

7. Iachachene F., Mataoui A., Halouane Y. Numerical investigations on heat transfer of self-sustained oscillation of a turbulent jet flow inside a cavity // J. of Heat Transfer. 2015. Vol. 137.

8. Aminzadeh M., Khadem J., Zolfaghari S. A., Omidvar A. Computational study on self-oscillatory flow induced by vertical and horizontal jets in partially heated and cooled cavities // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 129.

УДК 536.24

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУЧКОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ С ВИХРЕГЕНЕРАТОРАМИ

**Р. Г. Кадыров¹, А. А. Миронов¹, И. А. Попов¹, Г. С. Маршалова^{2,3},
Ю. В. Жукова², А. Д. Чорный²**

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ, г. Казань*

²*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск*

³*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

Впервые Г. Эйфелем было обнаружено явление [1], заключающееся в том, что при возникновении в пограничном слое на обтекаемом теле (сферы, цилиндра) турбулентного течения резко уменьшается сопротивление. Внешний поток усиленно действует на пограничный слой и перемешивает его. Точка отрыва смещается вниз по течению. Для ламинарного пограничного слоя точка отрыва находится в окрестности угловой координаты 90° , тогда как после турбулизации пограничного слоя она перемещается вниз по течению – на угловую координату $110\text{--}140^\circ$. Таким образом, область застойного течения за телом значительно сужается, а распределение давления становится подобным распределению давления при течении без трения.

Экспериментально этот парадокс подтвердил Л. Прандтль [2]. На поверхности шара перед его миделевым сечением он укрепил тонкое проволочное кольцо. Наличие кольца вызвало искусственную турбулизацию пограничного слоя при умеренных числах Рейнольдса и привело к снижению сопротивления.

Исследование парадокса Эйлера–Д’Аламбера способствовало установлению общих свойств возмущений, вызываемых в жидкости движением твердого тела, а также выяснению влияния вязкости жидкости на них в зависимости от формы обтекаемого тела и ряда других эффектов.

Предложенное и использованное в работе Л. Прандтля проволочное кольцо, установленное на обтекаемом теле для искусственной турбулизации пограничного слоя, при умеренных числах Рейнольдса может быть заменено на другие типы генераторов вихрей [3, 4]. Одним из таких типов генераторов вихрей могут служить системы сферических выемок, хорошо известных в литературе по интенсификации теплоотдачи [5–7].

Известно, что при внесении возмущений [8] в пограничный слой на поверхности плохобтекаемого тела, в том числе кругового цилиндра, аэродинамическое сопротивление тела может резко уменьшиться. При этом точка отрыва потока может сместиться вниз по потоку. Таким образом, отрывная область за телом будет иметь меньший поперечный размер, что приводит к значительному уменьшению сопротивления давления. Существует ряд методов, как пассивных, так и активных, позволяющих внести возмущения в пограничный слой. К таким методам относятся изменение структуры потока перед/за плохобтекаемым телом за

счет установки направляющих элементов (пластин, тел меньшего размера) [8–13]; нанесение упорядоченной шероховатости [14], нанесение на поверхность плохообтекаемого тела генераторов вихрей [5–7]. Нанесенные на поверхность генераторы вихрей могут не только снизить аэродинамическое сопротивление, но и увеличить теплоотдачу как за счет увеличения площади теплопередающей поверхности, так и за счет уменьшения толщины динамического пограничного слоя (следовательно – и теплового пограничного слоя).

Цель работы – экспериментально исследовать конвективный теплообмен пучков труб с развитой поверхностью теплоотдачи для повышения теплогидравлической эффективности теплообменного аппарата.

