

УДК 621.1.016+532.526

В.Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, А.В. Чукалин, Л.В. Хахалева

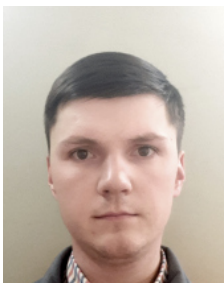
## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ<sup>1</sup>



**Ковальногов Владислав Николаевич**, доктор технических наук, окончил Казанский государственный университет, заведующий кафедрой «Тепловая и топливная энергетика» Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ). Имеет статьи, монографии и изобретения в области моделирования, исследования и оптимизации тепловых и гидрогазодинамических процессов в энергоустановках и технологическом оборудовании. [e-mail: kvn@ulstu.ru].



**Федоров Руслан Владимирович**, кандидат технических наук, окончил УлГТУ, доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика» УлГТУ. Имеет статьи и изобретения в области численного моделирования гидрогазодинамических процессов. [e-mail: r.fedorov@ulstu.ru].



**Чукалин Андрей Валентинович**, кандидат технических наук, окончил УлГТУ, младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела департамента научных исследований и инноваций УлГТУ. Имеет статьи и изобретения в области численного моделирования гидрогазодинамических процессов. [e-mail: chukalin.andrej@mail.ru].



**Хахалева Лариса Валерьевна**, кандидат технических наук, окончила УлГТУ, доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика» УлГТУ. Имеет статьи и изобретения в области численного моделирования гидрогазодинамических процессов. [e-mail: larvall@mail.ru].

### Аннотация

Основопологающим средством изучения сложных газодинамических процессов, протекающих в нестационарных условиях, является математическое моделирование, позволяющее с достоверной точностью проводить комплексные исследования и отработку технических решений. Перспективным направлением исследований является поиск и отработка методов управления пограничным слоем газовых потоков, позволяющие интенсифицировать или редуцировать обменные процессы в пограничном слое энергетических установок, применяемых в разных областях промышленности нашей страны, таких как: энергетика, авиастроение, судостроение. Современным и эффективным методом управления является метод, основанный на применении демпфирующей поверхности. Воздействие

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Стипендии Президента РФ по проекту № СП-2069.2018.1.

демпфирующей поверхности выражается в снижении интенсивности генерации турбулентных вихрей, что в свою очередь приводит к увеличению скорости в пограничном слое, снижению сопротивления трения и теплообмена. Исследование и развитие технологии позволит разработать технические решения для эффективной и ресурсосберегающей энергетики. В работе рассматривается метод моделирования турбулентного пограничного слоя, позволяющий учитывать воздействие демпфирующей поверхности на обменные процессы, протекающие в пограничном слое газового потока. Также в работе представлены результаты комплексного термоанемометрического исследования пограничного слоя газового потока на демпфирующей поверхности. Эксперимент проведён с применением сертифицированного оборудования в аэродинамической трубе и направлен на развитие теории, а также верификации программного комплекса, в котором реализован метод моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование, численное исследование, пограничный слой, турбулентность, ламинаризация, демпфирующая поверхность, теплообмен.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-2-60-46-52

## MATHEMATICAL MODELING OF EXCHANGE PROCESSES IN THE TURBULENT BOUNDARY LAYER. MODEL ANALYSIS AND VERIFICATION

**Vladislav Nikolaevich Kovalnogov**, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Kazan State University; Head of the Department of Heat-and-Power Engineering of Ulyanovsk State Technical University (UISTU); an author of articles, monographs, and inventions in the field of simulation, research, and optimization of thermal and gas-dynamic processes in power installations and processing equipment. e-mail: kvn@ulstu.ru.

**Ruslan Vladimirovich Fedorov**, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Heat-and-Power Engineering of UISTU; an author of articles and inventions in the field of numerical modeling the hydro-gas-dynamic processes. e-mail: r.fedorov@ulstu.ru.

**Andrei Valentinovich Chukalin**, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Junior Scientist of the Scientific Research Office of the Department for Research Activities and Innovations at UISTU; an author of articles and inventions in the field of numerical modeling the hydro-gas-dynamic processes. e-mail: chukalin.andrej@mail.ru.

