



УДК 636:631

**К. В. Агеев** , **А. Е. Денисова**

Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, Одеса, 65044, Украина

 e-mail: agyeyev@yandex.ru**СТРУЙНО-ВИХРЕВЫЕ РЕКУПЕРАТОРЫ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Рассмотрены перспективы применения струйно-вихревого рекуператора для повышения эффективности технологических агрегатов. Рассмотрен вопрос о неустойчивости спиральных вихревых пространственных структур на основе теории вихрей и предложена физическая модель для имитационного физического моделирования с последующим CFD-моделированием работы рекуператора при различных температурах.*

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

**К. В. Агеев, А. Е. Денисова**

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

**СТРУМЕНЕВО-ВИХРОВІ РЕКУПЕРАТОРИ ДЛЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

*Розглянуто перспективи застосування струменево-вихрового рекуператора для підвищення ефективності технологічних агрегатів. Розглянуто питання про нестійкість спіральних вихрових просторових структур на основі теорії вихорів і запропонована фізична модель для імітаційного фізичного моделювання з подальшим CFD-моделюванням роботи рекуператора при різних температурах.*

**Ключові слова:** струменево-вихровий рекуператор; фізична модель; теплотехнічні апарати з активними гідрогазодинамічними режимами.

DOI: 10.15673/0453-8307.4/2015.48649



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Научные работы по теории вихрей базируются в трудах Декарта, Гюйгенса и Бернулли, однако, теория вихревого движения является несовершенной из-за ограничений, которые определялись существовавшим тогда уровнем техники, Ньютоновская теория гравитации и ее практическая верификация постепенно вытеснили вихревую теорию. Однако, ньютоновская гидродинамика, относится к исключительно потенциальному (безвихревому) течению идеальной жидкости [1]. В современном понимании началом существования теории вихрей можно считать работу [2], в которой доказаны основные теоремы движения идеальных жидкостей без потенциала скоростей, движение которых было впервые названо вихревым. Важным следствием этой работы является теорема Гельмгольца о вмерзновенности вихревых линий, согласно которому вихревые массы можно рассматривать как аналогичные массам в классической механике. Следующим шагом была постановка вопроса об устойчивости системы из  $N$  точечных вихрей, размещенных в вершинах правильного многоугольника. Экспериментальная проверка данной гипотезы была проведена на модели, представляющей собой совокупность одинаковых магнитов, плавающих во внешнем магнитном поле. В частности, в

работе [3] была доказана устойчивость структуры из семи точечных вихрей ряда неудачных попыток в проведенных в работах [4, 5].

В современных работах [6, 7] предложены различные модели математического описания вихревых процессов, плохая применимость которых для решения научно-практических задач и ряд неточностей, несогласованность и взаимная критика результатов подтверждают важность комплексного изучения гидрогазодинамических процессов теплообмена в системах с вихревыми спиральными структурами закрученных потоков. Наиболее перспективным с точки зрения практического применения теории вихрей является экспериментальное и математическое исследование вихревых спиральных структур и их устойчивости. Из существующих аппаратов максимальной эффективностью обладают устройства с активными гидрогазодинамическими режимами — циклонные и вихревые, анализ использования которых на предприятиях показал, что такие устройства значительно превосходят теплообменники других типов аналогичного назначения [8]. Например, современные рекуператоры, согласно практическим мероприятиям Энергетической стратегии Украины до 2030 г., должны отвечать следующим требованиям: изготовление из нелегированных сталей, компактность, пониженная металлоемкость, а сле-

довательно, повышенный коэффициент энергоэффективности как отношение степени рекуперации тепла к весу теплообменника. Поэтому разработка устройств, в которых реализуются вихревые движения и исследование протекающих в них активных гидрогазодинамических процессов, является актуальной научной задачей, решение которой может стать основой конструирования энергоэффективных теплообменных аппаратов с высокими удельными рабочими показателями.

