

УДК 536.24
Я 45

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕГЕНЕРАТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

А. В. Якимович, асп.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрены особенности планирования численного эксперимента в рамках исследования газодинамических и теплообменных процессов в элементах профилированных поверхностей теплопередачи, выполненных из пучков эллиптических труб. Выполнено планирование полного факторного эксперимента, а также анализ факторов, влияющих на теплогидравлические характеристики теплопередающих поверхностей.

Ключевые слова: планирование, численный эксперимент, теплопередача, трубные пучки, эллиптические трубы, профилированные поверхности.

Анотація. Розглянуто особливості планування числового експерименту в рамках дослідження газодинамічних і теплообмінних процесів в елементах профільованих поверхонь теплопередачі, виконаних з пучків еліптичних труб. Виконано планування повного факторного експерименту, а також аналіз факторів впливу на теплогидравлічні параметри поверхонь теплообміну.

Ключові слова: планування, числовий експеримент, теплопередача, трубні пучки, еліптичні труби, профільовані поверхні.

Abstract. The specific features of the numerical experiment planning have been considered in the study of gas-dynamic and heat-transfer processes in the elements of the profiled heat transfer surfaces. These elements are made from the elliptical pipe bundles. The planning of the full factorial experiment and also the analysis of factors which influence the thermohydraulic characteristics of the heat transfer surfaces are carried out.

Keywords: planning, numerical experiment, heat transfer, pipe bundles, elliptical pipes, profiled surface.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При разработке и конструировании современного энергетического оборудования возникает необходимость решения задач исследования теплопередачи и гидродинамики в отдельных его элементах.

Характерным примером является изучение теплогидравлических процессов в теплообменных аппаратах газотурбинных установок сложных циклов. Так как подобное оборудование является не только наиболее материалоемким элементом, но также оказывает определяющее влияние на работу всей энергоустановки, то остро стоит вопрос о повышении показателей его энергоэффективности и компактности [4, 5, 12, 13].

Объектом исследования, рассматриваемым в работе, являются теплогидравлические процессы в элементах рабочих каналов, выполненных из труб эллиптического профиля, из которых формируются теплообменные поверхности регенераторов ГТУ.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Основываясь на анализе существующих и перспективных конструкций теплообменных поверхностей [5, 10], ввиду недостаточности данных относительно теплогидравлической эффективности пучков эллиптических труб в ранее неизученном диапазоне

продольных и поперечных шагов [2, 8], а также параметров и скоростей рабочих тел типичных для регенераторов современных газотурбинных установок сложных циклов [11, 12], можно сделать вывод о наличии необходимости постановки и планирования соответствующего эксперимента.

Математическая теория планирования эксперимента с помощью составления экономных экспериментальных планов позволяет извлекать наибольшее количество информации об объекте, о способах проведения эксперимента, обработки экспериментальных данных, использовании полученных результатов для оптимизации исследуемых объектов [1, 9]. Математический аппарат теории планирования эксперимента построен на сочетании методов математической статистики и методов решения экстремальных задач [3].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – анализ и оценка влияния различных факторов на теплогидравлические характеристики элементов теплопередающих поверхностей с использованием методом планирования эксперимента, путем получения их регрессионных функций в рамках проведения численного эксперимента.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При решении задач совершенствования характеристик современного теплообменного оборудования

одним из перспективных направлений является применение методов численного эксперимента. Стоит отметить, что число возможных вариантов входящих параметров в рамках подобных теплотехнических экспериментов, как правило, очень велико. Следовательно, не всегда целесообразно или вообще возможно охватить весь диапазон экспериментального исследования, и в таком случае применение планирования эксперимента позволяет значительно его сократить.

Численный эксперимент проводился с использованием методов вычислительной гидродинамики на основе программного продукта ANSYS CFX.

Расчетная область для моделирования теплопередачи в условиях профилированной теплообменной поверхности регенератора газотурбинной установки представлена на рис. 1,а. Расчетная сетка, применяемая в рамках численного эксперимента, изображена на рис. 1,б.

