

ния количества слоев, что может быть достигнуто за счет физических методов регулирования служебных

свойств полимерных материалов при послойном формировании пленки покрытия.



Рис. 3. Внешний вид антикоррозионной защиты внутренней поверхности насоса кислотной промывки на Кременчугской ТЭС. а) — верхняя крышка корпуса, б) — нижняя часть корпуса, в) — ротор, г) - патрубок

Таким образом, накопленный нами научный и производственный опыт позволяет рекомендовать разработанные технологические приемы и материалы для широкого внедрения в народное хозяйство, как Украины, так и других стран СНГ.

*Досліджені тепло і гідродинамічні характеристики стиснених пучків еліптичних труб. Верифіковано програмне забезпечення і здійснено порівняння з пучками круглих та плоскоовальних труб за масовими і теплопередавальними характеристиками*

**Ключові слова:** теплообмін, гідродинаміка, ефективність, пучки, труби

*Исследованы тепло и гидродинамические характеристики стиснутых пучков эллиптических труб. Верифицировано программное обеспечение и произведено сравнение с пучками круглых и плоскоовальных труб по массовым и теплопередающим характеристикам*

**Ключевые слова:** теплообмен, гидродинамика, эффективность, пучки, трубы

*Heat and hydrodynamic characteristics of the close-tube banks of elliptic pipes are investigated. The software is verified and comparison with banks of round and plane-oval pipes on mass and heat-transfer characteristics is presented*

**Keywords:** heat exchange, hydrodynamics, efficiency, banks, pipes

УДК 536.24:62-714

## ТЕПЛО И ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПУЧКОВ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ТРУБ

**В. В. Кузнецов**  
Кандидат технических, доцент\*

**А. В. Якимович**  
Магистрант\*  
\*Кафедра технической теплофизики и судовых  
паропроизводящих установок  
Национальный университет кораблестроения имени адмирала  
Макарова  
пр. Героев Сталинграда 9, г. Николаев, Украина, 54025  
Контактный тел.: 050-493-02-76  
E-mail: aootnet@ukr.net, kuznetsov\_v\_v@ukr.net

### Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими задачами

Актуальной проблемой современной энергетики является модернизация старых и создание новых энергетических установок с улучшенными показателями топливной экономичности. Перспективным направлением в данном случае могут являться регенеративные

установки, достижимый уровень КПД которых составляет 40...45% [1].

Учитывая современные требования к надежности и эффективности таких установок [2], регенераторы для наземных энергетических установок целесообразно выполнять с трубчатой поверхностью теплообмена. При этом необходимо учитывать, что поверхность теплообмена должна обладать как необходимой те-

пловой эффективностью, так и должна обеспечить разработку всего регенератора на ее основе с, по возможности, наименьшим суммарным аэродинамическим сопротивлением и массогабаритными показателями.

Первое условие вызвано тем, что суммарное сопротивление регенератора влияет на работу всего газотурбинного двигателя, в отличие, например от утилизационных котлов, в которых сопротивление газового и водяного трактов оказывают различное влияние на работу всей установки, а сопротивление газового тракта ограничено противодействием на выходе двигателя. Второе условие определяет стоимость регенератора и ряд эксплуатационных затрат – на изготовление, транспортировку и монтаж.

Таким образом, разработка теплообменных поверхностей с указанными характеристиками является актуальной научно-практической задачей.

---

#### Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы

---

За последнее время опубликовано значительное количество работ, посвященных исследованиям теплообменных поверхностей с улучшенными теплогидравлическими и с пониженными массогабаритными показателями. Среди них для рассматриваемых условий можно выделить плоскоовальные и эллиптические трубы, как обладающие меньшим сопротивлением при наружном обтекании.

Достаточно подробные исследования теплообменных поверхностей на основе плоскоовальных труб представлены в [3, 4]. Приведены экспериментально полученные зависимости для расчета теплообмена и гидродинамики [3], а также один из вариантов использования таких теплообменных поверхностей [4]. Однако, такие теплообменные поверхности лучше использовать в теплообменных аппаратах типа «газ»–«жидкость», где необходима интенсификация со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи.

