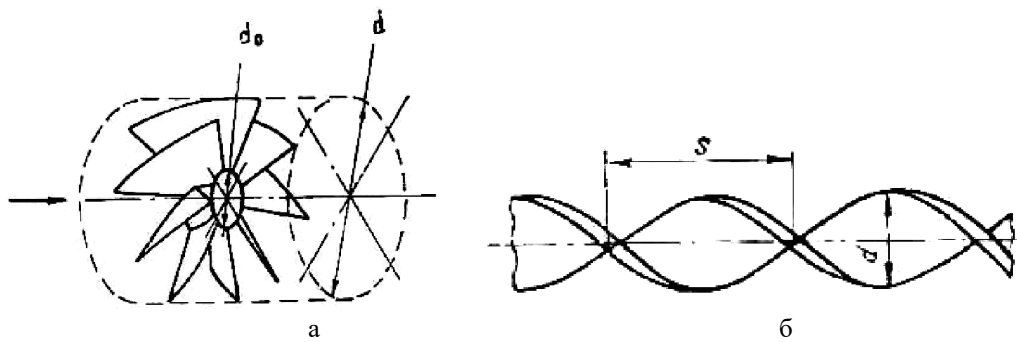


Рис. 1. Применяемые в циклонных аппаратах типы завихрителей [7]:
а — аксиально-лопаточный; б — ленточный.

В работе [8] на основе данных работ [9–12] составлена номограмма (карта) режимов распада вихря в координатах: параметр Re и отношение высоты (длины) вихревой трубы к ее радиусу R . Обобщение результатов исследований параметров распада вихревой структуры было проведено для вертикальной вихревой камеры, где спиральные вихревые структуры формируются вращающимся дном как генератором завихрений (рис. 2).

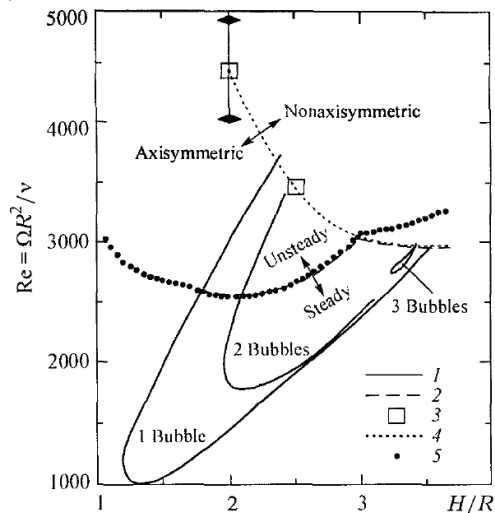


Рис. 2. Карта режимов распада вихря для экспериментов в сосуде с вращающейся крышкой [9–12].

Анализ номограммы показывает, что для вихревой трубы, высота H которой равна не более, чем нескольким радиусам R , обеспечивается соотношение $H/R \leq 3-4$ при величине $Re \leq 3000$, характерной для переходного режима и зарождения флуктуаций при формировании турбулентного течения. Распад вихревой структуры происходит согласно пузырьковой модели, а при турбулентном режиме $Re \geq 3000$ наблюдаются осесимметричный ($H/R \leq 2-3$) и неосесимметричный распад вихря ($H/R \geq 4$).

Величина параметра $Re \approx 3000$ соответствует не только переходному режиму ламинарного течения, в котором флуктуации формируются в недостаточном количестве для турбулизации всего потока — переходе в турбулентный режим, но и является границей перехода вихревой структуры в неустойчивый режим. На основе анализа номограммы можно говорить также и о том, что с увеличением длины вихревой трубы при увеличении параметра Re более характерным будет распад вихревой структуры по неосесимметричной модели. Это соответствует представлениям о стабильности вихревой спиральной структуры в границах длины вихревой трубы, равной нескольким калибрам, и в этом случае возможно применение модельных упрощений вихря, как пространственной спирали. Также очевидна нестабильность вихря и его распад на больших длинах вихревых труб при $H/R \geq 4$.

Номограмма косвенным образом подтверждает тезис о том, что все реальные течения в технике фактически являются турбулентными, а сами турбулентные течения, как совокупность хаотичных флуктуаций, завихрений и диссипаций потока в некоторой области могут представлять собой последствия распада вихревой структуры по неосесимметричной модели при $Re > 3000$ и $H/R > 3-4$.