## II. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА.

Существенным преимуществом теплотехнических агрегатов — вихревых устройств, таких как вихревые топки, камеры сгорания, сепараторы, рекуперативные теплообменники и многие другие, получивших значительное распространение в промышленности благодаря работе в активных гидрогазодинамических режимах, является их высокая удельная эффективность при пониженной металло- и ресурсоемкости, а также уменьшенные габариты. При этом одной из наиболее важных особенностей указанных устройств является значительная зависимость эффективности их работы от режимных и конструктивных параметров [8]. Технические решения для теплотехнических агрегатов, в которых используется вихревой эффект (эффект Ранка) — эффект расслоения при движении в трубе расширяющегося закрученного высокоскоростного потока газа, при котором температура пристенного (периферийного) слоя выше температуры центрального слоя ядра закрученного потока [9], по сути представляют собой вихревые трубы в различном конструктивном исполнении<sup>1</sup>. Перспективной конструкцией рекуператоров с активными гидрогазодинамическими режимами<sup>2</sup> — струйно-вихревой рекуперативный теплообменник. В основу работы этого рекуператора положен эффект синергии от совместной работы системы импактных (ударных) струй, формирующих вихревую спиральную структуру движения охлаждающего воздуха по всей длине теплообменника при дополнительном закручивании и турбулизации распорками-завихрителями.

При этом традиционные методики малоприменимы для расчетов струйно-вихревой конструкции такого теплообменника, т.к. его конструктивные и температурные характеристики затрудняют исследования в этом направлении.

Особенностью работы струйно-вихревых рекуператоров, согласно теории концентрированных вихрей, является формирование системы вихревых

шнуров  $f$  (рисунок 1), формирующихся за несимметричной струей, истекающей в сносящий поток.

С учетом неустойчивости вихревых спиральных структур, практический интерес представляет теория концентрированных вихрей, которая основана на обобщении и систематизации опытных данных.

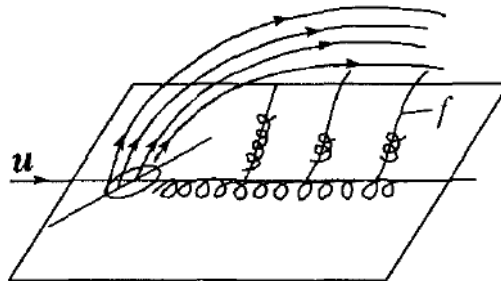


Рисунок 1 – Схема формирования вихревых шнуров.

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) в настоящее время исследователи уделяют большое внимание. При этом данные экспериментов показывают, что вихревые нити также отклоняются от прямолинейной траектории движения вследствие свойства вихревого ядра быть проводником возмущений, в процессе существования вихревых структур наблюдается явление распада вихря. Указанные особенности формирования и существования вихревых спиральных структур в рекуператоре на основе струйно-вихревой технологии делают невозможным создание численного описания его работы на основе представлений о происходящих в системе процессов, как исключительно вихревых, циклонных. Численное CFD-моделирование для задания граничных условий модели, требует предварительных экспериментов с физической моделью (холодный аэродинамическим стендом) при разработке которого необходимо учитывать особенности работы струйно-вихревой системы чтобы обеспечить адекватность полученных на физической модели данных.

## III. CFD-ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА

Современным методом исследования процессов теплообмена, движения потоков воздуха, процессов сушки/нагрева ими рабочего тела и пр. также является создание аэродинамического холодного стенда (физической модели), в том числе в уменьшенном масштабе с сохранением по критериям подобия адекватной связи с объектом исследования натуральной величины, для получения прямыми измерениями граничных условий процесса, визуализации и фиксации полученных результатов с помощью скоростной фото- и видео-

<sup>1</sup> Патент на изобретение № 11254, МКИ. Вихревая труба. Авторы: В. А. Бухман, Г. Е. Гладков, В. А. Каневский, С. Л. Каминский, П. М. Сунгуров. Оpubл. 25.12.96, Бюл. № 4

<sup>2</sup> Патент 104396 Укр., МПК9 F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Рекуператор. Автор: К. В. Агеев. Оpubл. 27.01.14, Бюл. № 2.

сьемки для последующего CFD-моделирования протекающих в рабочем пространстве исследуемого объекта процессов [10].