Обобщение результатов исследований по теплообмену в пучках эллиптических труб представлено в [5]. Однако в работе отсутствуют рекомендации по определению гидродинамического сопротивления пучков труб. В работах [6, 7] представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена эллиптических труб с различным соотношением малой и большой оси. Однако было исследовано обтекание одного ряда труб.

---

#### Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья

---

Анализ показал, что эллиптические трубы являются альтернативным решением для формирования поверхностей теплообмена с пониженным гидродинамическим сопротивлением. Однако, имеющиеся литературные данные об особенностях совместного протекания процессов гидродинамики и теплообмена для проектирования теплообменных аппаратов типа «газ»–«газ» на основе таких труб недостаточно.

Настоящая работа является продолжением работы [8], в которой выполнена оценка только теплопередающей эффективности в пучках эллиптических труб.

---

#### Цель и задачи исследования

---

Целью представляемого исследования является обоснование эффективности применения эллиптических труб для формирования поверхностей теплообмена регенераторов газотурбинных установок.

Достижение указанной цели осуществляется за счет решения следующих задач:

- сравнительной оценки компактности пучков круглых, плоскоовальных и эллиптических труб;
- определения показателей теплогидравлической эффективности пучков эллиптических труб и сравнения с аналогичными показателями для пучков круглых труб;
- сравнения полученных данных по гидравлической эффективности с имеющимися литературными данными.

---

#### Методы исследования

---

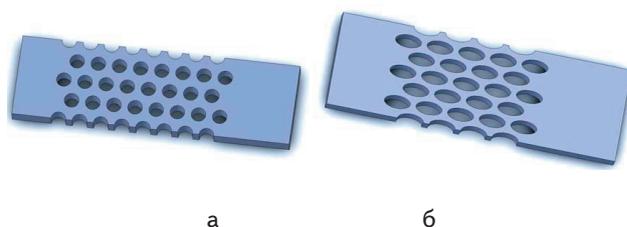
Методом сравнительной оценки компактности пучков круглых, плоскоовальных и эллиптических труб является объемное моделирование в системе автоматизированного проектирования SolydWorks. Для определения характеристик компактности используются встроенные функции системы. Методом определения показателей теплогидравлической эффективности является математическое моделирование в программном комплексе ANSYS CFX.

---

#### Изложения результатов исследования

---

*Сравнительная оценка компактности пучков труб.* Сравнительная оценка компактности производилась для пучков круглых, эллиптических и плоскоовальных труб. Геометрические характеристики пучков круглых труб и соотношения продольных и поперечных шагов принимались по данным [9], для эллиптических и плоскоовальных – по данным [3, 5, 8, 10]. При сравнении обязательным условием являлось соблюдение одинаковой площади поверхности теплообмена. Кроме того, для плоскоовальных труб рассматривалось два варианта: 1 – одинаковая ширина малой оси и 2 – одинаковая площадь поперечного сечения с эллиптическими трубами. Параметры набегающего потока принимались аналогично [8].



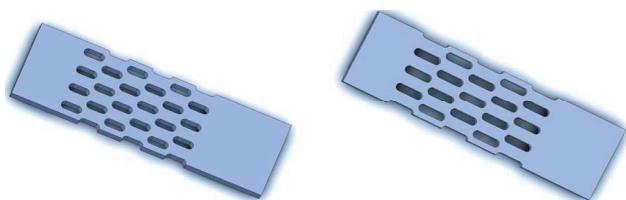


Рис. 1. Компоновки поверхностей теплообмена : а – из круглых труб; б – из эллиптических труб; в – из плоскоовальных труб [3] вариант 1; г – из плоскоовальных труб [10] вариант 1

Коэффициент компактности рассчитывался как

$$K = \frac{F \cdot l}{V}$$

где  $F$  – площадь поверхности теплообмену,  $m^2$ ;  $l$  – длина труб,  $m$ ;  $V$  – объём области течения,  $m^3$ .

Результаты определения геометрических характеристик и коэффициента компактности пучков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики и коэффициент компактности поверхностей нагрева

Профиль теплообменной поверхности	Ширина пакета, мм	Длина пакета, мм	Высота пакета, мм	Коэффициент компактности
круглый	127	244,4	20	32,2
эллиптический	111	193,9	20	46,5
[3], вариант 1	143	357,1	20	19,6
[10], вариант 1	168	248,2	20	24,0
[3], вариант 2	146	237,3	20	28,9
[10], вариант 2	135	250,0	20	29,6

Результаты показывают, что по сравнению с теплообменной поверхностью из круглых труб у поверхности из эллиптических труб коэффициент компактности увеличивается более чем на 30 %.