3. Аэродинамический расчет циклонных устройств

Существующие на сегодняшний день методики расчетов циклонных устройств на основе аэродинамических представлений о вихревом потоке в основном являются полуэмпирическими, полученными за счет обобщения экспериментальных данных, которые позволяют аппроксимировать величину теплоотдачи к стенкам вихревой камеры следующей обобщенной зависимостью $Nu = A \cdot Re^B$ (где A , B — полуэмпирические коэффициенты), а для определенных случаев в аппроксимационное уравнение добавляется множитель Pr^C , где C — некоторая константа, зависящая от условий работы вихревого устройства и его геометрии. Рассмотренные методы расчета получили наибольшее распространение в связи с использованием уравнений движения турбулентного потока [2].

В ряде работ, например, в [13] использованы интегральные соотношения для пограничного слоя в совокупности с эмпирическими законами задания профиля скорости или нарастания толщины струи. Указанный метод применялся для решения динамической задачи в пристенных зонах у торцевой или боковой поверхностей. В [14] предложена схема расчета циклонного вихревого течения, как полый вращающейся турбулентной струи, обращенной пограничным слоем к оси камеры.

Первые методики аэродинамического расчета циклонных устройств основывались на применении уравнений движения идеальной жидкости [15]. В некоторых из этих методик использовались экспериментально установленные коэффициенты потерь напора, в других применяли физические представления о движении жидкости в центробежной форсунке [2] или использовали принцип максимального расхода при сохранении вдоль радиуса камеры момента количества движения из уравнения Бернулли [16]. В некоторых работах, например, в [17] отмечена бесперспективность совершенствования физической модели потока в гидравлической постановке задачи из-за грубой схематизации потока.

Прогноз эффективности поперечного оребрения (распорок-завихрителей) струйно-вихревого теплообменника конструкции [18] возможен на основе расчетного графика интенсивности частичной закрутки потока $\Phi_{вх}$ лопастями аксиального завихрителя (рис. 3) [7].

Анализ представленного графика показывает, что в зависимости от соотношения диаметров ступицы и лопастей аксиального завихрителя (рис 3, а), угол наклона лопаток φ , обеспечивающий максимальную эффективность крутки, находится в диапазоне $45-60^\circ$. Иначе говоря, с увеличением диаметра лопаток и при уменьшении диаметра ступицы аксиального завихрителя максимальное значение крутки возрастает по абсолютной величине в пределах $0,2-0,8$ ($20-80\%$ соответственно). С достижением этих показателей при смещении максимального угла в сторону больших величин эффективность крутки определяется только величиной угла закрутки лопаток аксиального завихрителя φ .

Такой вывод хорошо коррелируется с распределением эффективности теплообмена при варьировании углов натекания на цилиндрическую поверхность, в частности, на наружную стенку трубчатых рекуперативных теплообменников.

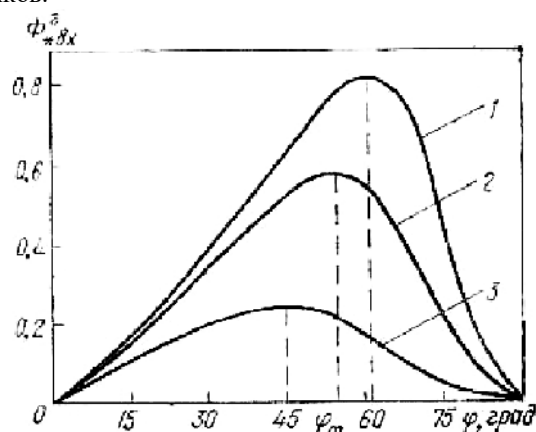


Рис. 3. Интенсивность частичной закрутки потока $\Phi_{вх}$ лопастями аксиального завихрителя с углом закрутки φ , радиусом лопастей r_1 , радиусом ступицы с прямыми лопатками r_0 : 1 — $r_0 = 0,5$; $r_1 = 0,9$; 2 — $r_0 = 0,65$; $r_1 = 0,9$; 3 — $r_0 = 0,5$; $r_1 = 0,8$ [7].

4. Методика исследования

Исследование работы струйно-вихревого рекуператора с активными гидрогазодинамическими режимами проводилось на физической модели (холодном стенде) с последующим CFD-моделированием процессов теплообмена на воздушной стороне рекуператора в научно-практическом комплексе SolidWorks Flow Simulation [19]. Физическая модель (ФМ) была выполнена в компоновке, согласно конструкции рекуператора [18], из оргстекла (Plexiglass®), распорки-завихрители в количестве 1–4

штуки, расположенные равномерно вдоль внутренней воздушной перфорированной по спирали трубы, выполнялись из ABS-пластика методом стереолитографического прототипирования — 3D-печати с допусками до 0,1 мм при минимальной шероховатости.