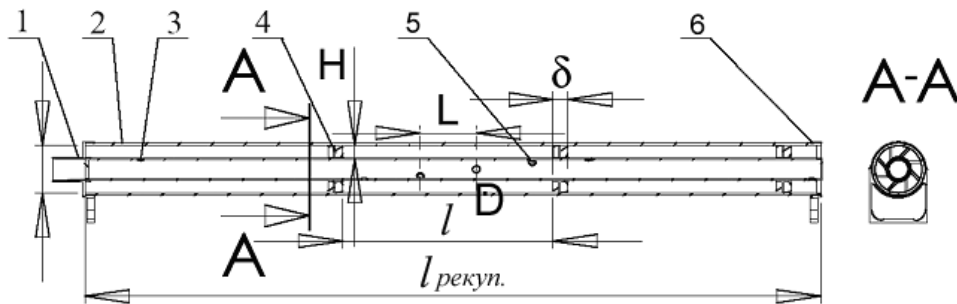
Например, в работе [11] исследования были выполнены методами физического моделирования на аэродинамическом стенде с использованием двухлучевого лазерного доплеровского анемометра фирмы «Dantec Measurement Technology A/S» для получения распределений осредненных и пульсационных значений тангенциальной и осевой составляющих вектора скорости с последующим численным исследованием программного комплекса ANSYS-CFX и модели турбулентности Shear Stress Transport k- $\omega$ .

В работе [12] экспериментальное наблюдение вихревых структур проводилось, в частности, на гидродинамическом стенде для исследования турбулентных закрученных течений, который представляет собой замкнутый гидравлический контур (производительность по воде 8 л/с, напор — 1 атм) с рабочей камерой из оргстекла квадратного сечения длиной 625 мм. Полученные в рабочем пространстве закрученные вихревые структуры фотографировались с последующим CFD-модели-

рованием протекающих вихревых процессов на основе решений, осредненных по параметру Рейнольдса уравнений Навье-Стокса.

Кроме того, на основе результатов имитационного и CFD-моделирования предлагались различные алгоритмы оптимизации работы вихревых камер. В работе [12] был предложен алгоритм, который позволил бы обеспечить заданные параметры на выходе вихревой трубы при варьировании параметров давления и температуры на ее входе.

Поэтому для исследования сложных турбулентных процессов, протекающих на воздушной стороне рекуператора указанной выше «струйно-вихревой» конструкции на начальном этапе было принято решение о создании физической модели (аэродинамический холодный стенд) для измерения граничных условий для последующего математического CFD-моделирования струйно-вихревого теплообменника и имитационного моделирования струйно-вихревой системы посредством вдувания в рабочее пространство цветного дыма и воздуха (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Конструкция и основные параметры физической модели «струйно-вихревого» рекуператора:

- 1 — входная крышка с боковым патрубком для одновременной подачи дыма и воздуха и подставкой;  
2 — наружная труба; 3 — перфорированная внутренняя вставка; 4 — модель распорки-завихрителя;  
5 — сопло; 6 — выходная крышка с подставкой.

Установка представляет собой физическую модель рекуператора, с измерительной аппаратурой и вычислительным блоком. Физическая модель представляет собой две коаксиально собранные трубы — наружную трубу 2 и внутреннюю трубу 3 изготовленные из оргстекла (Plexiglas), при этом внутренняя труба 3 имеет спиральную перфорацию соплами круглой формы 5. Для соединения труб и придания жесткости, а также подключения измерительного оборудования на входе и выходе коаксиально расположенных труб установлены входная крышка 1 с боковым патрубком и подставкой и выходная крышка с подставкой 6. Во внутреннем пространстве физической модели установлены, распорки-завихрители (неподвижные распорки-завихрители) изготовленные из ABS-пластика методом объемного стереолитографического прототипирования (3D-печать) (рисунок 2). В качестве измерительной аппаратуры при

подаче воздуха во внутреннюю перфорированную по спирали вставку применялись цифровой дифференциальный манометр-термоанемометр DT-8920 с трубкой Пито-Прандтля, позволяющей измерять дифференциальное давление, избыточное полное давление, температуру и рассчитывать скорость и объемный расход, а также импеллерный анемометр MS6252B с функцией измерения температуры, скорости потока и объемного расхода воздуха до температур 50°C. Измерение указанных характеристики потока производилось тем же прибором DT-8920. Оба прибора через USB-порт подключают к ПК, что позволяет фиксировать данные измерений скоростей, давлений, расходов и температур в режиме реального времени в программной среде, которая поставляется вместе с приборами. Технические характеристики измерительных приборов DT-8920 и MS6252B приведены в таблице 1.

