

УДК 532.526.4

## УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА\*

А. А. Зуев, М. И. Толстопятов, Д. А. Жуйков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: dla2011@inbox.ru

*Цель работы – разработка установки, позволяющей проводить экспериментальные исследования процессов вынужденного конвективного теплообмена, а именно: определение средних по поверхности коэффициентов теплоотдачи при реализации вращательного течения рабочего тела. В работе обозначены особенности протекающих процессов и требования к экспериментальной установке. Результаты работы позволят проводить экспериментальные исследования теплоотдачи вращательных течений на различных режимах течения рабочего тела и экспериментально определять коэффициенты теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах обтекания. В результате проведенной работы спроектирован теплообменный аппарат круглой формы, состоящий из двух полостей объединенных теплопроводящей стенкой.*

*Ключевые слова: турбулентное течение, экспериментальное исследование, коэффициент теплоотдачи, теплообменный аппарат.*

## INSTALLATION FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF CONVECTIVE HEAT OF THE ROTATIONAL GAS FLOW

A. A. Zuev, M. I. Tolstopyatov, D. A. Zhuikov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: dla2011@inbox.ru

*The purpose of the article is to develop such an installation which will allow to perform the experimental investigations of forced convective heat transfer, namely the definition of average surface heat transfer coefficients in the implementation of rotational flow of the working fluid. In the article the authors point out the features of the processes and requirements for the experimental installation. The scientific results will allow to perform experimental investigations of heat transfer rotational flows at different flow modes the working fluid and determine coefficient of convective heat transfer in laminar and turbulent flow modes. As a result of the work, the circular heat exchanger was designed. It consists of two cavities of the combined heat-conducting wall.*

*Keywords: turbulent flow, experimental research, the coefficient of convective heat transfer, heat exchanger.*

Вращательные или закрученные потоки часто встречаются в энергетических установках различного назначения. Широкая классификация закрученных потоков встречается в энергетических установках летательных аппаратов, это обусловлено интенсивностью протекающих динамических и тепловых процессов. Закрутка потока используется для интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Первым теплообменным аппаратом, разработанным НПО Энергомаш для ЖРД, можно считать кожухотрубчатый теплообменный аппарат, созданный в 1954–1957 гг. для многокамерного кислородно-керосинового двигателя РД107. На базе двигателя РД107 было разработано более 10 модификаций, что говорит о его долговечности

по сравнению с другими двигателями, и он продолжает активно использоваться по сегодняшний день [1]. Теплообменные аппараты в ЖРД служат для нагрева и испарения одного из компонентов топлива, который затем используется для наддува баков ракеты-носителя. Среди современных двигателей, применяющих теплообменные аппараты, следует отметить РД171, РД170 и РД180 [2]. Семейство этих двигателей работает по схеме с дожиганием газогенераторного газа, и использует теплообменный аппарат цилиндрического типа. Вращательное течение также характерно: для подводных и отводящих устройств газовых турбин и насосов; полостей между ротором и статором турбин; торцевых щелей между диском и корпусом осевого насоса; полости гидродинамических уплотнений.

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1584.

Гидродинамика вращательных течений в различных граничных условиях подробно изучена в работе [3], и подтверждена экспериментальными исследованиями [4], однако в этих работах не затронуты вопросы расчета конвективного теплообмена. На основе подхода, изложенного в работе [5], записаны основные уравнения алгоритма для моделирования потенциального вращательного течения газа с учетом конвективного теплообмена, куда входят:

1. Уравнение константы  $C_U$  определения окружной составляющей скорости ядра потока:

$$\frac{dC_U}{dR} = -\frac{2\pi\tau_\alpha R^2}{\rho\dot{V}}; \quad (1)$$

2. Уравнение определения изменения статического давления:

$$\frac{dp}{dR} = \rho\omega_\alpha^2 R + \frac{\rho\dot{V}^2}{4\pi^2 z^2 R^3} + \frac{\mp 2\tau_\alpha - 2\tau_p}{z}; \quad (2)$$

3. Уравнение энергии:

$$h = Cp(T + 273) + \frac{C^2}{2} - \frac{Q}{\dot{m}} + \frac{N}{\dot{m}}; \quad (3)$$