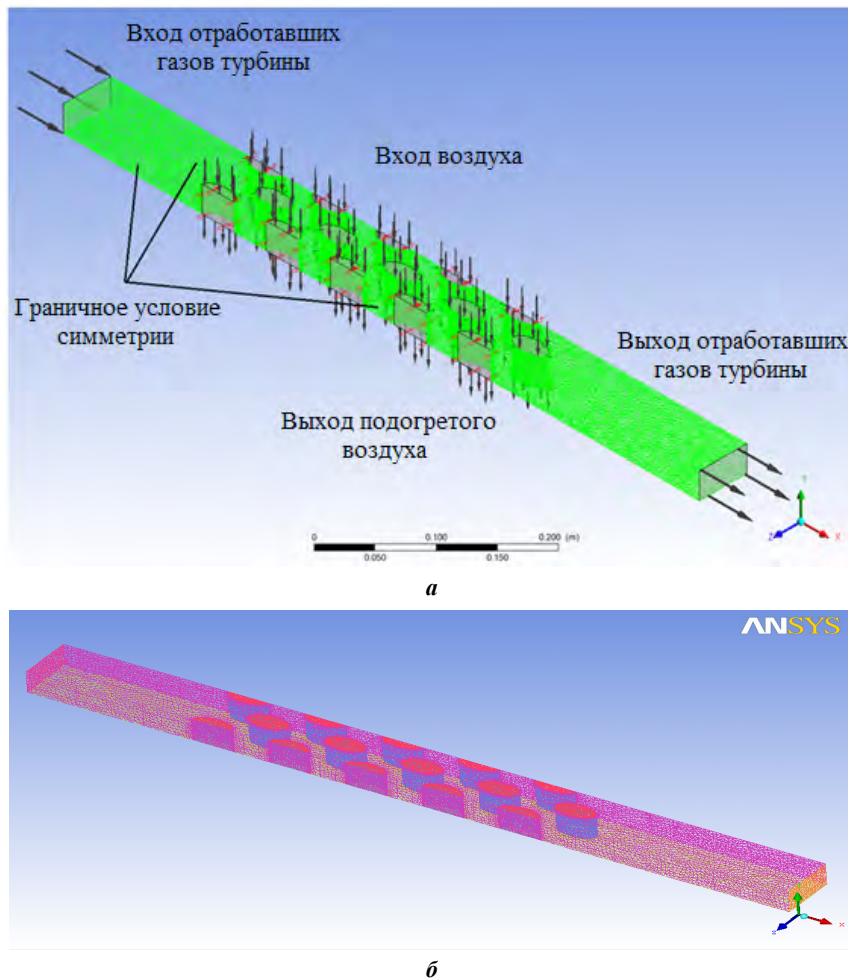


Рис. 1. Расчетная область (а) и сетка (б) для моделирования сопряженного теплообмена в пучке эллиптических труб

В качестве модели турбулентности была избрана модель напряжений Рейнольдса (RSM). Более подробно моделирование теплопередачи приведено в [7].

В общем случае зависимости для определения числа Нуссельта и Эйлера имеют вид:

$$Nu = C Re^{m_1} \sigma_1^{m_2} \sigma_2^{m_3} Pr^k, \quad (1)$$

$$Eu = D Re^{m_1} \sigma_1^{m_2} \sigma_2^{m_3}, \quad (2)$$

где Re – критерий Рейнольдса в расчетной области; σ_1 – относительный поперечный шаг в трубном пучке; σ_2 – относительный продольный шаг в трубном пучке; Pr – критерий Прандтля в расчетной области.

Применив метод логарифмирования для (1, 2), получим:

$$\lg Nu = \lg C + n_1 \lg Re + n_2 \lg \sigma_1 + n_3 \lg \sigma_2 + k \lg Pr; \quad (3)$$

$$\lg Eu = \lg D + m_1 \lg Re + m_2 \lg \sigma_1 + m_3 \lg \sigma_2. \quad (4)$$

Зависимости (3, 4) являются линейными.

В рамках численного эксперимента по изучению теплообмена и газодинамики профилированных поверхностей теплопередачи, выполненных из пучков эллиптических труб, в качестве выходных параметров (откликов) y_i были избраны логарифмические значения безразмерных критериев подобия $\lg Nu$

и $\lg Eu$ для потока теплоносителя в межтрубном пространстве пучка.