Таблиця 1 – Технические характеристики термоанемометра DT-8920

| Давление                        |               |                                      |                                |
|---------------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Единицы                         | Диапазон      | Дискретность                         | Погрешность                    |
| Pa (Па)                         | 5 000         | 1                                    | ± 0,3 % от диапазона при 25 °C |
| Максимально допустимое давление |               | 50 000 Па                            |                                |
| Повторяемость                   |               | ± 0,2 % (макс. ± 0,5 % от диапазона) |                                |
| Линейность/гистерезис           |               | ± 0,29 % от диапазона                |                                |
| Время отклика                   |               | 0,5 с                                |                                |
| Скорость                        |               |                                      |                                |
| Единицы                         | Диапазон      | Дискретность                         | Погрешность                    |
| m/s (м/с)                       | 10,00...80,00 | 0,01                                 | ± 2,5 % при 10 м/с             |
| Температура                     |               |                                      |                                |
| °C                              | 0,0...+50,0   | 0,1                                  | ± 1°C                          |

Аэродинамический стенд (физическая модель рекуператора) работает следующим образом. На вход аэродинамического стенда из нагнетателя подается воздух со скоростями более 20 м/с, который поступает в воздушную перфорированную трубу 3 с шагом между перфорированными соплами 1. Подаваемый воздух при прохождении по внутренней воздушной трубе 3 при истекании из перфорации 5 формирует турбулентный вихрь из исследуемых импактных (ударных) струй, аэродинамические характеристики которых, как граничные условия для последующего CFD-моделирования, необходимо получить в результате экспериментов. Импактные (ударные) струи взаимодействуют с наружной плексигласовой трубой аэродинамического стенда диаметра D, которая моделирует нагретую стенку внешней трубы рекуператора, происходит диссипация струй, разбиение на вихревые флуктуации, искривление траектории и пр.

Сформированный при истекании воздуха из внутренней воздушной перфорированной трубы турбулентный вихрь проходит вдоль зазора H между внутренней перфорированной по спирали трубой и наружной трубой физической модель рекуператора. Вдоль внутренней перфорированной по спирали трубы 3 расположены распорки-завихрители, обеспечивающие дополнительную турбулизацию сформированного вихря.

Для обеспечения фото/видео- фиксации работы стенда и протекающих в его рабочем пространстве процессов турбулизации истекающих из перфорированных сопел струй, формирования суммарного турбулентного вихря из импактных струй и дополнительного закручивания при натекании общего турбулентного вихря на стенку наружной трубы 2 в рабочее пространство стенда подавали дым, генерируемый дымовой машиной Chauvet Huggisane 700. Дым представляет собой аэрозоль, получаемый возгонкой до парообразного специального концентрата («fog fluid»), представляющего собой нетоксичный и негорючий раство-

ра глицерина с воде с последующим распылением через сопло дым-машины.

#### IV. ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТРУЙНО-ВИХРЕВОГО РЕКУПЕРАТОРА

Поскольку струйно-вихревая конструкция рекуператора с активными гидрогазодинамическими режимами на воздушной стороне, предполагает высокую компактность для обеспечения повышенных удельных показателей, прогноз эффективности рекуператора на основе близкого к оптимальному взаимного расположения круглых сопел был проведен по номограмме для совокупности круглых сопел (рисунок 3) в зависимости от параметров взаимного размещения сопел — соотношений диаметров сопел D, шага между соплами L и зазора между перфорированной трубой и нагреваемой стенкой H. [13].