4. Уравнение теплового потока:

$$dQ = kFdT, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи; здесь

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_l}} \quad (5)$$

5. Уравнение состояния:

$$pv = RT. \quad (6)$$

Отметим, что в систему уравнений входят два уравнения движения рабочего тела для потенциального вращательного течения (1) и (2), уравнение энергии (3) и вся система замыкается уравнением состояния рабочего тела (6). Для решения уравнения энергии необходимо решить уравнение теплового потока (4) и определить диссипацию энергии. Для достоверного моделирования вращательных течений с учетом конвективного теплообмена необходимо определять ко-

эффициент теплоотдачи для вращательных потенциальных течений, входящих в выражение для определения коэффициента теплопередачи (5). В работах [6; 7] подробно рассмотрена теория расчета вращательных течений газов, приведены зависимости для оценки локальных коэффициентов теплоотдачи при турбулентном и ламинарном режимах течения как вращательных, так и прямолинейных потоков.

Для верификации полученных теоретических зависимостей и проведения экспериментальных исследований вращательного потенциального потока, с учетом теплоотдачи, разработана экспериментальная установка (рис. 1).

Экспериментальная установка представляет собой теплообменный аппарат круглой формы с тангенциальным подводом рабочего тела (воздуха), и имеет две полости для течения рабочего тела и охлаждающей жидкости, разделенных теплопроводящей стенкой. Полость II – полость течения рабочего тела, полость I – полость течения охлаждающей жидкости. Форма круга дает большее значение площади теплообмена при заданном периметре.

Для обеспечения закрутки и вращательного движения газового потока в полости II (рис. 2), используется тангенциальный подвод рабочего тела. В полости II реализуется вращательное потенциальное течение, распределение окружной составляющей скорости рабочего тела по радиусу описывается выражением  $UR = C = \text{const}$  (рис. 2).

В полость II через коллектор осуществляется кольцевой подвод охлаждающей жидкости, отвод через центр. Для обеспечения прямолинейного равномерного течения охлаждающей жидкости в полости установлены четыре перегородки (рис. 3). Рабочие параметры: массовый расход рабочего тела и охлаждающей жидкости, температуры на входе и выходе из теплообменного аппарата контролируются контрольно-измерительным оборудованием экспериментального стенда. Для упрощения дальнейшей обработки экспериментальных данных массовый расход охлаждающей жидкости рассчитан таким образом, чтобы реализующиеся течение охлаждающей жидкости по всей длине полости I имело ламинарный режим.