Численное исследование и CFD-моделирование для всех конструкций физической модели было проведено в SolidWorks с установкой максимальной точности моделирования, что соответствует программному ограничению в 8 циклов по ~239 итерациям уравнения Навье-Стокса. Основным допущением при создании численной модели работы струйно-вихревого рекуператора конструкции [18] было предположение о том, что характер линий тока и углы истечения импактных струй будут сохраняться при различных температурах нагрева наружной нагреваемой трубы.

На основе этого предположения были выбраны параметры численного исследования. CFD-моделирование проводили с количеством ячеек охлаждающего воздуха (Fluid cells) от 260000 до 100000 штук, неполных ячеек вследствие «сгущения» (Partial cells) — более 150000 штук, объемы численных CFD-исследований были ограничены числом итераций 300–400 после проведения моделирования для конструкции с одной распоркой-завихрителем на конце внутренней воздушной перфорированной по спирали трубы с числом итераций 1500–1700 (~7,9 цикла) длительностью 32–35 ч машинного времени. Измерение температуры нагретого воздуха на выходе из струйно-вихревой системы проводилось цифровым дифференциальным манометром-термоанемометром DT-8920 с трубкой Пито-Прандтля с величиной погрешности измерения температуры ± 1 °C.

Температура нагрева наружной нагреваемой трубы варьировалась в диапазоне 100–400 °C с шагом 100 °C. На ФМ также проводилась визуализация протекающих в системе процессов введением в рабочее пространство ФМ белого дыма из раствора на основе глицерина, производимого специализированной дымовой машиной Chauvet Shurrricane 700 (производство США), применяемой в киноиндустрии для создания эффектов. Имитационное моделирование процессов в ФМ проводили для различных вариантов ее конструктивного исполнения по числу перфорированных сопел и распорок-завихрителей.

5. Обсуждение результатов CFD-моделирования

При сравнении характера изменения скорости, температуры воздуха и параметра P_r был сделан вывод о том, что характер истечения импактных струй (impinging jets) и траекторий турбулизированного вихря этих струй в форме пространственной спирали одинаковы для расчетов 300 и 1500 итераций. Разница температур воздуха на выходе струйно-вихревого рекуператора для этих расчетов находится в районе погрешности применяемого для измерения граничных условий CDF-модели цифрового дифманометра DT-8920. Поэтому дальнейшие эксперименты по численному исследованию струйно-вихревых рекуператоров проводили до достижения 300–400 итераций.

Формирование зоны локального разогрева воздуха 1 в зазоре между наружной нагреваемой трубой и внутренней воздушной перфорированной трубой на «начальном» участке модели рекуператора связано с формированием обратных вихрей, а формирование вихревого потока с пространственной спиральной структурой не наблюдается. Напротив, формируются локальные зоны перегретого воздуха, которые со временем соединяются в протяженный фронт 2 с полем температур 530–690 К.

При анализе характера распределения температур воздуха на продольном разрезе рекуператора (рис. 4.) видно, что поток в рабочем пространстве все-таки представляет собой спиральную вихревую структуру, синусоиду с большим периодом и «размазанными» максимумами, которые представляют собой локальные зоны 3 с высокими температурами разогрева воздуха (до 690 К). Эти «максимумы» расположены зеркально относительно струй, участвующих в их формировании. Импактные струи 4 из этих сопел попадают в продольный вертикальный разрез CFD-модели и отчетливо видны благодаря своей низкой температуре относительно общего нагретого потока.

Можно сказать, что все типы конструктивного исполнения исследуемого струйно-вихревого рекуператора при моделировании проявляют отмеченные свойства такого спирального вихревого потока перегретого воздуха.

Анализируя температуры и траектории нагретого воздуха для различных конструктивных исполнений струйно-вихревого рекуператора, можно отметить, что при минимальном количестве распорок-завихрителей (1 шт.) на начальном участке (на входе рекуператора в торцевой части) за счет формирования обратных вихревых турбулизированных течений появляется зона локального разогрева воздуха до температур ~ 500–600 К при температуре наружной стенки рекуператора 673 К (рис. 4, а). Данная зона повышенного разогрева присутствует во всех типах конструктивного исполнения ФМ и минимально занимает около 1/3 длины теплообменника.

Также можно наблюдать формирование закрученного спирального потока перегретого воздуха, имеющего в разрезе симметрию, близкую по форме к синусоиде, относительно оси рекуператора с «размазанными» максимумами и одновременным появлением локальных зон нагрева в них. При этом спиральная структура (синусоида траекторий линий тока) выглядит «рваной», а не целостной пространственной спиралью, имеющей промежутки. Близкая к правильной синусоидальная симметрия

траекторий движения нагретого воздуха формируется с повышением числа распорок-завихрителей. На рис. 4, б четко видны чередующиеся «максимумы» с зонами разогрева и «минимумы» с температурами нагрева воздуха до 300–400 К.