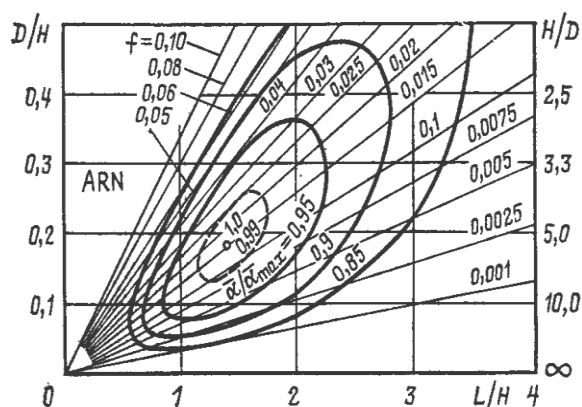


Рисунок 3 – Номограмма оптимизации струйной системы для теплообменников:

D — диаметр сопла; H — зазор между перфорированной трубой и нагреваемой трубой (стенкой) рекуператора; L — шаг между соплами; f — площадь сопел.

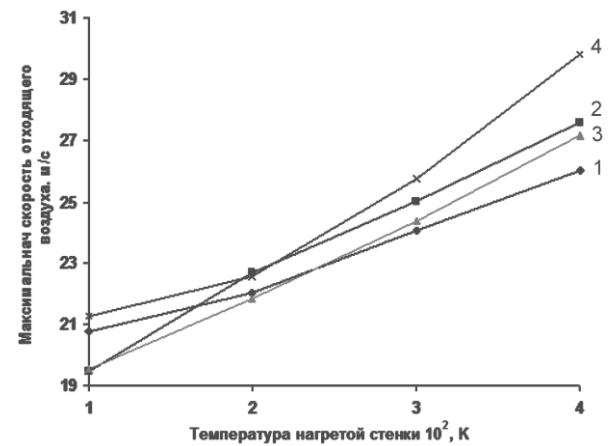
Для решения задачи пространственного размещения сопел и определения сопротивления внутренней воздушной трубы – генератора импактных (ударных) струй и первичного генератора вихревого спирального движения в рабочем пространстве струйно-вихревого рекуператора, очевидно, в малой степени либо вовсе не могут быть применимы стандартные методики расчетов металлических трубчатых рекуператоров. Номограмма оптимизации струйной системы для круглых сопел (рисунок 3) представляет собой проекцию на плоскости пространственной трехмерной поверхности отношений средних коэффициентов теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  к максимальным средним коэффициентам теплоотдачи  $\alpha_{\max}$  для некоторой температуры нагрева наружной стенки рекуператора и пространственного взаимного размещения сопел. Анализ номограммы (рисунок 3) дает возможность прогнозировать диапазон соотношений  $H/D$  и  $L/H$  учитывая площадь сопел (фактически учитывая теоретически возможный расход воздуха). Так с увеличением площади сопел и увеличении расхода, максимальное соотношение  $\bar{\alpha} / \alpha_{\max} \sim 0,95$  может быть достигнуто при  $H/D = 2-11$  и  $L/H = 1-2,8$ . Достижимый на практике показатель  $\bar{\alpha} / \alpha_{\max} \sim 0,85$  (85% эффективность) показывает, что рекуператоры на основе технологии импактных струй могут применяться в самом широком диапазоне размеров сопел, расходов воздуха и диаметров труб. Для предлагаемой в настоящей работе струйно-вихревой технологии, кроме оптимизации форм, диаметров сопел и их размещения существенное влияние на эффективность рекуперации тепла будет оказывать наличие неподвижного оребрения в форме распорок-завихрителей, которое обеспечивает дополнительную закрутку турбулизованного потока нагретого воздуха, следовательно возможно повышение эффективности такой системы до 0,9–0,95 либо даже больших значений  $\bar{\alpha} / \alpha_{\max}$ . Однако такое повышение эффективности (рисунок 3) будет накладывать некоторые ограничения на область параметров  $H/D$  и  $L/H$  сдвигая их к  $H/D \leq 3-4$ , а  $L/H \leq 1-2,5$ . Повышение параметра  $H$  будет неблагоприятно влиять на работу неподвижного оребрения, поскольку большая высота распорок-завихрителей будет способствовать проявлению при их обтекании эффектов, наблюдаемых при обтекании крыльев самолетов либо кавитационных эффектов за плоскостью гребного винта.