В качестве входных значений (факторов) определены логарифмические значения числа Рейнольдса для теплоносителя в межтрубном пространстве (x_1), а также логарифмы относительных продольных и поперечных шагов в трубном пучке.

Входные значения температур теплоносителей в расчетной области были постоянными, поэтому влияние критерия Прандтля не рассматривалось.

С целью получения максимально полной информации об изучаемых зависимостях использован *полный факторный эксперимент* (ПФЭ) [9]. При составлении плана ПФЭ первым этапом с целью приведения к формализованному виду и уменьшения количества уровней варьирования факторов применяется их кодирование, осуществляемое согласно формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\Delta\tilde{x}_i}, \tag{5}$$

где x_i – кодированное значение фактора; \tilde{x}_i – натуральное значение фактора; \tilde{x}_{i0} – натуральное значение основного уровня фактора; $\Delta\tilde{x}_i$ – интервал

варьирования. Их значения в рамках эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни факторов

Факторы	$\lg Re (x_1)$	$\lg \sigma_1 (x_2)$	$\lg \sigma_2 (x_3)$
Основной уровень	3,849	1,449	1,564
Интервал варьирования	0,353	0,062	0,059
Верхний уровень	4,202	1,511	1,623
Нижний уровень	3,496	1,387	1,505

В результате кодирования факторов диапазон эксперимента сводится к ПФЭ типа 2^3 с учетом эффектов взаимодействия. Его линейная регрессионная модель имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \tag{6}$$

Расширенная матрица планирования для ПФЭ типа 2^3 приведена в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Матрица ПФЭ для теплоотдачи в межтрубном пространстве

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_2x_3	x_1x_3	$x_1x_2x_3$	$y_{\text{exp}} (\lg Nu)$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	1,950
2	+	+	-	-	-	+	-	+	2,337
3	+	-	+	-	-	-	+	+	1,759
4	+	+	+	-	+	-	-	-	2,208
5	+	-	-	+	+	-	-	+	2,136
6	+	+	-	+	-	-	+	-	2,352
7	+	-	+	+	-	+	-	-	1,654
8	+	+	+	+	+	+	+	+	2,037

Таблица 3. Матрица ПФЭ для логарифмического значения критерия Эйлера в межтрубном пространстве

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_2x_3	x_1x_3	$x_1x_2x_3$	$y_{\text{exp}} (\lg Eu)$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,895
2	+	+	-	-	-	+	-	+	1,970
3	+	-	+	-	-	-	+	+	0,436
4	+	+	+	-	+	-	-	-	1,460
5	+	-	-	+	+	-	-	+	1,103
6	+	+	-	+	-	-	+	-	2,210
7	+	-	+	+	-	+	-	-	0,253
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,232

Коэффициент уравнения регрессии b_j определяется скалярным произведением столбца y_j на соответствующий столбец x_{ij} , отнесенным к числу опытов в матрице планирования N :

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i. \tag{7}$$

Эффекты взаимодействия определяются аналогично линейным эффектам.

Уравнения регрессии, полученные при проведении планирования численного теплотехнического эксперимента, имеют следующий вид:

$$\lg Nu = 2,054 + 0,179x_1 - 0,139x_2 - 0,009x_3 + 0,029x_1x_2 - 0,03x_1x_3 - 0,06x_2x_3 + 0,013x_1x_2x_3; \tag{8}$$

$$\lg Eu = 1,195 + 0,523x_1 - 0,35x_2 + 0,005x_3 - 0,022x_1x_2 - 0,001x_1x_3 - 0,108x_2x_3 - 0,01x_1x_2x_3. \tag{9}$$

Дальнейшим этапом являлась оценка значимости отдельных коэффициентов. Для этого можно воспользоваться критерием Стьюдента. С его помощью определяется доверительный интервал численного эксперимента. Если абсолютное значение коэффициентов регрессии больше значения доверительного интервала, то все они значимые. Для проведенного