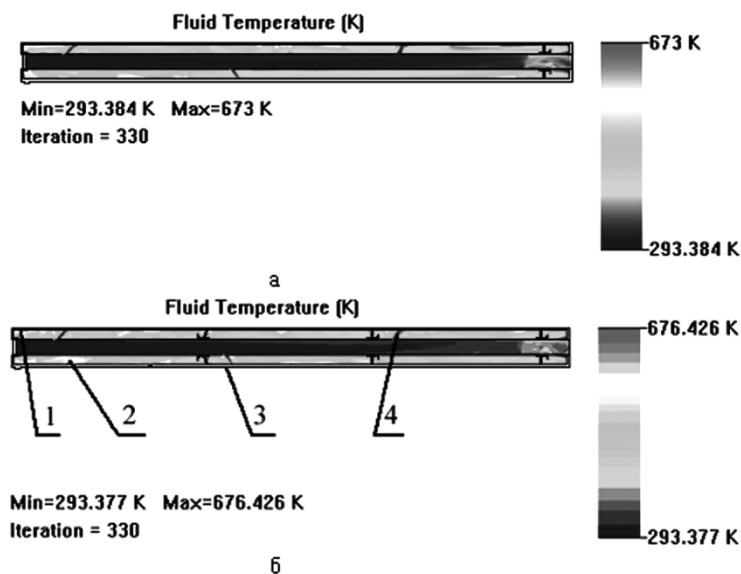


Рис. 4. Структура вихревых турбулизированных потоков в рабочем объеме CFD-модели струйно-вихревого рекуператора $H/D \leq 3$ при температуре нагрева наружной стенки 673 К (400 °С).

При увеличении числа распорок-завихрителей наблюдаемая цикличность линий тока (синусоида), в объеме представляющая собой пространственную спиральную вихревую структуру, распадается на локальные зоны разогрева, сконцентрированные непосредственно за распорками-завихрителями. Если объединить эти локальные зоны разогрева, то можно увидеть, что частота экстремумов синусоиды повысилась при увеличении числа распорок-завихрителей.

При анализе совокупности расчетных кривых (рис. 5) процесс можно видеть как фрактал двух взаимосвязанных и влияющих друг на друга систем: системы импактных струй и сформированной из них системы спиральных пространственных вихревых структур. Так, на графике радиальных скоростей можно видеть максимумы (острые пики) скорости, соответствующие моменту истечения импактной струи из сопла, и в точке экстремума — удару о нагретую поверхность. Одновременно на некоторых графиках пики имеют срезанные максимумы, при этом срезы соответствуют моменту прохождения импактной струи вдоль нагретой стенки CFD-модели. Другие кривые имеют достаточно плавный (параболический) выход на максимум скорости (удар о нагретую стенку) и большую площадь под кривой по сравнению с графиками, имеющими острые, слегка срезанные пики экстремумов.

Параболические кривые начинают появляться при длинах струй в диапазоне 0,6–0,8 м, а при длинах струй ~0,8–1,2 м наблюдается уплотнение кривых с максимумами. Кривые расположены настолько сконцентрировано, что трудно различать их принадлежность к конкретным номерам струй: возникает как бы резонанс пиков радиальной скорости. Причем, если максимумы радиальных скоростей при длинах струй до 0,6 м находятся в диапазоне ≤ 20 м/с, то для длин струй в диапазоне 0,8–1,2 м наблюдаются пиковые радиальные скорости до 30 м/с.

Графики радиальных скоростей для разных струй обладают очевидным подобием. Появление более пологих параболических кривых максимальных радиальных скоростей можно пояснить следующим образом. При аэродинамическом расчете диаметр сопла зависел от требуемого объемного расхода на входе в перфорированную воздушную трубу. Однако, аэродинамика истечения струй из отверстий в цилиндрической стенке имеет существенные отличия от истечения струй при обдувании перфорированной пластины.

При формировании струй из отверстий в цилиндрической стенке на воздух действуют одновременно динамический напор (характеризующий скорость потока) и статический напор как характеристика геометрии трубного канала. По длине трубы скорость и динамический напор падают (падает скорость потока), а статический напор по длине трубы растет. Это приводит к тому, что первые струи истекают под острыми углами, а струи в конце цилиндрической трубы истекают под углами, близкими к прямым.