Измерения параметров воздушного потока проводились отдельно для входа и выхода аэродинамического стенда, время одного измерения составляло 100 с, включающих 10 с работы измерительной аппаратуры без подключения нагнетателя воздуха и 90 с – после подачи воздуха в рабочую полость стенда при неизменных параметрах перфорированной вставки и расположения оребрения, с частотой записи данных 1 с измерение дифференциального давления ( $P_{\text{diff}}$ ), избыточного полного давления ( $P_{\text{total}}$ ), температуры и расчет скорости (м/с) и объемного расхода ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ) проводились циклично по 3 раза для получения статистически достоверной выборки

данных и возможности усреднения полученных результатов измерений. По данным измерений расчетным путем были получены значения статического давления (статического напора) ( $P_{\text{stat}}$ ), массового ( $\text{кг/с}$ ) и расхода воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) для стандартных условий – температура 20 °С, плотность воздуха 1,2  $\text{г/м}^3$ .

## V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа процессов, выявленных CFD-моделированием по данным аэродинамических исследований на физической модели струйно-вихревого рекуператора, использованы графические зависимости для основных параметров его работы: скорости нагретого воздуха на выходе теплообменника, удельного теплового потока и скорости отходящих газов.

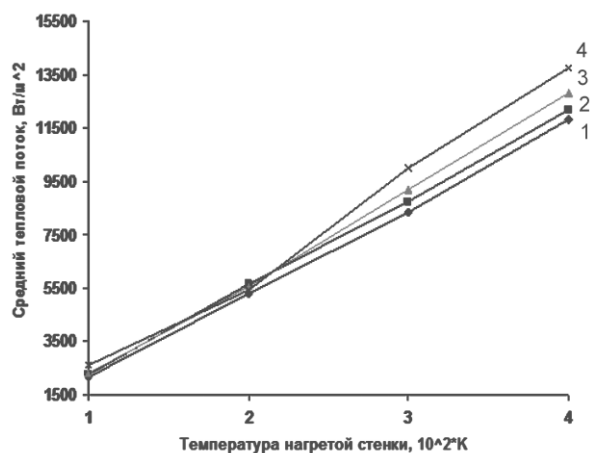


**Рисунок 4** – Зависимость максимальной выходной скорости нагретого воздуха для разного количества сопел и температуры стенки рекуператора при различном количестве лопастей: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4.

Анализ поведения функции скорости потока воздуха на выходе рекуператора (рисунок 4) показывает, что после достижения нагретой стенкой теплообменника температуры 200°С (473 К) наблюдается 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.

Тепловая мощность рекуператора повышается с повышением числа распорок-завихрителей оребрения и температуры нагрева наружной стенки и не подвержена влиянию степени оребренности, т.е. не зависит от числа распорок-завихрителей в системе (рисунок 5), что не противоречит гидродинамической теории, согласно ко-

торой коэффициент теплоотдачи пропорционален величине местных аэродинамических сопротивлений.



**Рисунок 5** – Залежність осередненого теплового потоку  $Q$  від температури нагрітої стінки рекуператора та числа розпорок-завихрителів при різному кількості лопатей: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4.

## V. ВИСНОВКИ

Современные представления о вихревом движении и причинах формирования спиральных пространственных вихревых структур базируются на математических моделях, анализ которых демонстрирует неустойчивость и нестабильность вихревых спиральных структур при числе вихревых нитей более трех, поэтому наиболее перспективным с точки зрения практического применения теории вихрей является экспериментальное и математическое исследование устойчивости вихревых спиральных структур.

Анализ использования рекуператоров на основе вихревого эффекта на промышленных предприятиях показал их преимущества по сравнению с теплообменниками других типов за счет относительной простоты конструкции, пониженной металлоемкости и повышенных удельных эксплуатационных характеристик.

Предложенная для исследования работы струйно-вихревого рекуператора физическая модель позволяет при численном CFD-моделировании обеспечить погрешность расчетной температуры, соответствующую погрешности измерительной аппаратуры.