**Larisa Valerevna Khakhaleva**, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Heat-and-Power Engineering of UISTU; an author of articles and inventions in the field of numerical modeling the hydro-gas-dynamic processes. e-mail: larvall@mail.ru.

### Abstract

The fundamental tool for studying complex gas-dynamic processes occurring under non-stationary conditions is mathematical modeling, which allows reliable studies to carry out comprehensive research and development of technical solutions. A promising area of research is the search and development of methods for controlling the boundary layer of gas flows, which can intensify or reduce exchange processes in the boundary layer of power plants used in various industries of our country, such as: energy, aircraft manufacturing, shipbuilding. A modern and effective control method is a method based on the use of a damping surface. The impact of the damping surface is expressed in a decrease in the intensity of generation of turbulent vortices, which in turn leads to an increase in the velocity in the boundary layer and a decrease in the friction and heat transfer resistance. Research and development of technology will allow developing technical solutions for efficient and resource-saving energy. The paper considers a method for modeling a turbulent boundary layer, which allows one to take into account the effect of the damping surface on the metabolic processes occurring in the boundary layer of the gas stream. The paper also presents the results of a comprehensive hot-wires anemometric study of the boundary layer of a gas stream on a damping surface. The experiment was carried out using certified equipment in a wind tunnel and aimed at developing the theory and verifying the software package, in which the simulation method is implemented.

Key words: mathematical modeling, numerical research, boundary layer, turbulence, laminarization, damping surface, heat and mass transfer.

### ВВЕДЕНИЕ

Управление пограничным слоем на поверхности, обтекаемой высокоскоростными потоками газа, является

важной задачей в современной технике. Существует широкий спектр активных и пассивных способов управления течением, применяемых для уменьшения сопро-

тивления трения, теплообмена, турбулизации, главным образом в несжимаемых турбулентных пограничных слоях [1, 2]. Развитие науки и техники не стоит на месте, и в современных условиях, учитывая необходимость повышения эффективности оборудования, снижения энергоёмкости на производстве и выполнения ряда задач по модернизации энергетического комплекса, поставленных министерством энергетики, в проекте энергетической стратегии России на период до 2030 года [3], необходимо развивать новые и эффективные способы управления пограничным слоем для создания эффективной и ресурсосберегающей энергетики.

Математическое моделирование – это современный и эффективный метод исследования практически любых процессов, основанный на решении систем уравнений, которые описывают исследуемые процессы с заданной точностью. Получение важных научных результатов в короткий срок стало возможным благодаря появлению современных вычислительных машин, поэтому математический эксперимент часто называют машинным (или численным). В рассматриваемом случае для решения дифференциальных уравнений необходимо подобрать численный метод, сущность которого состоит в замене дифференциальных уравнений их алгебраическими зависимостями и последующем вычислении значений как локальных, так и интегральных. Замена происходит с использованием сетки, которую накладывают на область изменения переменных величин, и все производные, входящие в уравнения и граничные условия, заменяются алгебраическими зависимостями в узлах сетки [4]. Зачастую ограниченность наших знаний не позволяет создать точную математическую формулировку задач, в связи с этим обстоятельством система уравнений может быть незамкнутой. В результате разрабатываются различные гипотезы для замыкания системы уравнений, выполняется физический эксперимент, позволяющий сопоставить результаты для образования достоверных знаний [5].

В работе предложен метод математического моделирования турбулентного переноса на демпфирующей поверхности [1] (рис. 1). Метод позволяет исследовать воздействие демпфирующей поверхности на обменные

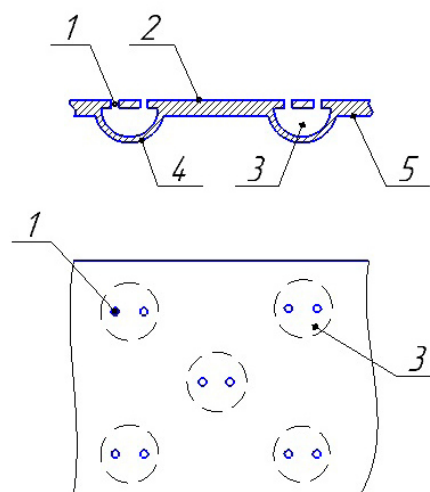


Рис. 1. Демпфирующая поверхность: 1 – перфорационные отверстия; 2 – внутренняя сторона демпфирующей поверхности; 3 – полусферические демпфирующие полости; 4 – полусферические выступы; 5 – внешняя стенка