Появление на графике радиальных скоростей нескольких острых пиков скоростей с может свидетельствовать о том, что импактные струи при соблюдении параметра $H/D \leq 3$ будут полноценно

работать и обеспечивать конвективный теплообмен при ударе о нагретую поверхность, несмотря на сносящих вихревой поток. Импульсные струи будут совместно с вихревым сносящим потоком за счет эффекта синергии участвовать в повышении степени крутки потока и эффективности теплоотдачи в рабочем пространстве рекуператора.

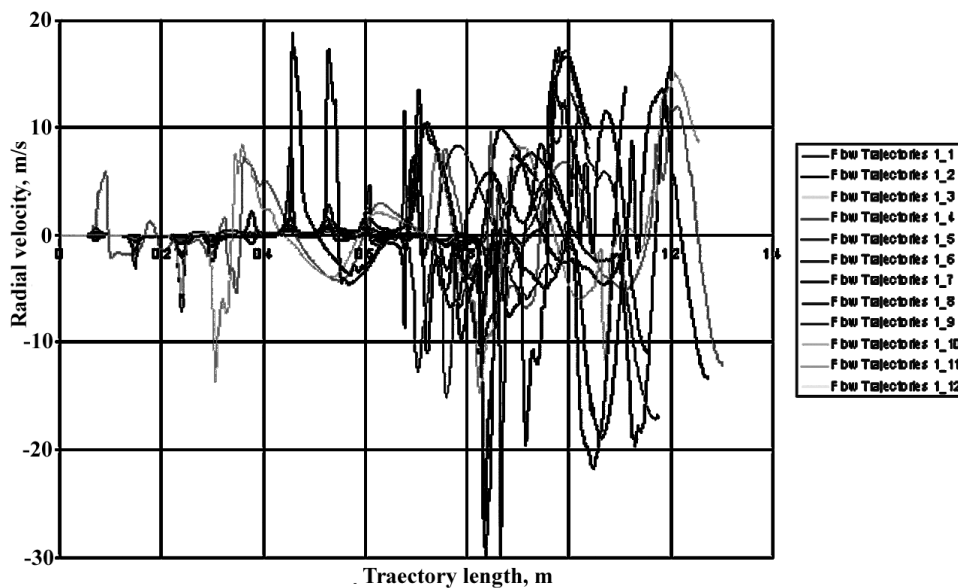


Рис. 5 Совокупности расчетных кривых зависимости радиальной скорости (radial velocity) от длины струи (trajectory length)

Кроме того, в диапазоне длин струй 1,0–1,2 м на графике радиальной скорости можно наблюдать широкие параболические пики, что может быть характеристикой малого участия последних по длине рекуператора струй в разогреве воздуха, несмотря на истечение их под углами, близкими к 90°.

Наличие пульсаций параметра P_r показывает, что струйно-вихревая система по характеру происходящих в ней процессов не подпадает под понятие вихревых труб и циклонных аппаратов, пульсации энергии можно наблюдать не только в пристенной области, но и в ядре — на стенках воздушной перфорированной трубы. При этом нельзя наблюдать однородный градиент температур между ядром вихревого движения и пристенным вихрем как в аппаратах на основе вихревого эффекта Ранка. Пульсации или говоря иначе волны можно наблюдать и в ядре и в пристенной области рекуператора.

Для анализа процессов, протекающих на воздушной стороне струйно-вихревого теплообменника при варьировании температуры нагрева наружной стенки рекуператора, и числа распорок-завихрителей, по данным CFD-моделей теплообменников были получены расчетные параметры нагретого воздуха на выходе из рекуператора (рис. 6).

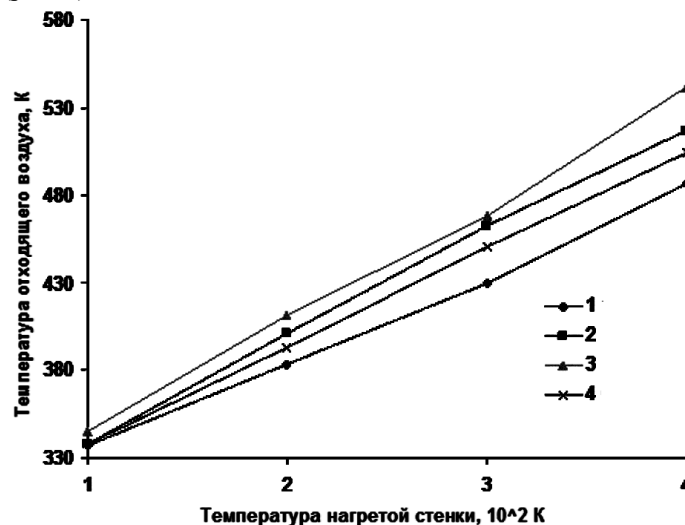


Рис. 6. Зависимость температуры отходящего воздуха от температуры нагретой стенки рекуператора и числа распорок-завихрителей: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4.