Объект исследования – пучки теплообменных труб. Размеры опытных образцов: длина 0,076 м, внешний диаметр образцов $d_i = 0,022$ м. Выемки на опытных образцах наносились на внешнюю поверхность в шахматном порядке и занимали 50, 75 и 100% от внешней поверхности образца. Увеличение площади поверхности образцов составляет $f = 1,21; 1,31; 1,41$ соответственно. Основные геометрические размеры выемок на опытных образцах: диаметр выемок $d = 0,006$ м, $h = 0,003$ м, продольный шаг $t = 0,012$ м, поперечный (по винтовой линии) шаг выступов $s = 0,008$ м (рис. 1). В экспериментах исследовались относительно глубокие выемки $h/d = 0,5$. Опытные образцы в рабочем участке исследовались при коридорном расположении (рис. 2) при продольных S_1 и поперечных S_2 шагах образцов. При шахматном расположении (компоновке) труб в пучке поперечный шаг S_1 составлял 0,044 м, продольный шаг $S_2 = 0,022$ м, что обеспечило значение относительных шагов $a = S_1/d_i$ и $b = S_2/d_i$ шагов и $a \times b = 2 \times 1$. При коридорном расположении (компоновке) образцов в рабочем участке исследовались поперечный шаг $S_1 = 0,044$ м и продольный шаг $S_2 = 0,044$ м, что обеспечивало относительные $a = S_1/d_i$ и $b = S_2/d_i$ шаги и $a \times b = 2 \times 2$.

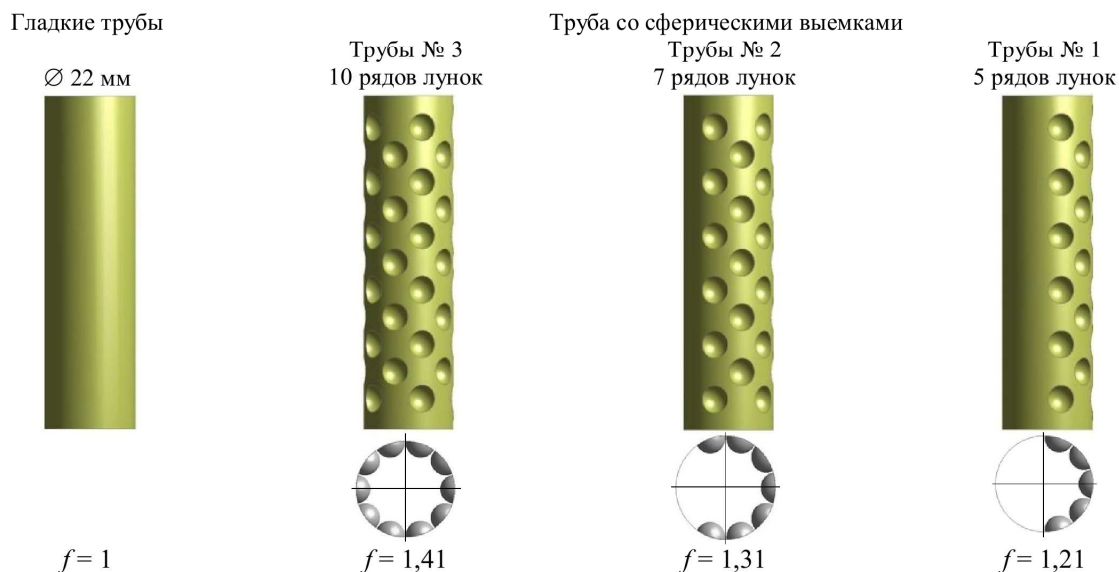


Рис. 1. Опытные образцы

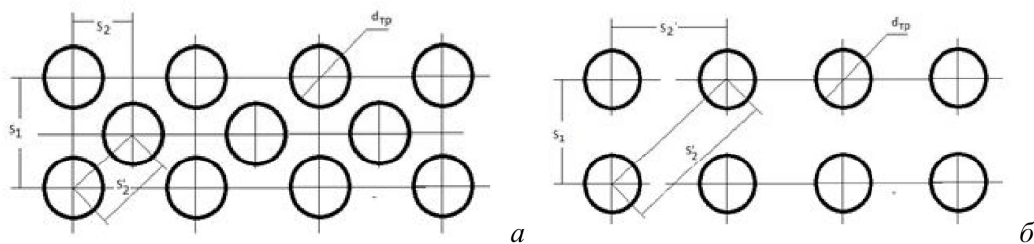


Рис. 2. Компоновка рассматриваемых образцов труб в рабочем участке: *а* – шахматная, *б* – коридорная