процессы, протекающие в пограничном слое в диапазоне чисел Re от  $1 \cdot 10^5$  до  $4 \cdot 10^7$ . Метод моделирования, реализованный в программном комплексе [6], предназначен для работы на ПК с операционными системами Windows XP/7/8/10, код программы написан на языке программирования C++. Для верификации программного комплекса и развития теории проведено комплексное термоанемометрическое исследование пограничного слоя на внутренней стороне демпфирующей поверхности.

**МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА НА ДЕМПИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Для моделирования высокоскоростного пограничного слоя газов, таких как: воздух, азот, водород, углекислый газ, предложена система уравнений пограничного слоя, которая включает в себя дифференциальные уравнения [4, 7]:

– уравнение энергии:

$$\left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \rho c_p = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + u \frac{\partial p}{\partial x}; \tag{1}$$

– уравнение движения:

$$\left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \rho = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right]; \tag{2}$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \tag{3}$$

– уравнение состояния:

$$\rho = p / (RT), \tag{4}$$

где  $T$  – температура потока, К;

$u$  – скорость, м/с;

$x, y$  – продольная и поперечная координаты соответственно, м;

$v$  – поперечная составляющая скорости, м/с;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_p$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $\lambda_T$  – коэффициент турбулентного переноса теплоты, Вт/(м·К);  
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  
 $\mu_T$  – коэффициент турбулентного переноса количества движения, Па·с;  
 $p$  – давление потока, Па;  
 $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В основе предложенной системы уравнений лежат уравнения пограничного слоя, предложенные Л. Прандтлем, полученные им в ходе упрощения дифференциальных уравнений Навье-Стокса для второго предельного случая, а именно для условия малой вязкости и высокой скорости потока [8].

Основные параметры потока, характеризующие различные теплофизические свойства газов на поверхности, аппроксимированы функциями:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{NM}; \quad \frac{c_p}{c_{p0}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{NC}; \quad \frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{NL}. \quad (5)$$

Значения коэффициентов  $NM$ ,  $NC$ ,  $NL$ , характеризующих свойства газов, определяются согласно алгоритму, приведённому в работе [9].

Коэффициенты турбулентного переноса теплоты  $\lambda_T$  и количества движения  $\mu_T$  на поверхности, обтекаемой ламинарным, переходным и турбулентным пограничными слоями, определяются на основе модели пути смешения Прандтля аналогично тому, как это сделано в работе [4]. Подход к их определению выглядит следующим, представим  $\mu_T$  как:

$$\mu_T = \frac{\rho l^2 \partial u}{\partial y}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина пути смешения.

$$l = \alpha y \left\{ 1 - \exp\left[\frac{-\rho v_* y}{(26\mu)}\right] \right\}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, отражающий интенсивность турбулентного переноса количества движения;

$v_* = \sqrt{\tau_w / \rho_\infty}$  – динамическая скорость;  
 $\tau_w$  – касательное напряжение трения на поверхности стенки;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Отличие состоит в том, что коэффициент  $\alpha$ , характеризующий интенсивность турбулентного переноса количества движения, в модели пути смешения определяется зависимостью, учитывающей влияние полусферических демпфирующих полостей, содержащихся в демпфирующей поверхности, на интенсивность обменных процессов в пристенной зоне. Для исследования воздействия демпфирующей поверхности в широком

диапазоне числа  $Re$  предложено выражение, позволяющее определить интенсивность турбулентного переноса количества движения –  $\alpha$ , с учётом количественных и качественных характеристик.

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 - 8,4 \cdot 10^5 A_v^* \bar{f}^2 \exp(1-n)}}{1 + 21,4 \frac{u_\infty du_\infty / dx}{u_0 (du/dy)_{y=0}}}. \quad (8)$$

где  $A_v^*$  – коэффициент, характеризующий работу полусферических демпфирующих полостей; индекс  $v$  характеризует объём демпфирующей полости;

$\bar{f}$  – относительная площадь перфорации;

$n$  – количество перфорационных отверстий, приходящихся на каждую демпфирующую полость;

$u_\infty$  – скорость потока вне пограничного слоя (в ядре потока), м/с;

$x$  – продольная координата, м;

$u$  – скорость в заданной точке, м/с.