Анализ поведения функции скорости потока воздуха на выходе рекуператора (рис. 6) показывает, что после достижения нагретой стенкой теплообменника температуры 200 °С (473 К) можно наблюдать повышение крутизны графика скорости для конструкции ФМ с 4-мя и 1-й распорками-завихрителями, максимальная скорость на выходе рекуператора прямо пропорционально связана с температурой нагрева наружной стенки рекуператора — при повышении этой температуры в диапазоне 200–400 °С (473–673 К) скорость отходящего воздуха достигает ~ 25–30 м/с и будет максимальной для рекуператора с 4 распорками-завихрителями. При этом зависимость скорости от числа распорок-завихрителей не составляет прямую пропорцию. Скорость на выходе системы из 2-х распорок-завихрителей будет выше, чем для рекуператора с тремя распорками-завихрителями.

Поскольку энергия потока не только повышается за счет конвективного разогрева воздуха, но и расходуется на преодоление местных аэродинамических сопротивлений (оребрений и шероховатости стенок) распределение кривых связано с тем, что потери скорости на преодоление сопротивлений для системы из 2 распорок-завихрителей будут меньше потерь для системы из 3-х сопел, при этом разогрев потока для 4-х распорок-завихрителей будет достаточным для компенсации потери скорости на местных сопротивлениях. Для системы из 3-х распорок-завихрителей разогрев спиральной вихревой структуры в рабочем пространстве CFD-модели не обеспечивает повышение скорости потока, аналогичное системе из 4-х сопел.

Мощность рекуператора, как интегральная характеристика тепловых процессов в его рабочем пространстве, повышается с повышением числа распорок-завихрителей и температуры нагрева наружной стенки.

Анализ кривых рис. 6. показывает, что максимальная температура отходящего воздуха наблюдается для исполнения ФМ с двумя и тремя распорками-завихрителями. При температуре стенки рекуператора 573 К кривые 2 и 3 расходятся, разность температур нагрева для них составляет ~ 40 °С. Наблюдаемую зависимость можно пояснить, исходя из модельного представления формирования спиральной пространственной вихревой структуры в струйно-вихревом рекуператоре, как результирующую наложения колебаний натянутой струны.

При этом в случае совпадения периодов и фаз вихря, формируемого импактными струями из перфорированных сопел воздушной трубы, и вихрем, создаваемым принудительной закруткой первого вихря поперечными завихрителями, спиральная структура вихря проявляется более отчетливо, пики амплитуды не будут «размазанными», спиральная пространственная структура будет поддерживаться за счет закрутки потока распорками-завихрителями неподвижного оребрения. Таким образом, при размещении распорок-завихрителей в местах, обеспечивающих осцилляцию двух вихрей, либо в местах, близких к оптимальному, для достижения этой цели в рекуператоре можно будет достигнуть более высоких показателей утилизации тепла дымовых газов печи.

Выводы

Высокая эффективность работы струйно-вихревого теплообменника с активными гидродинамическими режимами может быть достигнута за счет эффекта синергии между эффектами от различных конструктивных решений. Анализ результатов численного исследования рекуператора предлагаемой конструкции показывают существенное влияние «волновой» составляющей, которая возникает в результате взаимодействия и наложения явлений, вызванных высокой внутренней неустойчивостью вихревого движения и способностью вихрей генерировать возмущения из-за особенностей спиральной пространственной структуры.

Если представить вместо вихря колеблющуюся натянутую струну, то создаваемые ее колебаниями волны будут иметь определенные показатели амплитуды, периода и частоты колебаний, иными словами, струна будет пульсировать. При наличии нескольких струн, генерируемые ими волны будут либо осциллировать, усиливать колебания друг друга, либо подавлять, если периоды колебаний совпадают либо находятся в противофазе соответственно.

Резкие локальные скачки P_r можно пояснить наличием пульсационных флуктуаций, волн, формируемых одновременно импактными струями в пристенной области и статичными распорками-завихрителями. Вихревые пульсации параметра P_r на поверхности внутренней воздушной перфорированной трубы могут быть объяснены на основе модели формирования концентрированных вихрей за истекающей в сносящий поток струей [8].

На преодоление оребрения расходуется значительное количество энергии (скорости) потока. Можно предположить, что наложение пульсаций энергии (скорости) нескольких сформированных в рабочем пространстве струйно-вихревого рекуператора вихревых спиральных структур и является причиной того, что протяженные области разогрева при увеличении числа распорок-завихрителей дробятся на локализованные за распорками-завихрителями оребрения разогретые турбулизированные флуктуации, что характерно для отрыва турбулизированного течения при обтекании т.н. плохо обтекаемого тела, которое можно наблюдать в авиации при обтекании крыла самолета.