Шахматная компоновка трубного пучка. Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучками труб шахматной компоновки при различных вариантах нанесения вихрегенераторов представлены на рис. 3. Выявлено, что в каналах с пучками труб № 1 и № 2 сопротивление возросло в среднем в 1,05–1,11 раз. Сопротивление пучков труб № 3 приблизительно равно уровню сопротивления в каналах с пучком гладких труб. Таким образом, нанесение сферических выемок незначительно увеличило коэффициент аэродинамического сопротивления пучков труб при шахматной компоновке.

В целом в экспериментах не выявлено существенного снижения аэродинамического сопротивления в каналах с пучками труб с вихрегенераторами. Однако прослеживается, что при шахматной плотной компоновке аэродинамическое сопротивление труб № 2 и № 3, т. е. с относительной площадью, занимаемой вихрегенераторами 75% и 100%, имеют сопротивление на уровне гладкого канала.

При исследовании коэффициентов теплоотдачи пучков труб ($Re = 21\ 000$) при шахматной компоновке определялись местные коэффициенты теплоотдачи на поверхности труб во всех 7 рядах пучка с последующим определением коэффициентов теплоотдачи на трубах в каждом ряду. Показано, что теплоотдача ряда № 1 составляет 68%, для ряда № 2 – 88% от уровня теплоотдачи труб третьего и последующих рядов (рис. 4). Полученные данные качественно близки к результатам ранее выполненных работ, в которых эти значения составили 60 и 70% соответственно.

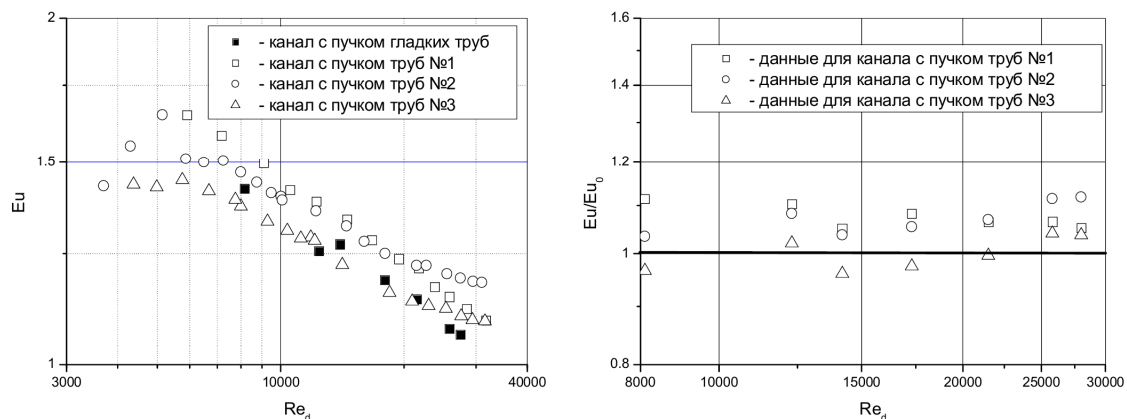


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучком труб при шахматной компоновке

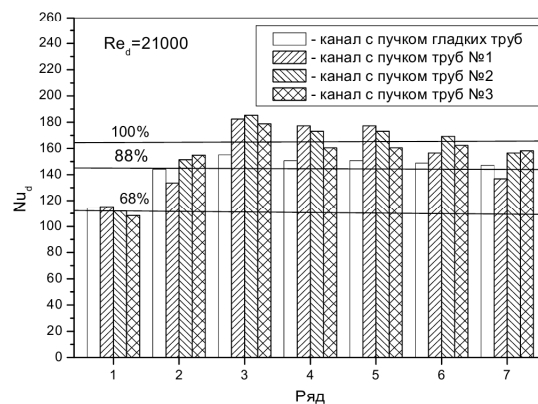


Рис. 4. Теплоотдача в различных рядах пучков труб при шахматной компоновке

Установленное распределение коэффициентов теплоотдачи характерно как для гладкостенных труб, так и для труб с различными компоновками вихрегенераторов.

