

**И.Д. ФЕДОТЕНКОВ**  
**А.А. ЦЫНАЕВА**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПОТОКА В КАНАЛЕ С ГАНТЕЛЕОБРАЗНЫМИ ЛУНКАМИ**

*STUDY OF FLOW AERODYNAMICS IN A CHANNEL WITH DUMBBELL-SHAPED DIMPLES*

*Проведено исследование аэродинамического сопротивления канала с гантелеобразными лунками на поверхности и с гладкими стенками. Выявлено, что гидравлическое сопротивление канала с гантелеобразными лунками выше, чем гладкого. При этом поверхность канала предлагаемой конструкции также выше, что может быть использовано для интенсификации теплообмена в рекуперативных теплообменниках систем вентиляции. Выполнено численное исследование течения в прямоугольном канале с односторонним расположением лунок предлагаемой геометрии. Выявлено, что применение таких лунок на малых скоростях течения на входе в канал (0,5-1 м/с) увеличивает до 20 % скорость течения газа вблизи поверхности с лунками по сравнению с гладкой стенкой. При скорости течения на входе в 16,5 м/с, вблизи лунок возникают области с пониженными скоростями.*

**Ключевые слова:** *поверхностные интенсификаторы, эксперимент, аэродинамическое сопротивление, коэффициент трения, лунки.*

Основные методы повышения эффективности теплообменных аппаратов [1–9] можно разделить на два основных типа: пассивные и активные. Пассивные методы интенсификации теплообмена [10] основаны на увеличении поверхности теплообмена поверхностей, например, нанесение ребер, насечек, лунок. Вблизи таких особенностей поверхности образуются вихревые потоки, что приводит к повышению теплоотдачи. К активным методам интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах можно отнести: использование колеблющихся потоков [11] теплоносителя, скачков уплотнения [12], градиента давления, пульсаций охладителя [13] и т.д.

Формы лунок, насечек и ребер влияют на теплообменные характеристики: чем больше сопротивление, тем выше теплоотдача. При этом нужно использовать технологичную и экономически выгодную поверхность. Поверхность должна быть не сложной в изготовлении, а соотношение сопротив-

*The paper deals with the study of aerodynamic resistance in a channel with dumbbell-shaped dimples on the surface and with smooth walls. It has been found that the hydraulic resistance of a channel with dumbbell-shaped dimples is higher than of a smooth one. The surface of the channel of the proposed design is also higher. It can be used for the intensification of heat transmission in recuperative heat exchangers of ventilation systems. The numerical study of the flow in a rectangular channel with one-sided arrangement of dimples of proposed geometry has been carried out. It has been determined that the use of such dimples at small flow rates near the inlet (1-0.5 m/s) will increase the rate of gas flow near the surface with dimples in comparison with a smooth wall to 20 %. When the flow rate near the inlet is 16.5 m/s, the areas with lower rates appear near the dimples.*

**Keywords:** *surface intensifiers, experiment, aerodynamic resistance, coefficient of friction, dimples.*

ления и теплоотдачи находится в области оптимальных значений.

В настоящее время известны овальные лунки [13], для которых при той же площади «пятна» теплоотдача возрастает более чем в три раза по сравнению с лунками сферического типа. Но, по мнению авторов, и те и другие лунки недостаточно технологичны в производстве. Поэтому в данной работе представлены лунки гантелеобразной формы, их раскрой выполнен на установке лазерной резки, что позволяет достичь высокой точности и производительности. Для достижения еще более высокого результата на разработанный экспериментальный стенд была установлена заслонка с пульсатором, что позволяет сочетать сразу два вида воздействия: пассивный и активный.

Исследования посвящены изучению коэффициента гидравлического трения для двух поверхностей: с интенсификаторами теплообмена (гантелеобразными лунками) и без особенностей (гладкая

стенка). Кроме того, для анализа течения вблизи гантелеобразных лунок выполнено численное исследование течения воздуха в прямоугольном канале с односторонним расположением лунок.