Список литературы

1. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом [Текст] / Э.Н.Сабуров. — Архангельск : Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. — 341 с.
2. Кортюева И.А. Аэродинамика и конвективный теплообмен в эллиптических циклонных нагревательных устройствах. Дисс.... канд. техн. наук. — Архангельск, 2003.
3. Ляндзберг А.Р. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке [Текст] / А.Р.Ляндзберг, А.С. Латкин. — Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2004. — 149 с.
4. Высочин В.А, Сафонов В.А. Экспериментальное исследование рабочего процесса вихревой трубы // ИФЖ. — 1983. — Т. 44, № 12. — С. 235–242.
5. Козлов В.В. Общая теория вихрей [Текст] / В.В. Козлов. — Ижевск : Изд. дом «Удмуртский университет», 1998. — 238 с.
6. Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей / Под ред. А.В. Борисова и др. — Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. — 704 с.
7. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А.А.Халатов. — Киев : Наук. думка, 1989. — 192 с.
8. Алексеенко С.В. Введение в теорию концентрированных вихрей [Текст] / Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. — Новосибирск : Институт теплофизики СО РАН, 2003. — 504 с.
9. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by rotating endwall // Exp. in Fluids. — 1984. — Vol. 2, № 4. — P. 189–196.
10. Sorensen J.N. Visualization of rotating fluid flow in a closed cylinder // Rep. AFM 92–06. Department of Fluid Mesh. Technical Univ. of Denmark, 1992.
11. Stevens J.L., Lopez J.M, Cantwell B.J. Oscillatory flow states in an enclosed cylinder with a rotating endwall // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 389. — P. 101–118.
12. Gelfgat A.Y., Bar-Yoseph P.Z., Solan A. Stability of confined swirling flow with and without vortex breakdown // J. Fluid Mech. — 1996a. — Vol. 311. — P. 1–36.
13. Смолина Н.В. Повышение эффективности использования топлива и снижение выбросов вредных веществ в циклонных нагревательных устройствах с двухсторонним выводом газов оптимизацией их геометрических параметров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Архангельск. — 1995. — 150 с.
14. Вулис Л.А., Устименко Б.П. Об аэродинамике циклонной топочной камеры // Теплоэнергетика. — 1954. — № 9. — С. 3–9.
15. Чинь Ко-фа. Экспериментально-теоретическое исследование турбулентной структуры потока в циклонной камере: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1962. — 21 с.
16. Калишевекий Л.Л., Кацнельсон Б.Д. и др. Циклонные топки / Под общ. ред. Г.Ф.Кнорре и М.Л.Наджарова. — М.-Л. : Госэнергоиздат, 1958. — 216 с.
17. Хавкин Ю.И. Центробежные форсунки. — Л. : Машиностроение, 1976. — 168 с.
18. Пат. 104396 Укр., МПК⁹ F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Рекуператор / К.В. Агеев. — Опубл. 27.01.14, Бюл. № 2.
19. Агеев К.В., Денисова А.Е. Струйно-вихревые рекуператоры для энергосберегающих технологий// Холодильна техніка та технологія. Енергетика та енергозбереження. — 2015. — № 51(4). — С. 76–82.

А.С. Денисова д-р техн. наук, профессор; К.В. Агеев

Одеський національний політехнічний університет

**СТРУМИННО-ВИХРОВІ РЕКУПЕРАТОРИ ЯК АПАРАТИ З АКТИВНИМИ
ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ**

Дослідження роботи струминно-вихрових теплообмінників і розробка математичного опису процесів на повітряній стороні цих рекуператорів є актуальним науковим завданням, оскільки не існує єдиного теоретичного уявлення про вихрові процеси в циклонних апаратах де спостерігаються вихри складної просторової форми і напрямку. Актуальною проблемою є вивчення параметрів існування збурень гвинтової або спіральної форми, так званих процесів з вихровим ядром (вихром гвинтової форми), в струминно-вихрових рекуператорах. Для цього запропонований аеродинамічний стенд для фізичного і імітаційного моделювання процесів у рекуператорі та завдання на їх основі граничних умов для чисельного CFD-моделювання.

Ключові слова: струминно-вихровий рекуператор, фізична модель, теплотехнічні апарати з активними гідро газодинамічними режимами.