В ходе экспериментов установлено, что наибольшая эффективность полусферических демпфирующих полостей достигается при связи двух перфорационных отверстий, диаметр каждой равен 0,8 мм, но может варьироваться от 0,5 до 0,8 мм и является оптимальным, чтобы не вызывать дополнительные возмущения потока при сохранении эффективности воздействия.

Для достижения наибольшей эффективности относительная площадь перфорации поверхности должна составлять  $\bar{f} = 0,002 \pm 5\%$ , определяемая как:

$$\bar{f} = \frac{S_{\text{перф}}}{S_{\text{пов}}}. \quad (9)$$

где  $S_{\text{перф}}$  – общая площадь перфорации на поверхности;

$S_{\text{пов}}$  – общая площадь поверхности.

Увеличение площади перфорации поверхности и количества полусферических демпфирующих полостей не приведёт к повышению эффективности воздействия, но может способствовать значительному снижению прочности конструкции, особенно если конструкция будет теплонагруженной.

Система дифференциальных уравнений (1)–(4), описывающая турбулентный перенос на поверхности с полусферическими демпфирующими полостями, не поддаётся решению аналитическим методом. Поэтому её целесообразно привести к безразмерной форме, которая позволит применить численные методы решения с реализацией разностной схемы.

Анализируя разностные схемы по литературным источникам [7, 10, 11], определена наиболее оптимальная разностная схема, а именно: неявная шеститочечная разностная схема, имеющая 2-й порядок аппроксимации по пространственным переменным, её выбор был сделан исходя из условий необходимых затрат машинного времени и точности получаемых результа-

тов решения. Для рассматриваемой двумерной задачи применяется прямоугольная сетка (рис. 2). При использовании неявной разностной схемы значения функции в узлах сетки на каждом слое определяются решением системы алгебраических уравнений.

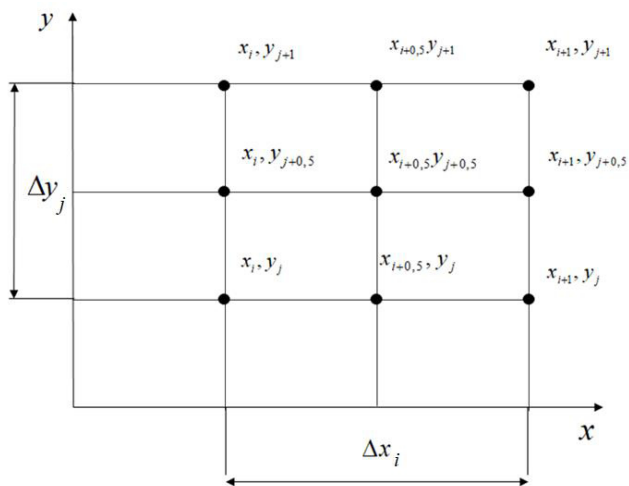


Рис. 2. Неявная шеститочечная разностная схема

Для составления разностной схемы на плоскости с координатами  $x$  и  $y$  выбираются основная и две вспомогательные сетки.

Основная сетка:

$$x_i = i\Delta x_i; y_j = j\Delta y_j. \quad (10)$$

Координаты вспомогательной сетки определяются как  $x_{i+0,5}$  и  $x_{i+0,5}, y_j$ :

$$\begin{aligned} y_{j+0,5} &= (j + 0,5)\Delta y_j; \\ x_{i+0,5} &= (i + 0,5)\Delta x_i; \\ y_j &= j\Delta y_j, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $i, j$  – целые числа (0, 1, 2, ...);  $\Delta x, \Delta y$  – шаги сетки вдоль соответствующих координат.

Для решения системы алгебраических уравнений используется метод прогонки, так как данный метод является наиболее удобным и экономичным с точки зрения затрат вычислительных ресурсов. Важным достоинством метода является то, что в процессе вычисления не происходит значительного накопления ошибок, связанных с округлением.