### Численное моделирование

Для численного моделирования использовались программные комплексы с открытым ис-

ходным кодом. Геометрия расчетной области, представляющая узкий прямоугольный канал с односторонним расположением гантелеобразных лунок, создана в Salome [14]. Геометрия исследуемого прямоугольного канала с гантелеобразными лунками представлена на рис. 1, а. В этом же программном комплексе Salome выполнена дискретизация расчетной области (рис. 1, б). Для получения

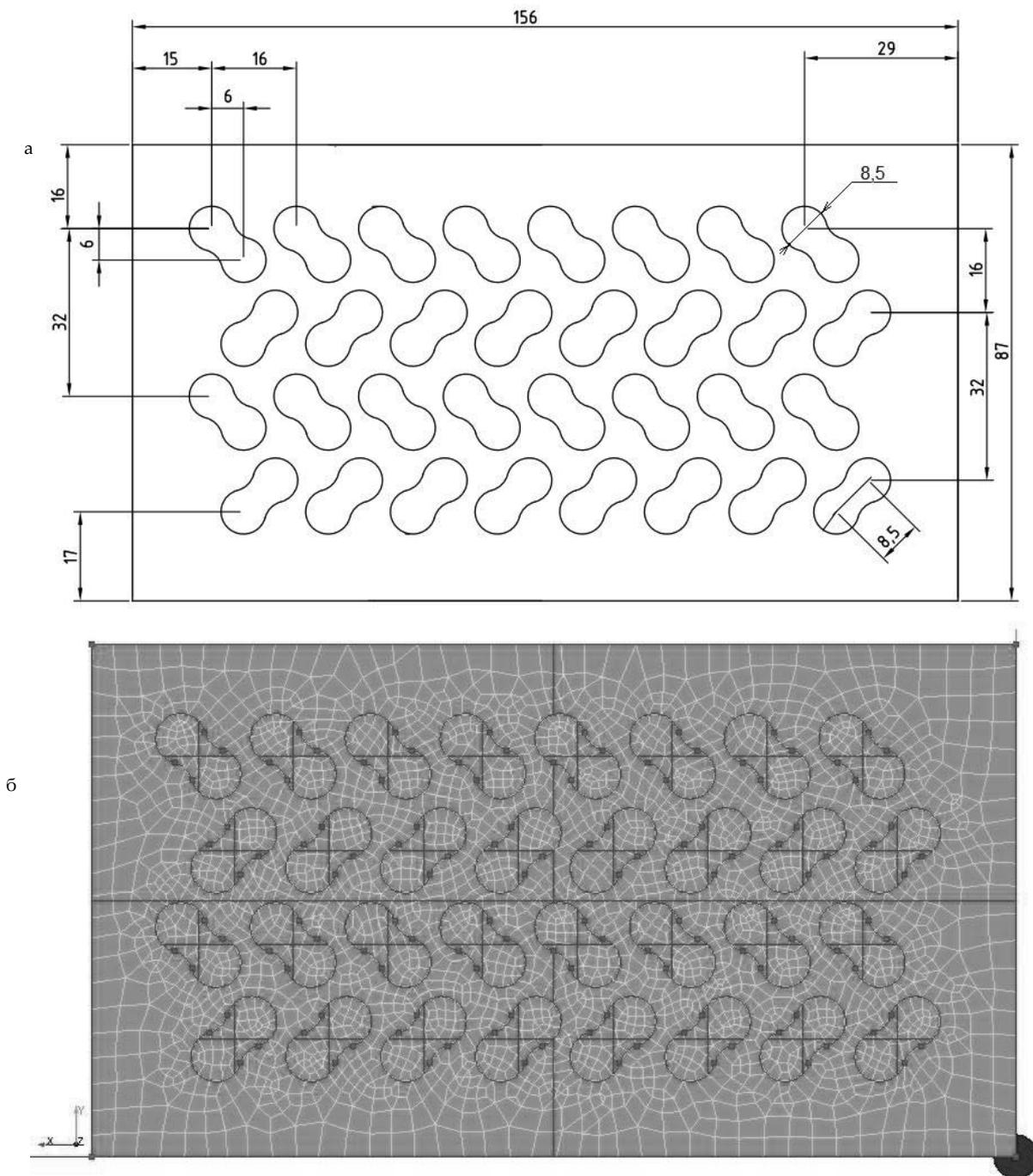


Рис. 1. Геометрия расчетной области: а – размерные параметры; б – дискретизация расчетной области