Анализ результатов CFD-моделирования показывает, что эффективность теплоотдачи конвекцией возрастает при увеличении температуры нагретой стінки рекуператора и увеличении числа розпорок-завихрителів, мощность теплообменника также возрастает, поскольку растет значение коэффициента теплоотдачи, что прямо пропорци-

онально зависит от местных аэродинамических сопротивлений рекуператора.


## ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов В. В.** Общая теория вихрей. [Текст] / В. В. Козлов. — Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 1998. — 238 с.
2. **Гельмгольц Г.** Основы вихревой теории. [Текст] / Г. Гельмгольц. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. — 82 с.
3. **Kurakin L. G., Yuodovich V. I.** The stability of stationary rotation of a regular vortex polygon. *Chaos*. — 2002. — Vol. 12, № 3. — p. 574–595.
4. **Mertz G. T.** Stability of body-centered polygonal configurations of ideal vortices // *Phys. Fluids*. — 1978, Vol. 21, № 7. — p. 1092–1095.
5. **Borisov A. V., Kilin A. A.** Stability of Thomsons configurations of vortices on a sphere // *Reg&Ch. Dyn.* — 2000. — Vol. 5, iss. 2., pp. 189–200.
6. **Newton P. K.** The N-Vortex problem // *Analytical Techniques, Applied Mathematical Sciences, Springer*. — 2001. Doi: 10.1007/978-1-4684-9290-3
7. **Aref, H., Newton, P. K., Stremler, M., Tokieda, T., Vainchtein, D. L.** 2003. Vortex Crystals. *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 39, 1–79.
8. **Ляндзберг А. Р.** Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке. [Текст] / А. Р. Ляндзберг, А. С. Латкин // — Петропавловск-Камчатский: КамчаткаГТУ, 2004. — 149 с.
9. **Коновалов В. И., Орлов А. Ю., Гагапова Н.Ц.** Сушка и другие технологические процессы с вихревой трубой Ранка-Хилша: Возможности и экспериментальная техника [Текст] / В.И. Коновалов, А.Ю. Орлов, Н.Ц. Гагапова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. — 2010. — Т. 16, № 4. — С. 803–825.
10. **Агеев К. В.** Холодный стенд для исследования работы металлических рекуператоров с активными вставками для повышения энергоэффективности печных агрегатов [Текст] / К. В. Агеев. // Тез. докл. Междунар. конф. "Междисциплинарность как тенденция современной науки", Донецк (Украина), 14 июня 2014 г. — Донецк, 2014.
11. **Леухин Ю. Л.** Исследование аэродинамики и теплоотдачи в кольцевых каналах циклонных рекуператоров [Текст] / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров // *Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии*. — 2013. — № 1 (12). — С. 123–129.
12. **Анохина Е.С.** Экспериментальное и численное моделирование стационарных вихревых структур [Текст] / Е.С. Анохина, С.И. Шторк, С.В. Алексеевко // *Сборник научных статей «Современная наука»*. — 2012. — № 2 (10). — С. 68–72.
13. *Справочник по теплообменникам: в 2-х т.* Т. 2 / Пер. с англ. под. ред. О. Г. Мартыненко и др. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 352 с.