Метод моделирования турбулентного переноса и численный метод решения дифференциальных уравнений: метод конечных разностей или ещё его называют методом сеток [10], реализованы в программном комплексе [6]. Программный комплекс позволяет исследовать термогазодинамические процессы в пограничном слое при сложных газодинамических условиях на гладкой и демпфирующей поверхностях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа достоверности данных, производимых программным комплексом, включающим в себя метод моделирования турбулентного переноса на демпфирующей поверхности, проведены тестовые расчёты пограничного слоя воздушного потока на гладкой и демпфирующей поверхностях. Результаты сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в ходе термоанемометрического исследования пограничного слоя при идентичных условиях [12].

Условия эксперимента: исходя из особенностей аэродинамической трубы, а именно предвстроенного участка (общая длина участка  $l_{\text{общ}} = 3000$  мм, из них 2250 мм – это длина предвстроенного участка, необходимая для развития устойчивой турбулентности в пограничном слое, 750 мм – длина экспериментального участка), в программе указывалось число  $Re$ , зафиксированное в начальной точке экспериментального участка  $Re = 2,76 \cdot 10^6$ ; начальная скорость (скорость вне пограничного слоя)  $u_0 = 21,4$  м/с; объём полусферической полости  $V = 0,575$  см<sup>3</sup>; длина экспериментального участка  $l = 0,75$  м; температура потока  $T = 295$  К; относительная площадь перфорации  $\bar{f} = 0,002$ .

На рисунке 3 представлены профили скорости в пограничном слое, полученные из натурного и численного эксперимента для гладкой и демпфирующей поверхностей.

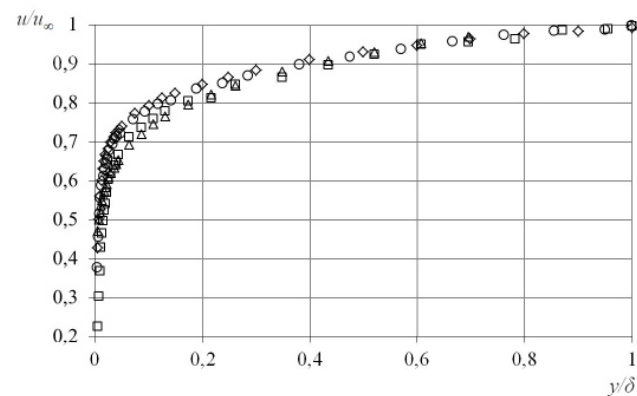


Рис. 3. Профиль скорости в пограничном слое для полостей объёмом  $V = 0,575$  см<sup>3</sup>: ■ – расчёт по предложенной методике для поверхности без полостей; ◆ – расчёт по предложенной методике, для поверхности с полусферическими демпфирующими полостями; ● – результаты натурного эксперимента для поверхности с демпфирующими полостями полусферической формы; ▲ – результат натурного эксперимента для поверхности без полостей

Взаимодействие воздушного потока с демпфирующей поверхностью приводит к ускорению потока, вызванному снижением интенсивности турбулентных пульсаций в пограничном слое за счёт частичного рассеивания энергии в полусферических демпфирующих полостях. Кроме того, на демпфирующей поверхности возможно снижение теплообмена и коэффициента сопротивления трения в пограничном слое, данный вопрос рассматривался в работе [7].

На рисунке 4 представлен профиль скорости, построенный в универсальных координатах ( $\varphi$ ,  $\eta$  – универсальные координаты: безразмерная скорость и безразмерная координата соответственно).

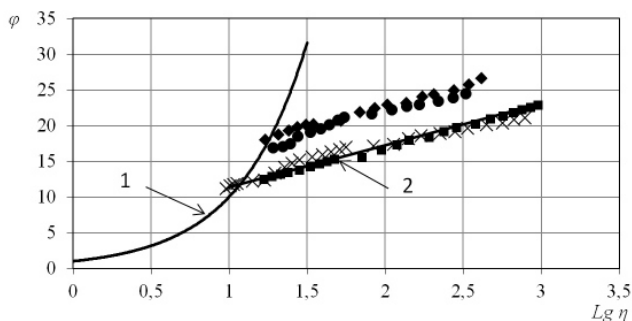


Рис. 4. Профиль скорости в универсальных координатах для полостей объёмом  $V = 0,575 \text{ см}^3$ : 1 – расчет по выражению  $\varphi = \eta$  для универсального профиля в вязком подслое турбулентного потока; 2 – расчет по выражению  $\varphi = 5,851 \lg \eta + 5,56$  для универсального профиля в турбулентном ядре; ■ – результаты натурального эксперимента для поверхности с демпфирующими полостями полусферической формы; ● – результат натурального эксперимента для поверхности без полостей