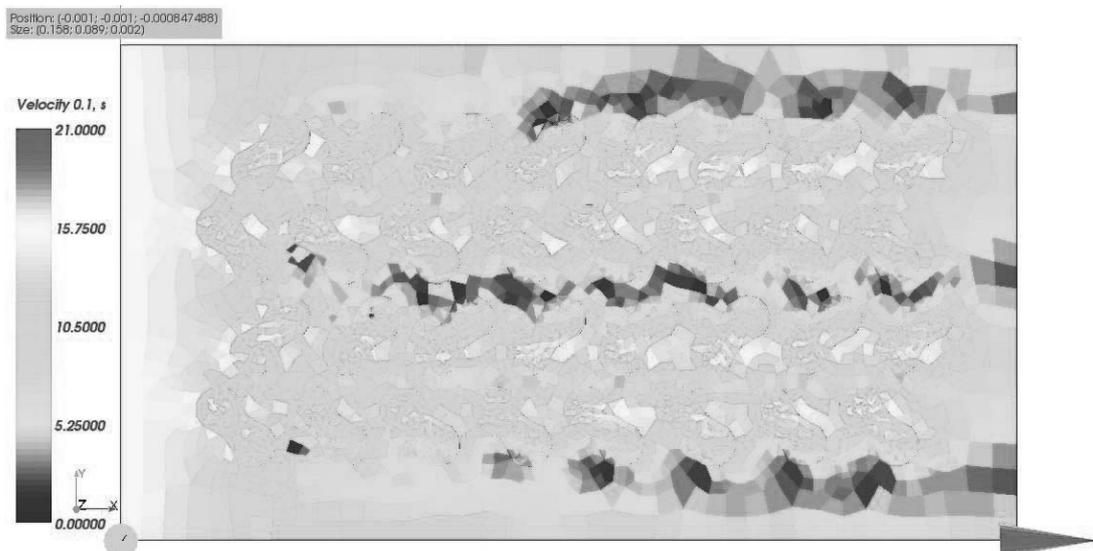


Рис. 2. Результаты численного моделирования

численного решения использовался программный комплекс Code Saturne [15], дискретизация граничных условий осуществлена стандартными инструментами Code Saturne [15, 16].

Для повышения качества решения вблизи стенок прямоугольного канала стандартными средствами Salome выполнено структурирование расчетной сетки, создан пристеночный пограничный слой толщиной 2 мм, разделенный на четыре подслоя. Высота канала составляла 10 мм, глубина лунки – 1,2 мм. Предварительные численные исследования выполнены на сетке из 84000 элементов.

Для моделирования используются уравнения Навье-Стокса, замыкаемые с помощью k-omega SST модели турбулентности [17]. При моделировании рабочей средой выбран воздух. При численном исследовании принята изотермическая модель, что допустимо при расчетах гидравлических параметров течения. Условия моделирования: скорость на входе  $v=16,5$  м/с, плотность и кинематическая вязкость воздуха заданы при нормальных условиях ( $0$  °С,  $101325$  Па);  $\rho=1,293$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu=13,28 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Распределение скорости потока вблизи поверхности с гантелеобразными лунками, полученное в результате расчета, представлено на рис. 2.

Анализ результатов моделирования показал, что при малых скоростях газа на входе в канал (порядка 0,5–1 м/с) вблизи гантелеобразных лунок наблюдается некоторое увеличение (до 20 %) скорости воздуха. При скорости потока на входе в канал 16,5 м/с наличие гантелеобразных лунок ведет к возникновению за лунками зон с пониженной скоростью потока. Эти результаты свидетельствуют о возможности оптимизации поверхностей теплообмена за счет применения гантелеобразных лунок.

#### Экспериментальное исследование

В лаборатории кафедры теплогазоснабжения и вентиляции СГАСУ собрана экспериментальная установка (рис. 3) для исследований интенсификации теплообмена.