На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования пучков труб при шахматной компоновке и различной площадью, занимаемой вихрегенераторами. Установлено, что наибольшая интенсификация теплоотдачи характерна для труб № 3 и составляет 1,06–1,14 раз в диапазоне $Re = 10^4 - 3 \cdot 10^4$. Наименьшая интенсификация теплоотдачи наблюдается в пучках труб № 1 и составляет 1,01–1,08 раз. При определении коэффициентов теплоотдачи использовалась площадь гладкого цилиндра. Учитывая, что для труб № 1 увеличение площади теплообмена составляет 1,21; труб № 2 – 1,31; труб № 3 – 1,41 раза, выявленные уровни интенсификации теплоотдачи в 1,01–1,14 раз показывают, что интенсификация не связана с увеличением площади поверхности теплообмена. Нанесение сферических выемок несколько ухудшило условия теплообмена на поверхности выемок. Однако, как было показано ранее, нанесение выемок снизило прирост аэродинамического сопротивления пучков труб.

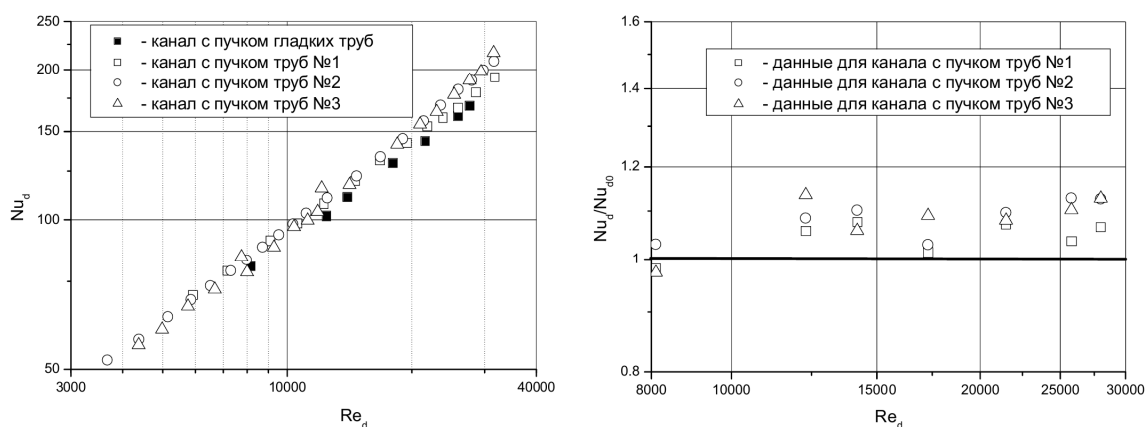


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в канале с пучком труб при шахматной компоновке

Эффективность пучков теплообменных труб при шахматной компоновке и различными вариантами нанесения вихрегенераторов сравнивалась с использованием безразмерного комплекса $(Nu_d/Nu_{d0})/(Eu/Eu_0)$. Результаты сравнения представлены на рис. 6.

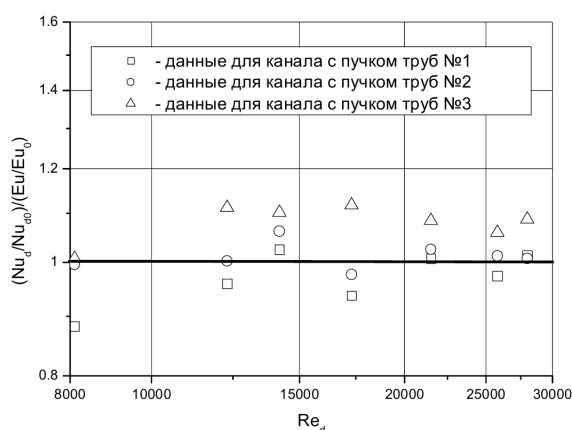


Рис. 6. Теплоаэродинамическая эффективность каналов с пучками труб при шахматной компоновке