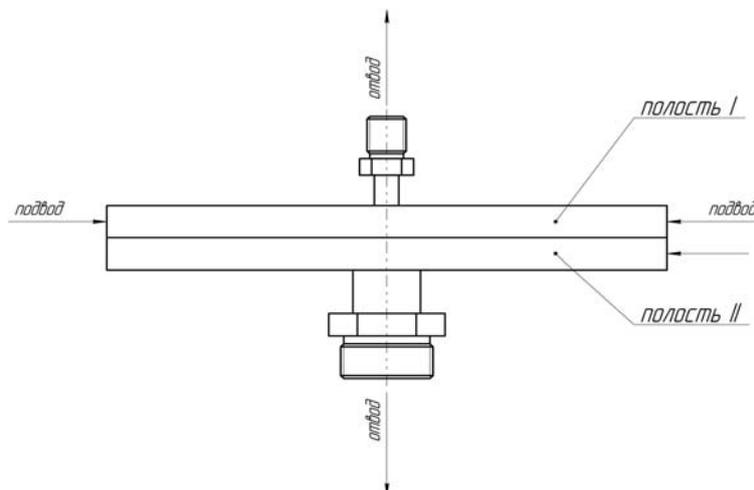


Рис. 1. Принципиальная схема установки

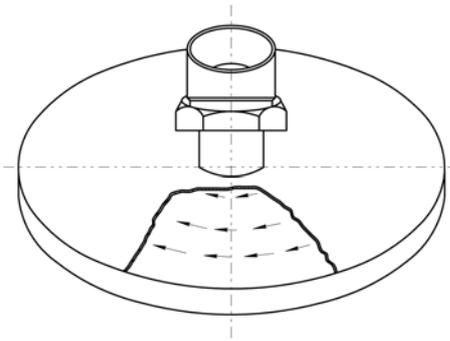


Рис. 2. Схема течения рабочего тела в полости II

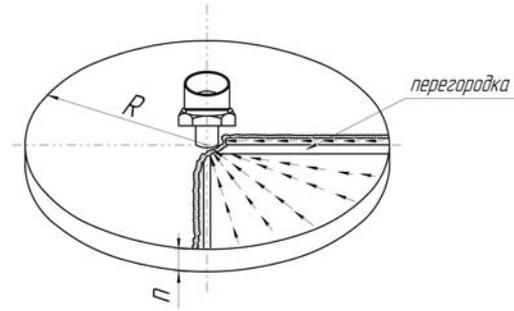


Рис. 3. Схема течения охлаждающей жидкости в полости I

Задача экспериментального исследования состоит в определении среднего по поверхности теплообмена коэффициента теплоотдачи рабочего тела, с учетом реализации в исследуемой полости потенциального вращательного течения, при известной поверхности теплообмена и материала теплопроводящей стенки. Локальный и средний коэффициенты теплоотдачи от теплопроводящей стенки к воде при постоянном тепловом потоке определяют по выражению [8]

$$Nu_x = 0,46 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

$$\overline{Nu} = 0,69 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25} \quad (8)$$

где  $x$  – продольная координата, в данном случае  $x = r$  – текущий радиус теплопроводящей стенки;  $Pr_{st}$  – критерий Прандтля для охлаждающей жидкости при температуре стенки. Выражения (7) и (8) используются при продольном обтекании пластины ламинарным потоком жидкости.

Основной сложностью при определении среднего коэффициента теплоотдачи рабочего тела к стенке теплообменного аппарата является достоверный расчет коэффициента теплоотдачи от стенки к охлаждающей жидкости. Данная сложность обусловлена круглой формой теплообменного аппарата. Массовый расход охлаждающей жидкости постоянен, а площадь проходного сечения полости изменяется с радиусом, за счет этого фактора происходит увеличение скорости потока и числа Рейнольдса.

Использование теплообменника в качестве установки при проведении экспериментальных исследований позволяет исключить измерение температуры теплопроводящей стенки, что существенно упрощает проведение эксперимента и обработку экспериментальных данных. Для контроля теплового баланса в экспериментальном участке за счет контрольно-измерительного оборудования экспериментально стенда производится замер температур рабочего тела и охлаждающей жидкости на входе и выходе. Количество тепла, переданного от рабочего тела в экспериментальной установке, находят по выражению

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot Cp_g \cdot (T_{g1} - T_{g2}).$$

Для контроля теплового баланса определяется количество тепла, полученного охлаждающей жидкостью:

$$Q_l = \dot{m}_l \cdot Cp_l \cdot (T_{l2} - T_{l1}),$$

где  $Cp_l$  и  $Cp_g$  – среднее значение теплоемкостей охлаждающей жидкости и рабочего тела;  $\dot{m}_l$  и  $\dot{m}_g$  – массовые расходы, с. Причем должно выполняться равенство:

$$Q_g \geq Q_l.$$

Невыполнение равенства может говорить о неверно проведенном замере показаний при проведении эксперимента, либо о выходе из строя одного или нескольких компонентов системы контрольно-измерительного оборудования. Относительно компактные размеры установки позволяют использовать теплоизоляцию при проведении исследований, и свести утечки тепла в окружающую среду к минимальным значениям.

В результате проведенной работы спроектирована установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования вращательных потенциальных течений на различных режимах течения рабочего тела. Проведение исследований позволит провести сравнительный анализ полученных теоретических зависимостей и экспериментально определенных средних по поверхности теплообмена коэффициентов теплоотдачи рабочего тела. Основные геометрические размеры установки приведены в таблице:

Радиус полостей I и II	$R$	100 мм
Ширина полостей I и II	$n$	8 мм
Диаметр штуцера подвода рабочего тела	$d_1$	4 мм
Диаметр штуцера отвода рабочего тела	$d_2$	40 мм
Максимальная площадь проходного сечения полости I	$f_1$	$5,024 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
Минимальная площадь проходного сечения полости I	$f_2$	$0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
Толщина теплопроводящей стенки	$\delta$	1 мм
Площадь поверхности теплообмена	$S$	$0,628 \text{ м}^2$

#### Библиографические ссылки

1. Громько М. Б., Клюева О. Г. Совершенствованные теплообменники для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 1. Кожухотрубчатый испаритель азота

двигателя РД107 // Тр. XXIV / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. М. : НПО Энергомаш, 2006.