Задачей эксперимента является исследование изменения коэффициента трения на участке с гантелеобразными лунками. Перед началом экспери-

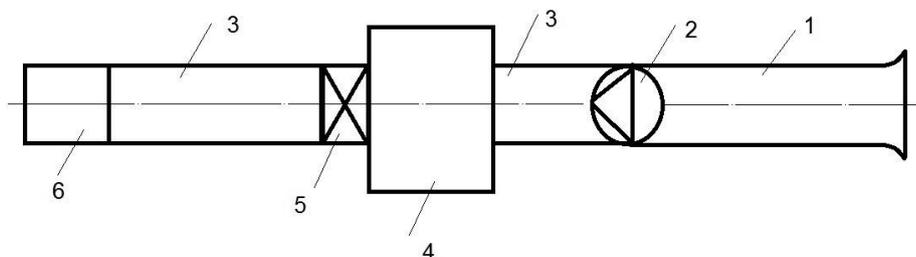


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: 1 – всасывающий патрубок; 2 – вентилятор; 3 – гладкий воздуховод; 4 – ресивер; 5 – пульсатор с электроприводом; 6 – участок воздуховода с гантелеобразными лунками



Рис. 4. Экспериментальный стенд (а) и развертка поверхности с интенсификаторами (лунками в форме гантели (б): 1 – напорный патрубков; 2 – вентилятор; 3 – всасывающий патрубков

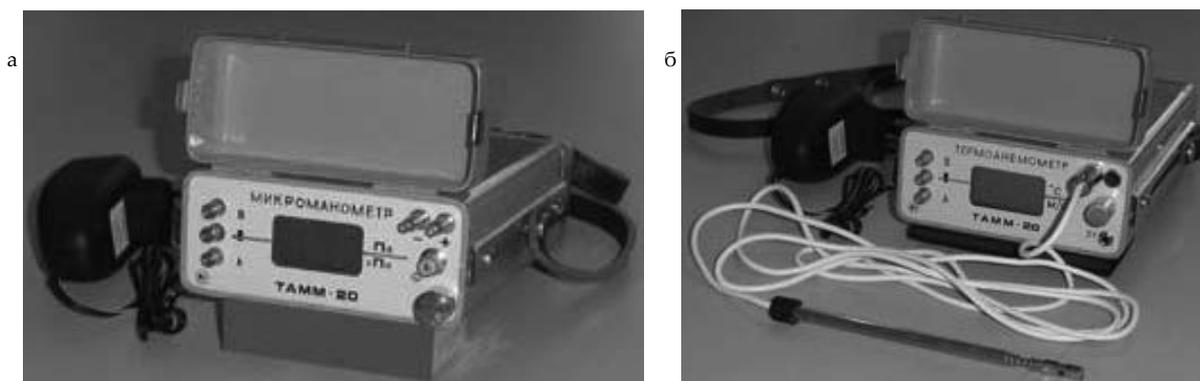


Рис. 5. Термоанемометр (а), микроманометр (б) ТАММ-20

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Расход воздуха, м³/ч	Потери давления $\Delta P_n$ , гладкий/шероховатый воздуховод, Па	Скорость воздуха, м/с
1000	18/25	16,15
1050	20/27	16,96
1100	21/28	17,76
1150	23/29	18,57
1200	25/31	19,38

мента была зафиксирована заслонка на пульсаторе в максимально открытом положении и произведены замеры: скорости, температуры, полного, статического и динамического давления при разных расходах воздуха. Замеры производились на входе в гладкий воздуховод, на выходе из него и на выходе из воздуховода с лунками (см. рис. 3). На рис. 4 показан экспериментальный стенд и развертка внутренней поверхности воздуховода. Данные эксперимента получены с помощью термоанемометра и микроманометра ТАММ-20, представленных на рис. 5.

В результате обработки экспериментальных данных были определены удельные потери полного давления каждого из участков воздуховода для различных расходов и скоростей воздуха. Результаты измерений занесены в табл. 1.

Для вычисления коэффициента трения необходимо определить режим течения потока воздуха, характеристикой которого является критерий Рей-

нольдса  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$  (здесь  $\nu = 15,55 \cdot 10^{-6}$  – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;  $d = 0,15$  – диаметр воздуховода, м;  $v$  – скорость воздуха, м/с). Длина участка с гантелеобразными лунками составляет 10 калибров. Для всех скоростей при проведении исследований критерий Рейнольдса соответствовал турбулентному режиму течения. Например, при расходе 1050 м³/ч  $Re = 161\,093$ . Для турбулентного течения теоретическое значение коэффициента трения определяется по формуле Альтшуля  $\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{K_s}{d} \right)^{0,25}$ , где  $K_s$  – эквивалентная шероховатость, мм (для гладкого 0,1; шероховатого 1 мм).