численного теплотехнического эксперимента доверительные интервалы Δt_i составили соответственно 0,00372 для $\lg Nu$ и 0,00359 для $\lg Eu$. Проверка адекватности модели выполнена при помощи проведения серии дополнительных экспериментов в области, близкой к центру плана, путем сравнения полученных данных с расчетными. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты дополнительных опытов в центре плана

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	$y_{расч}$	$y_{экс}$	$\Delta, \%$
1	0,6	0	0	2,2011	2,2206	0,88
2	0	0	0	2,1433	2,1204	-1,07
3	0	0	-0,5	2,1163	2,1281	0,56

Как можно заметить, значение отклонения коэффициента теплоотдачи, полученное экспериментальным путем и с помощью регрессионной модели, составило не более 3 %, что позволяет говорить о допустимости использования линейной модели. Аналогичная ситуация и в случае с определением величины потерь давления, где отклонение составило не более 2 %.

ПФЭ позволяет количественно оценить все линейные эффекты факторов и их взаимодействия.

Так, чем больше абсолютное значение коэффициента, тем более весомым оказывается соответствующий фактор. Знак при нем указывает направленность влияния на функцию отклика. Взаимодействие возникает в том случае, если эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор.

Влияния факторов и их взаимодействий наглядно представлены в виде диаграмм (рис. 2).

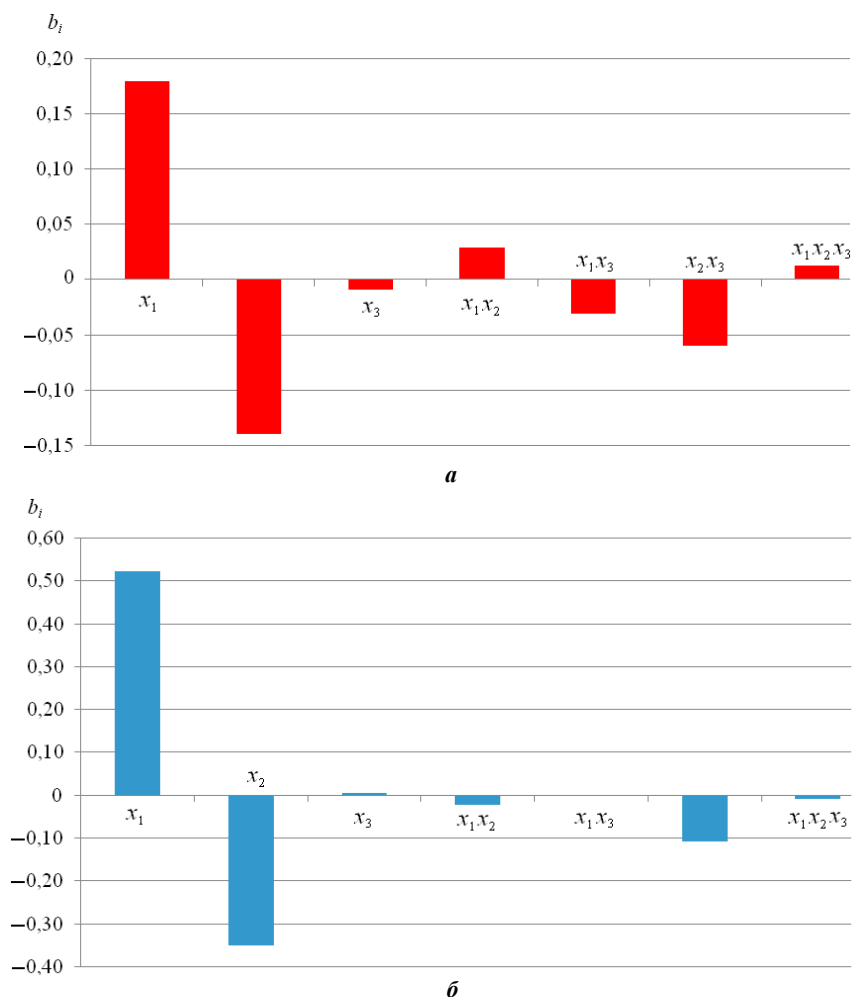


Рис. 2. Относительная величина влияния факторов и их взаимодействий на: **a** – теплоотдачу профилированной поверхности теплообмена; **б** – величину числа Eu в профилированной поверхности теплообмена

Полученные регрессионные модели в дальнейшем при проведении серии дополнительных экспериментов дают возможность определить область оптимизации показателей теплоотдачи и потерь давления для профилированных поверхностей теплопередачи.