По результатам исследований можно отметить незначительное расхождение данных натурального эксперимента и данных, полученных в программном комплексе с реализованной в нём методикой моделирования турбулентного переноса, в размере  $\pm 2\%$ . Погрешность лежит в пределах доверительной вероятности и указывает на адекватность моделирования.

Фактическая высота пограничного слоя, определённая по результатам эксперимента для рассматриваемых условий, составляет 19 мм, скорость потока вне пограничного слоя составляет  $u = 21,4 \text{ м/с}$ . Применение демпфирующей поверхности позволяет увеличить скорость в вязком подслое на 9%, данный эффект сохраняется и вне вязкого подслоя, на высоте до 7 мм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Разработанный метод моделирования турбулентного переноса адекватно описывает воздействие демпфирующей поверхности в рассмотренных условиях. Программный комплекс с реализованным в нём методом моделирования турбулентного переноса позволит

исследовать пограничный слой на демпфирующей поверхности и реализовать научно-технические решения для эффективной и ресурсосберегающей энергетики. Применение демпфирующей поверхности позволяет на 9% увеличить скорость в вязком подслое и является показателем того, что данная технология является перспективной. Кроме того, за счёт возможного образования полусферических выступов на внешней стенке возможно интенсифицировать процесс теплоотдачи, что увеличит эффективность и область применения предлагаемой поверхности [13].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 186044 Российская Федерация: МПК F15D1/06 Демпфирующая поверхность / Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Чукалин А.В., Хахалева Л.В.; заявитель и патентообладатель Ульян. гос. тех. ун-т. № 2018131418; опубл. 27.12.2018, Бюл. № 36.
2. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Минэнерго России. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 18.05.2020).
4. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск: УЛГТУ, 1996. 246 с.
5. Леонтьев А.И., Исаев С.И., Кожин И.А. Теория теплообмена. М., 2017. 464 с.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019617909. Программный комплекс для исследования турбулентного переноса на поверхности с полусферическими демпфирующими полостями / Чукалин А.В., Федоров Р.В. (RU); правообладатель Ульян. гос. тех. ун-т. № 2019616789; заявл. 05.06.2019; опубл. 24.06.2019, Бюл. № 7. 28 Кб.
7. The mechanism and theoretical basis of the management of intensity of the heat transfer control through periodic influences on the turbulent boundary layer / V.N. Kovalnogov, R.V. Fedorov, L.V. Khakhaleva, A.V. Chukalin, A.A. Bondarenko, E.N. Kovrizhnykh // AIP Conference Proceedings, 1863, 560016 (2017).
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
9. Ковальногов Н.Н., Фокеева Е.В. Влияние природы газа на эффективность газодинамической температурной стратификации // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 67–69.
10. Теория и техника теплофизического эксперимента: учеб. пособие для инж.-физ. и энергомашинистов. спец. вузов / Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников, Н.С. Идиатуллин [и др.]; под ред. В. К. Щукина. М.: Энергоатомиздат, 1985. 360 с.
11. Якимов А.С. Математическое моделирование тепловой защиты и некоторых задач теплообмена. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. 214 с.

12. Экспериментальное исследование пограничного слоя на перфорированной поверхности с демпфирующими полостями / А.В. Чукалин, В.Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, А.А. Бондаренко, А.Н. Мирошин // Тр. седьмой Рос. нац. конф. по теплообмену. М. : Издат. дом МЭИ, 2018. Т. 2. С. 373–376.

13. Ильинков А.В., Ильинкова В.Г., Щукин А.В. Теплоотдача на полусферических выступках при различной плотности их расположения на стенке канала // ИВИЗ Авиационная техника. 2011. № 2. С. 43–47.