Опытное значение коэффициента трения рассчитывается по формуле  $\lambda = \frac{\Delta P_n}{\ell \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}}$  (здесь  $\Delta P_n$  –

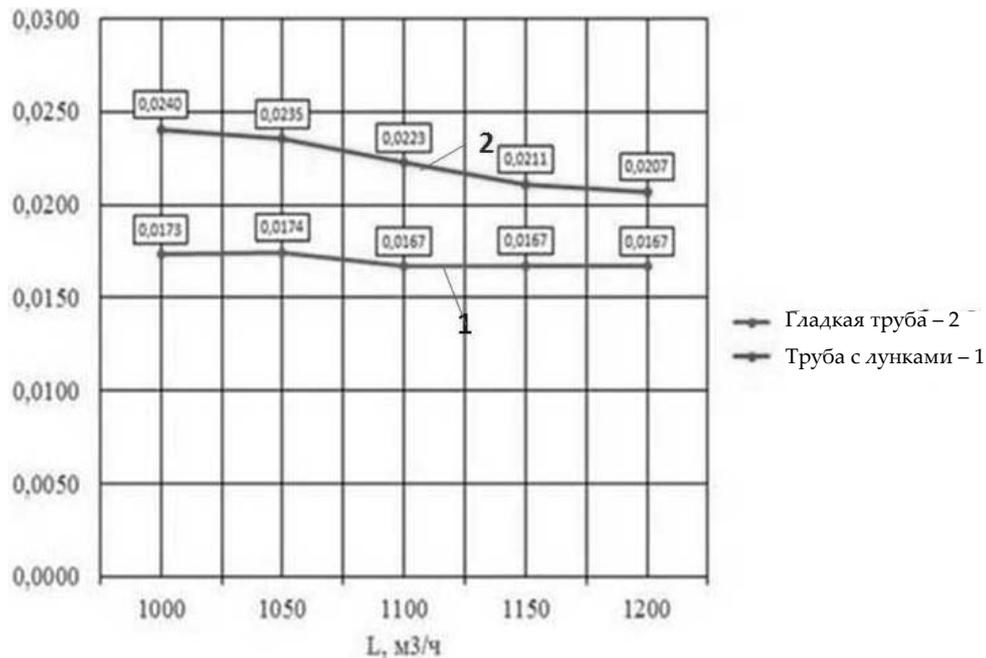


Рис. 6. График изменения коэффициента трения на двух различных участках

потери давления, Па;  $\ell$  – характерный размер, м) [18] для двух участков разной шероховатости. Результаты эксперимента приведены на рис. 6.

**Выводы.** Эксперимент показал увеличение коэффициента трения в воздуховоде с гантелеобразными лунками на 50–75 %. Численное моделирование выявило, что при малых скоростях газа на входе в канал (порядка 0,5–1 м/с) вблизи гантелеобразных лунок наблюдается некоторое увеличение (до 20 %) скорости потока. При скорости потока на входе в канал 16,5 м/с наличие гантелеобразных лунок ведет к возникновению за лунками зон с пониженной скоростью потока. Известно, что теплоотдача для поверхностей теплообмена возрастает пропорционально увеличению гидравлического сопротивления. В этой связи разработка поверхностей с лунками является приоритетным направлением развития теплообменных аппаратов, в том числе и в области теплогазоснабжения и вентиляции [18,19].

**Благодарности:** Благодарим коллектив Новокуйбышевского завода ЗАО НЗВЗ «Волгопромвентиляция» за помощь в создании интенсифицированной поверхности.

Выражаем благодарность за помощь в сборке экспериментального стенда заведующему лабораториями кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Дежурову С.В.

Благодарим магистранта группы МТ-52 Баринова А.Ю. за помощь в проведении опытов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интенсификация теплообмена: Тематический сборник. Успехи теплопередачи 2 / под ред. А. А. Жукаускаса, Э. К. Калинина. Вильнюс: Моклас, 1988. 188 с.
2. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и нано- масштабах: монография / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов; под ред. Ю.А. Кузма-Кичты. М.: ФГУП ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008. 532 с.
3. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Ю.Ф. Гортышов Ю., И.А. Попов, В.В. Олимтиев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
4. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена: пер. с англ. М.: Энергия, 1977. 464 с.
5. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Интенсификация температурной стратификации турбулентных потоков за счет использования тепловых труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 3-4. С. 33–38.
6. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Об использовании тепловых труб для повышения эффективности газодинамической температурной стратификации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3-2 (41). С. 192–197.