A.E. Denysova, K.V. Ageyev
Odessa National Polytechnic University

JET-VORTEX RECUPERATORS AS THE APPARATUS WITH HYDRO-ACTIVE MODES

The investigation of jet-vortex heat exchangers operation and mathematical formulation of processes on the recuperators air side is relevant science problem because there is no the single theoretical presentation of vortex processes in cyclone apparatus where complicated tridimensional shape and direction vortices are observed. The problem of current importance is research of existence parameters of disturbances of swirl spiral shape and directions. The disturbances so called processes with precessing nucleus vortex (spiral shape vortex) in jet-vortex recuperators. It is proposed the aerodynamic unit for physical simulation of recuperative processes for CFD-simulation boundary conditions definition on they basis.

Key words: jet-vortex heat exchanger, physical model, heat exchanger with hydro-active modes.

1. Saburov E.N. Tsiklonnye nagrevatel'nye ustroystva s intensivirovannym konvektivnym teploobmenom. — Arkhangel'sk : Sev.-Zap. kn. izd-vo, 1995. — 341 p.
2. Kortoeva I.A. Aerodinamika i konvektivnyy teploobmen v ellipticheskikh tsiklonnykh nagrevatel'nykh ustroystvakh. Diss.... kand. tekhn. nauk. — Arkhangel'sk, 2003.
3. Lyandzberg A.R., Latkin A.S. Vikhrevye teploobmenniki i kondensatsiya v zakruchennom potoke. — Petropavlovsk-Kamchatskiy : KamchatGTU, 2004. — 149 p
4. Vysochin V.A, Safonov V.A. Eksperimental'noe issledovanie rabocheho protsessa vikhrevoi truby // IFZh. — 1983. — T. 44, № 12. — P. 235–242.
5. Kozlov V.V. Obshchaya teoriya vikhrey [Tekst] / V.V. Kozlov. — Izhevsk : Izd. dom «Udmurtskiy universitet», 1998. — 238 p.
6. Fundamental'nye i prikladnye problemy teorii vikhrey / Pod red. A.V. Borisova, I.S.Mamaeva i M.A.Sokolovskogo. — Moskva-Izhevsk : Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2003. — 704 p.
7. Khalatov A.A. Teoriya i praktika zakruchennykh potokov. — Kiev : Nauk. dumka, 1989. — 192 p.
8. Alekseenko S.V., Kuybin P.A., Okulov V.L. Vvedenie v teoriyu kontsentrirovannykh vikhrey. — Novosibirsk : Institut teplofiziki SO RAN, 2003. — 504 p.
9. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by rotating endwall // Exp. in Fluids. — 1984. — Vol. 2, № 4. — P. 189–196.
10. Sorensen J.N. Visualization of rotating fluid flow in a closed cylinder // Rep. AFM 92–06. Department of Fluid Mech. Technical Univ. of Denmark, 1992.
11. Stevens J.L., Lopez J.M, Cantwell B.J. Oscillatory flow states in an enclosed cylinder with a rotating endwall // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 389. — P. 101–118.
12. Gelfgat A.Y., Bar-Yoseph P.Z., Solan A. Stability of confined swirling flow with and without vortex breakdown // J. Fluid Mech. — 1996a. — Vol. 311. — P. 1–36.
13. Smolina N.V. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya topliva i snizhenie vybrosov vrednykh veshchestv v tsiklonnykh nagrevatel'nykh ustroystvakh s dvukhstoronnim vyvodom gazov optimizatsiye ikh geometricheskikh parametrov: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. — Arkhangel'sk. — 1995. — 150 p.
14. Vulis L.A., Ustimenko B.P. Ob aerodinamike tsiklonnoy topochnoy kamery // Teploenergetika. — 1954. — № 9. — P. 3–9.
15. Chin' Ko-fa. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie turbulentnoy struktury potoka v tsiklonnoy kamere: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. — M., 1962. — 21 p.
16. Kalishevskiy L.L., Katsnel'son B.D. i dr. Tsiklonnye topki / Pod obshch. red. G.F.Knorre i M.L.Nadzharova. — M.-L. : Gosenergoizdat, 1958. — 216 p.
17. Khavkin Yu.I. Tsentrobezhnye forsunki. — L. : Mashinostroenie, 1976. — 168 p.
18. Pat. 104396 Ukr., MPK⁹ F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Rekuperator / K.V. Ageev. — Opubl. 27.01.14, Byul. № 2.
19. Ageev K.V., Denisova A.E. Struyno-vikhrevye rekuperatory dlya energosberegayushchikh tekhnologiy, Kholodil'na tekhnika ta tekhnologiya. Energetika ta energozberezhennya, 2015, № 51(4), P. 76–82.

Надійшла 29.05.2015

Received 29.05.2015