ВЫВОДЫ

1. Анализ коэффициентов регрессионной функции для теплоотдачи профилированной поверхности теплопередачи, выполненной из эллиптических трубных пучков в рамках ПФЭ типа 2^3 , показал, что наибольшим весом среди факторов, влияющих на теплоотдачу, обладает число Рейнольдса (39 %) и поперечный шаг в трубном пучке (30 %), продольный же шаг обладает крайне малым влиянием (2 %). В то же время наблюдается эффект взаимодействия факторов поперечного и продольного шага в трубном

пучке (13 %). Незначительное влияние оказывают взаимодействие скорости потока, продольного и поперечного шага пучка (менее 6 %).

2. Среди факторов, определяющих величину числа Эйлера в рабочем канале, весовая значимость скорости потока и поперечного шага составляет 51 % и 34 % соответственно, за исключением того факта, что взаимодействие фактора скорости и поперечного шага имеет менее значительное влияние (10 %). Вклад остальных факторов и их взаимодействий составил менее 2 %.

3. Проведение полного факторного планирования численного эксперимента позволило уточнить влияние отдельных факторов и обосновать возможность их использования в критериальных уравнениях, определяющих теплогидравлические характеристики поверхностей теплопередачи, выполненных из пучков эллиптических труб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 290 с.
- [2] **Антуфьев, В. М.** Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева [Текст] / В. М. Антуфьев. – М. : Энергия, 1966. – 184 с.
- [3] **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 612 с.
- [4] Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики» [Текст] / Б. Є. Патон, А. А. Халатов, Д. А. Костенко, Б. Д. Білека, О. С. Письменний, А. Л. Боцула, В. П. Парафійник, В. І. Коняхін // Вісник НАН України. – 2008. – № 4. – С. 3–9.
- [5] **Кузнецов, В. В.** Оптимизация массогабаритных показателей регенераторов ГТУ [Текст] / В. В. Кузнецов, Д. Н. Соломонюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – 4/6(40). – С. 48–52.
- [6] **Кузнецов, В. В.** Интенсификация процессов на поверхности трубчатых теплообменных аппаратов [Текст] / В. В. Кузнецов, А. В. Якимович // Насосы. Турбины. Системы. – 2012. – № 3(4). – С. 38–43.
- [7] **Кузнецов, В. В.** Исследование сопряженного теплообмена в элементах турбинных установок [Текст] / В. В. Кузнецов, А. В. Якимович // Насосы. Турбины. Системы. – 2013. – № 3(8). – С. 71–79.
- [8] **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст] : справочное пособие / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
- [9] **Новик, Ф. С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.
- [10] **Письменный, Е. Н.** Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб [Текст] / Е. Н. Письменный. – К. : Альтпрес, 2004. – 244 с.
- [11] **Романов, В. И.** Газотурбинный двигатель для газовой промышленности [Текст] / В. И. Романов, О. С. Кучеренко // Территория Нефтегаз. – 2007. – № 8. – С. 92–95.
- [12] **Сударев, А. В.** Оценка и анализ технических требований к газотурбинным приводам ГПА газотранспортной системы Украины [Текст] / А. В. Сударев, А. А. Халатов, Б. В. Сударев // Газовая промышленность. – 2010. – № 6. – С. 42–47.
- [13] **Халатов, А. А.** Газотурбинные двигатели для газотранспортной системы: проблемы и перспективы [Текст] / А. А. Халатов, Д. А. Костенко, Ю. А. Дашевский, А. С. Кулинич // Насосы. Турбины. Системы. – 2013. – № 3(8). – С. 71–79.

© А. В. Якимович

Надійшла до редколегії 03.06.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. М. Р. Ткач