7. *Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V.* Methods of heat transfer intensification in the thermal stratification pipe. *Russian Aeronautics*, 2013, Vol. 56, № 4, pp. 379-383.

8. *Цынаева А.А.* Численное исследование температурной стратификации // Автоматизация процессов управления. 2014. № 2 (36). С. 62-66.

9. *Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В.* Математическое моделирование температурной стратификации в модифицированной трубе Леонтьева с тепловыми трубами // Автоматизация процессов управления. 2013. № 2. С. 29-35.

10. *Волкова Т.Н., Магазинник К.М., Сагитова К.Р., Цынаева А.А.* Труба температурной стратификации. Пат. 2468309 РФ 27.11.2012, Бюл. № 33. 5 с.

11. *Галицкий Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В.* Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.

12. *Попович С.С.* Экспериментальное исследование влияния падающего скачка уплотнения на адиабатную температуру стенки в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Тепловые процессы в технике. 2014. № 3. С. 98-104.

13. *Голованов А.Н., Рулева Е.В.* О влиянии периодических пульсаций газа-охлаждителя на характеристики теплообмена в системе пористого охлаждения // Вестник Томского государственного университета. 2011. №2(14). С. 85-90.

14. Страница программного продукта – <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 16.03.2015).

15. Страница программного продукта – <http://code-saturne.org/cms/> (дата обращения: 16.03.2015).

16. *Цынаева А.А., Цынаева Е.А.* Моделирование задач теплообмена и гидрогазодинамики с помощью свободного программного обеспечения // Вестник Ульяновского государственного технического университета. Ульяновск: УлГТУ, 2014. №4. С. 42-45.

17. Страница Langley Research Center: Turbulence Modeling Resource – <http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html> (дата обращения: 12.05.2015).

18. *Сыромятников Н.Е., Ромейко М.Б., Сапарёв М.Е.* Методические указания к проведению лабораторных работ по вентиляции / СГАСУ. Самара, 2011. 45 с.

19. *Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., & Hassel E.* (2010). Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1), 178-197.

20. *Карташова А.О., Кортяева Д.О., Кулясова К.Е., Цынаева А.А.* Исследование работы сплит-системы в режиме подогрева (тепловой насос) // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 1(18). С. 90-99. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.01.14.

Об авторах:

**ФЕДОТЕНКОВ Иван Дмитриевич**

магистрант гр. МТ-52 по направлению «Строительство», профиль подготовки «Энергоэффективность систем обеспечения микроклимата» кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный архитектурно-строительный университет 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: fidotenkov1993@mail.ru

**ЦЫНАЕВА Анна Александровна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный архитектурно-строительный университет 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: a.tsinaeva@rambler.ru

**FEDOTENKOV Ivan**

Graduate Student of Gr. MT-52, specializing in «Construction», «Energy Efficiency of Systems of Microclimate Control» profile, the Department of Heat and Ventilation Samara State University of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: fidotenkov1993@mail.ru

**TSYNAEVA Anna**

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Heat and Ventilation Samara State University of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: a.tsinaeva@rambler.ru

Для цитирования: *Федотенков И.Д., Цынаева А.А.* Исследование аэродинамики потока в канале с гантелеобразными лунками // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №1(22). С. 15-20. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.01.3.

For citation: *Fedotenkov I.D., Tsynaeva A.A.* Study of flow aerodynamics in a channel with dumbbell-shaped dimples // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. № 1(22). Pp. 15-20. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.01.3.

\* \* \*

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

**ПРИГЛАШАЕМ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В 73-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СГАСУ, КОТОРАЯ СОСТОИТСЯ**

**11-15 апреля 2016 года**

**ПОЛНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЕРЕНЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНА НА САЙТЕ WWW.SAMGASU.RU РАЗДЕЛ НАУКА→КОНФЕРЕНЦИИ**