*Определение показателей теплогидравлической эффективности пучков труб.* Первым этапом определения показателей теплогидравлической эффективности пучков труб является задание математической модели и верификации получаемых результатов.

Для условий, которые рассматриваются, учитывая высокие скорости теплоносителей, используем RSM модель напряжений Рейнольдса [11]. Эта модель считается одной из наиболее совершенных моделей турбулентности, среди используемых в современных программных пакетах. В ней введены в систему уравнений Навье-Стокса индивидуальные уравнения транспорта напряжений Рейнольдса и уравнение коэффициента диссипации. Это предусматривает использование пяти дополнительных транспортных уравнений для решения двумерных задач и семи уравнений для решения трехмерных. С физической точки зрения, RSM модель более точно моделирует эффекты, связанные с искривлением течений, вихреобразованием, вращением потока, быстрыми изменениями напряженности течения, которое достаточно корректно подходит для условий моделирования обтекания пучка труб потоком отработавших газов газотурбинных двигателей.

Верификация используемой модели производилась путем сравнения получаемых результатов с результатами, представленными в [12]. Картины обтекания для значения числа  $Re=10000$ , характерного для потока отработавших газов газотурбинных двигателей, представлены на рис. 2.

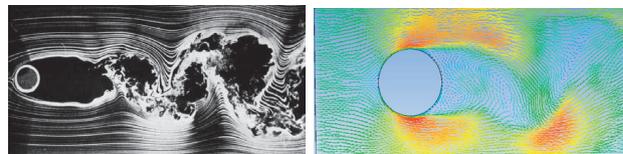


Рис. 2. Результаты верификации программного обеспечения: а – [12] при  $Re=10000$ ; б – тестовое моделирование при  $Re=10000$

Анализ результатов верификации показывает, что качественные картины течения практически идентичны. Количественные характеристики течения отличаются на величину  $\pm 3\%$ , что вполне допустимо.

Вторым этапом исследования определялись непосредственно показатели теплогидравлической эффективности. Исходные данные для обтекающего трубный пучок потока принимались аналогично [8]. Результаты в виде отношения изменения интенсивности теплоотдачи ( $Nu/Nu_0$ ) к изменению потерь давления ( $f/f_0$ ) в зависимости от потерь давления представлены на рис. 3.

Анализ результатов показывает, что до значения  $f/f_0=0,94$  рост теплоотдачи превышает рост гидродинамического сопротивления, что является положительным фактором при использовании таких поверхностей в регенераторах газотурбинных установок.

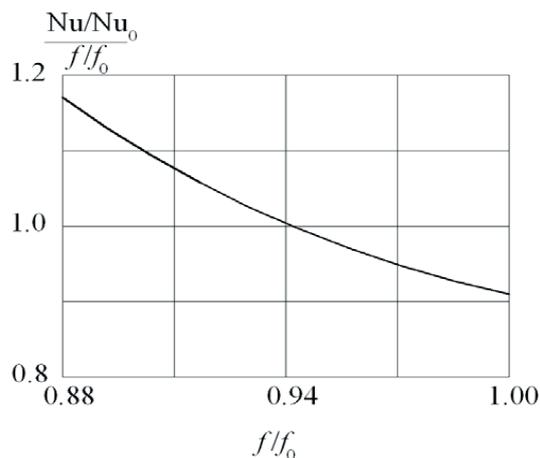


Рис. 3. Результаты математического моделирования обтекания пучка эллиптических труб

На рис. 4 представлены результаты сравнения полученных результатов с имеющимися литературными данными [13] где показано, что известные методы интенсификации теплообмена располагаются в узкой области между предельной линией поверхностного оребрения (10) для больших чисел  $Re$  и данными для сферических углублений при низких числах  $Re$  (1, 2, 4, 9). Для использования в качестве поверхностей нагрева регенераторов газотурбинных двигателей практи-

ческий интерес представляют поверхности, приведённые характеристики которых лежат соответственно выше значения, равного единице по оси ординат, и значения левее единицы по оси абсцисс. В окрестностях этой области возможно создание регенераторов с пониженным (менее 4 % суммарных) аэродинамическим сопротивлением. Полученные при моделировании данные, во-первых, удовлетворительно согласуются имеющимися литературными данными [13] (рис. 4), а во-вторых, лежат в области роста теплообмена по сравнению с ростом сопротивления, что обуславливает перспективность продолжения их дальнейшего исследования.