Отримана в редакції 15.06.2015, прийнята до друку 03.07.2015

K. V. Agyeyev , A. E. Denysova

Odessa national polytechnic university, 1 Shevchenko av., Odessa, 65044, Ukraine

 e-mail: agyeyev@yandex.ru

## JET-VORTEX RECUPERATORS FOR ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

*The paper considers the basic theoretical concepts of vortex motion in relation to the solution of technical problems. The issue of instability of spiral vortex spatial structures when doublet or triplet of vortex filaments occurs is considered on the basis of the vortex theory. The problem of current importance is investigation of existence parameters for swirl or spiral shape disturbances. The disturbances so called processes with precessing vortex core (spiral shape vortex). The assessment of heat engineering equipment, in particular, recuperative heat exchangers is conducted. It is displayed that heating engineering units – vortex devices such as vortex combustor, combustion chambers etc. – have considerable advantages due to the operation in the active hydro–gasdynamic modes, and efficiency of their work is mainly depends on the operating and design parameters. The vortex effect that occurs in these devices allows making them compact, with an increased energy efficiency ratio, which corresponds to the objectives set in the Energy Strategy of Ukraine 2030. A construction of the jet-vortex compact recuperative heat exchanger, the operation features of which are in good agreement with the theory of the concentrated vortices, is given. It is displayed that the work of the jet-vortex recuperative heat exchanger is not completely identical to the cyclone vortex heat exchangers by the nature of the processes occurring there. The process of making decisions on the design parameters of a physical model (a cold aerodynamic experimental unit), its aerodynamic calculations and the selection of parameters for CFD-simulation of jet-vortex recuperative heat exchanger is considered. A technique for research on a physical model and its design is represented. The operation of the experimental unit is described. According to the results of CFD-research for recuperator operation, the high adequacy of the numerical CFD-model developed on the basis of the physical and simulation modeling results is presented.*

**Keywords:** jet-vortex heat exchanger; physical model; heat exchanger with hydro-active modes

## REFERENCES

1. Kozlov, V. V. 1998. *Obschaya teoriya vikhrei*. Izhevsk: izd. dom «Udmurtskiy universitet», 238 p.
2. Gelmgolts, G. 2002. *Osnovy vikhrevoi teorii*. M.: Izhevsk, IKI, 82 p. (in Russian)
3. Kurakin, L. G., Yuodovich, V. I. 2002. The stability of stationary rotation of a regular vortex polygon. *Chaos, Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 12 (3), 574–595. Doi: 10.1063/1.1482175
4. Mertz, G. T. 1978. Stability of body-centered polygonal configurations of ideal vortices. *Phys. Fluids*, 21 (7), 1092–1095. Doi: 10.1063/1.862347
5. Borisov, A. V., Kilin, A. A. 2000. Stability of Thomson configurations of vortices on a sphere. *Reg&Ch. Dyn*, 5 (2), 189–200. Doi: 10.1070/rd2000v005n02abeh000141
6. Newton, P. K. 2001. The N-Vortex problem. Analytical Techniques, *Applied Mathematical Sciences - Springer*. Doi: 10.1007/978-1-4684-9290-3.
7. Aref, H., Newton, P. K., Stremmer, M., Tokieda, T., Vainchtein, D. L. 2003. Vortex Crystals. *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 39, 1–79. Doi:10.1016/s0065-2156(02)39001-x
8. Lyandzberg A.R., Latkin A.S. 2004. Vkhrevie teploobmenniki I kondensatsiya v zakruchennom potoke. *Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatkaGTU*, 149 p. (in Russian)
9. Kononov, V.I., Orlov, A.Yu., Gatapova, N.T. 2010. Sushka I drugie tekhnologicheskie protsessy s vikhrevoi truboi Ranka-Khilsha: vozmozhnosti I eksperimentalnaya tekhnika. *Vestnik TGTU*, 16 (4), 803–825. (in Russian)
10. Agyeyev, K. V. 2014. Kholodnyi stend dlya issledovaniya raboty metallicheskih rekuperatorov s aktivnymi vstavkami dlya povysheniya energoeffektivnosti pechnykh agregatov. Theses of International conference "Mezhdistsiplinarnost kak tendentsiya sovremennoi nauki", Donetsk (Ukraine), 14 June 2014. (in Russian)
11. Leukhin, Yu. L., Saburov, E. N. 2013. Issledovanie aerodinamiki i teplootdachi v koltsevykh kanalakh tsyklonnykh rekuperatorov. *Sovremennaya nauka. Issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii*, No. 1 (12), 123–129. (in Russian)
12. Anokhina E. S., Shtork S. I., Alekseenko S. V. 2012. Eksperimental'noe I chislennoe modelirovanie statsyonarnykh vikhrevykh struktur. *Sbornik nauchnykh statei "Sovremennaya nauka"*, No. 2 (10), 68–72. (in Russian)
13. Spravochnik po teploobmennikam: v 2 t. T. 2 / Per. s angl. pod. red. O. G. Martynenko. M.: Energoatomizdat, 1987, 352 p. (in Russian)

Received 15 June 2015

Approved 03 July 2015

Available in Internet 30.08.2015