## REFERENCES

1. Russian Federation Patent 186044. МПК F15D1/06. Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Chukalin A.V., Khakhaleva L.V. *Dempfiruiushchaia poverkhnosti* [Damping Surfaces]. Applicant and Proprietor: Ulyanovsk State Technical University: 2018131418. Date of publication: December 27, 2018. Bull. no. 36.

2. Kornilov V.I. Problemy snizheniia turbulentnogo treniia aktivnymi i passivnymi metodami (obzor) [Reduction of Turbulent Friction by Active and Passive Methods (Review)]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2005, vol. 12, no. 2, pp. 183–208.

3. *Energeticheskaia strategiiia Rossii na period do 2030 goda. Minenergo Rossii* [Energy Strategy of Russia for the Period of 2030 Year. Ministry of Energy]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 18.05.2020).

4. Kovalnogov N.N. *Pogranichnyi sloi v potokakh s intensivnymi vozdeistviiami* [Boundary Layer in Flows with Intensive Interactions]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 1996. 246 p.

5. Leontev A.I., Isaev S.I., Kozhinov I.A. *Teoriia teplomassoobmena* [Theory of Heat and Mass Transfer]. Moscow, 2017. 464 p.

6. Chukalin A.V., Fedorov R.V. (RU) *Programmnyi kompleks dlia issledovaniia turbulentnogo perenosa na poverkhnosti s polusfericheskimi dempfiruiushchimi polostiami* Svidetelstvo o registratsii programmy dlia EVM no. 2019617909 [Software Complex for Researching the Turbulent Transfer on a Surface with Semispherical Damping Cavities. Certificate of State Registration RF for Computer Program no. 2019617909]. Rightholder: Ulyanovsk State Technical Uni. No. 2019616789. Date of

filling: June 05, 2019. Date of publication: June 24, 2019. Bull. no. 7. 28 Kb.

7. Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Khakhaleva L.V., Chukalin A.V., Bondarenko A.A., Kovrizhnykh E.N. The Mechanism and Theoretical Basis of the Management of Intensity of the Heat Transfer Control through Periodic Influences on the Turbulent Boundary Layer. *AIP Conference Proceedings*. 1863, 560016 (2017).

8. Shlikhting G. *Teoriia pogranichnogo sloia* [Boundary Layer Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 712 p.

9. Kovalnogov N.N., Fokeeva E.V. Vliianie prirody gaza na effektivnost gazodinamicheskoi temperaturnoi stratifikatsii [Nature of Gas Influence on Gas-Dynamic Temperature Stratification Efficiency]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bull. of Ulyanovsk State Technical University], 2010, no. 2, pp. 67–69.

10. Gortyshov Iu.F., Dresviannikov F.N., Idiatullin N.S. et al. *Teoriia i tekhnika teplofizicheskogo eksperimenta*. Ucheb. posobie dlia inzh.-fiz. i energomashinostroit. spets. vuzov pod red. V.K. Shchukina [Theory and Procedure of Thermal and Physical Experiment. Textbook for Special Subjects in Power-Plant Engineering and Physics. Ed. V.K. Shchukin]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 360 p.

11. Iakimov A.S. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoi zashchity i nekotorykh zadach teplomassoobmena* [Mathematical Modeling of Thermal Protection and Some Heat and Mass Transfer Problems]. Tomsk, Tomsk Uni. Publ., 2015. 214 p.

12. Chukalin A.V., Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Bondarenko A.A., Miroshin A.N. Eksperimentalnoe issledovanie pogranichnogo sloia na perforirovannoi poverkhnosti s dempfiruiushchimi polostiami [An Experimental Study of the Boundary Layer on a Perforated Surface with Damping Cavities]. *Tr. sedmoi Ros. nats. konf. po teploobmenu* [Proc. of the 7th Russian National Conf. on Heat Transfer]. Moscow, Izdat. dom MEI Publ., 2018, vol. 2, pp. 373–376.

13. Ilinkov A.V., Ilinkova V.G., Shchukin A.V. Teplootdacha na polusfericheskikh vystupakh pri razlichnoi plotnosti ikh raspolozheniia na stenke kanala [Heat Transfer on Semispherical Protrusions Located at Different Density in Channel Borders]. *IVUZ Aviatsionnaia tekhnika* [Izv. VUZ. Russian Aeronautics], 2011, no. 2, pp. 43–47.