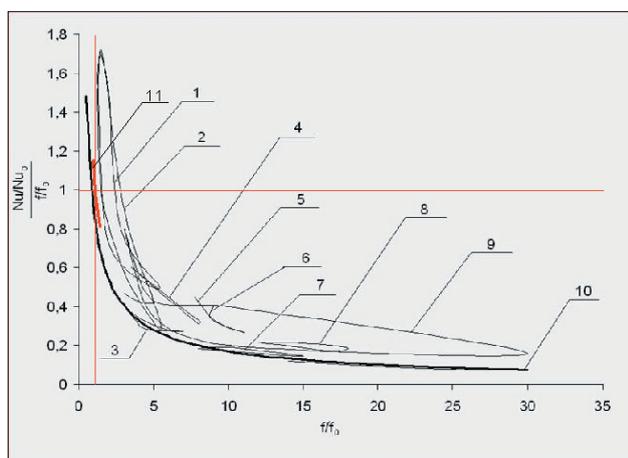


Рис. 4. Сравнение полученных результатов с литературными данными [13]: 1 — сферические углубления на двух сторонах канала; 2 — сферические углубления на одной стороне канала; 3 — внутренние канавки; 4 — сферические выступы на плоской поверхности; 5 — 600-сплошные и разрезные ребра; 6 — 900-разрезные ребра; 7 — чередующиеся сферические выступы и углубления; 8 — внутренние спиральные канавки; 9 — сферические углубления и выступы на двух сторонах плоского канала (плотный контакт); 10 — предельная кривая поверхностного оребрения (А. Haasenritter, В. Weigand, Optimization of the rib structure inside 2D cooling channel); 11 — данные, полученные при моделировании.

#### Выводы и перспективы дальнейшего исследования

1. Обоснована возможность создания регенератора с эллиптической поверхностью нагрева с пониженным аэродинамическим сопротивлением для газотурбинных установок.

2. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование особенностей теплообмена в зависимости от шагов труб в пучке, а также экспериментального подтверждения полученных теоретических результатов.

#### Литература

1. Кузнецов В.В., Соломонок Д.Н. Проектирование теплообменных аппаратов для ГТУ сложных циклов // Вісник НТУ „ХПІ”. Збірник наук.праць. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2008.-№35. -С.78-88
2. Компрессорные станции ГТС Украины: Концепция модернизации газотурбинного привода газоперекачивающих агрегатов / Халатов А.А., Костенко Д.А., Парафейник В.П., Боцула А.Л., Билека Б.Д., Письменный А.С./ Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев. – 2009. – 52 с.
3. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб. – К.: Альтпрес, 2004. – 244 с.
4. Испытания опытного образца модуля воздушного охладителя / Терех А.М., Багрий П.И., Литвиненко Н.Н., Николаенко Ю.Е., Семеняко А.В. // Пром. Теплотехника, 2008, т.30, №2, С.13-20
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
6. Ala Hasan Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air/Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission./ P. 1-32.
7. Ala Hasan, Kai Siren Performance investigation of plain circular and oval tube evaporatively cooled heat exchangers// Applied Termal Engineering.- V.24.- № 5-6.- 2004.- P. 777-790.
8. Кузнецов В.В., Якимович А.В. Исследование теплообмена в пучках профилированных труб/ Восточно - Европейский журнал передовых технологий 4/6(40), 2009. – С.44–47
9. Мовчан С.Н., Бочкарев Ю.В., Соломонок Д.Н. Этапы развития стационарных и судовых ГТУ с регенерацией теплоты / Газотурбинные технологии, № 8, 2008, С. 8-11
10. Антупьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. – М-Л., «Энергия», 1966, 184 с.
11. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство / Под ред. проф. А.К. Любимова. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006. – 227 с.
12. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 181 с.
13. Теплообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков / Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В.// Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев, 2005. – 500 с.