2. Клюева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 // Тр. XXIV / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. М. : НПО Энергомаш, 2006.

3. Кишкин А. А., Краев М. В., Жуйков Д. А. Течение несжимаемой вязкой жидкости в зазоре конической щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой // Известия вузов. 2002. № 3. С. 76–80. (Сер. Авиационная техника.)

4. Экспериментальные исследования течения несжимаемой жидкости вязкой жидкости в торцевой щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой / Д. А. Жуйков, В. О. Фальков, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5 (45). С. 123–126.

5. Течение с теплоотдачей в полостях вращения энергетических установок космических и летательных аппаратов / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, Д. А. Жуйков, М. И. Толстопятов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 7 (40). С. 63–68.

6. Теплоотдача вращательных течений в турбомашинах на основе двухслойной модели турбулентного пограничного слоя / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, М. И. Толстопятов, Д. А. Жуйков // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5 (45). С. 127–129.

7. Прямолинейное равномерное течение газов с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов / М. И. Толстопятов, А. А. Зуев, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4 (44). С. 134–138.

8. Теплотехнический справочник / под ред. В. Н. Юринева, П. Д. Лебедева. М. : Энергия, 1976. Т. 2.

#### References

1. Gromyko M. B., Klyueva O. G. *Trudy XXIV*. Moscow, NPO Energomash, 2006, pp. 246–255.

2. Klyueva O. G. *Trudy XXIV*. Moscow, NPO Energomash, 2006, pp. 256–271.

3. Kishkin A. A., Kraev M. V., Zhuikov D. A. *Izvestiya vuzov, seriya Aviacionnaya tehnika*. 2002, № 3, pp. 76–80.

4. Zhuikov D. A., Falkov V. O., Kishkin A. A., Zuev A. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 5(45), pp. 123–126.

5. A.A. Zuev, A.A. Kishkin, D.A. Zhuikov, M.I. Tolstopyatov. *Vestnik SibGAU* 2011, № 7 (40), pp 63–66

6. Zuev A. A., Kishkin A. A., Tolstopyatov M. I., Zhuikov D. A. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 5 (45), pp. 127–129.

7. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 4 (44), pp. 134–138.

8. *Teplotehnicheckiy spravochnik* (Heat Engineering handbook). Moscow, Energy, 1976, Vol. 2, 896 p.

© Зуев А. А., Толстопятов М. И., Жуйков Д. А., 2013

УДК 004.896(06)

### АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ В ПЕЧАХ ВАНИЮКОВА

Е. В. Костин

Норильский индустриальный институт  
Россия, 663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: kostinev87@gmail.com

*Представлен подход построения алгоритмического обеспечения сложной технологической системы на примере процесса плавки в печах Ванюкова. Предложен способ управления качеством конечных продуктов посредством комбинированного использования нейросетевых моделей процесса и модификации алгоритма динамического программирования Беллмана.*

*Ключевые слова: печь Ванюкова, самоорганизующаяся сеть Кохонена, нейросетевая модель, динамическое программирование Беллмана.*

### ALGORITHMIC SUPPORT OF PRODUCTS QUALITY CONTROL IN MELTING FURNACES OF VANUKOV

E. V. Kostin

Norilsk Industrial Institute  
7 50 years of October st., Norilsk, 663310, Russia. E-mail: kostinev87@gmail.com

*This paper presents an approach to the construction of algorithmic support of complex technological systems on the example of the melting furnaces of Vanukov. The author offers a method for controlling the quality of final products through the combined use of neural network models of the process and modification of the dynamic programming algorithm of Bellman.*

*Keywords: furnace of Vanukov, Kohonen self-organizing network, neural network model, dynamic programming Bellman.*