Во всем диапазоне исследуемых чисел $Re = 8 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^3$ наибольшая теплоаэродинамическая эффективность характерна для пучков труб № 3 с площадью нанесения вихрегенераторов 100%. Теплоаэродинамическая эффективность данных пучков составила

$(Nu_d / Nu_{d_0}) / (Eu / Eu_0) = 1,1$. Эффективность труб № 2 с площадью нанесения вихрегенераторов 75% соответствует уровню гладкого канала. Однако интенсификация теплоотдачи в данных каналах составляет 1,1 раза. Наименьшая эффективность наблюдается у пучка труб № 1 с площадью нанесения вихрегенераторов 50%. Уровень эффективности ниже гладкого канала и составляет в среднем 0,95 раз, несмотря на то, что уровень интенсификации теплоотдачи составляет порядка 1,05 раз.

Коридорная компоновка трубного пучка. Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучками труб коридорной компоновки при различных вариантах нанесения вихрегенераторов представлены на рис. 7. Показано, что в каналах с пучками труб № 1, № 2 и № 3 сопротивление возросло в среднем в 1,1–1,3 раз. Таким образом, нанесение сферических выемок незначительно увеличило коэффициент аэродинамического сопротивления пучков труб при коридорной компоновке. Хотя при подобной компоновке на плоской поверхности увеличение сопротивления составляло бы 2,5–4 раза.

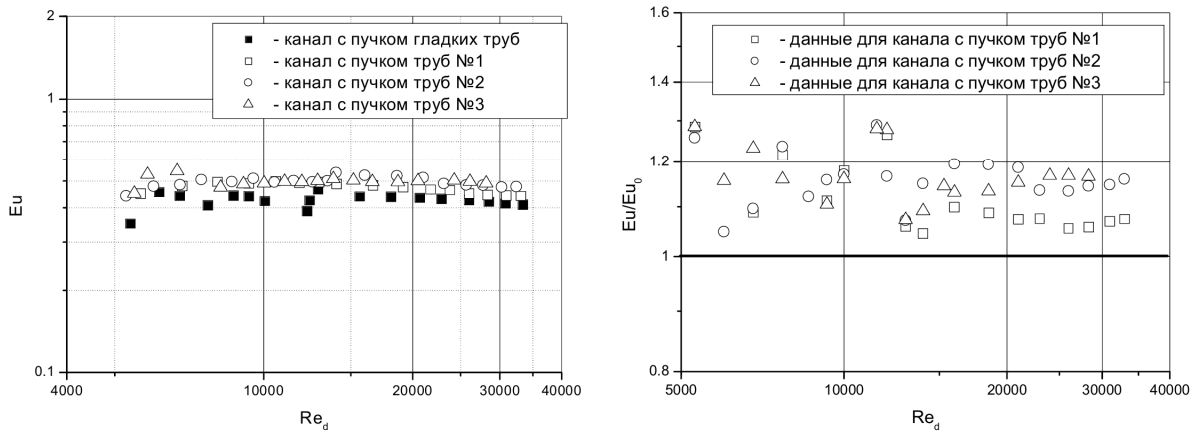


Рис. 7. Результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления в канале с пучком труб при коридорной компоновке

На рис. 8 показано распределение коэффициентов теплоотдачи в различных пучках труб при коридорной компоновке. Уровень теплоотдачи ряда № 1 составляет 77%, а ряда № 2 – 90% от уровня теплоотдачи третьего и четвертого рядов. Это качественно согласуется с литературными данными, в которых указывается, что теплоотдача первого ряда составляет 60%, а второго – приблизительно 90% от теплоотдачи третьего и последующего рядов.

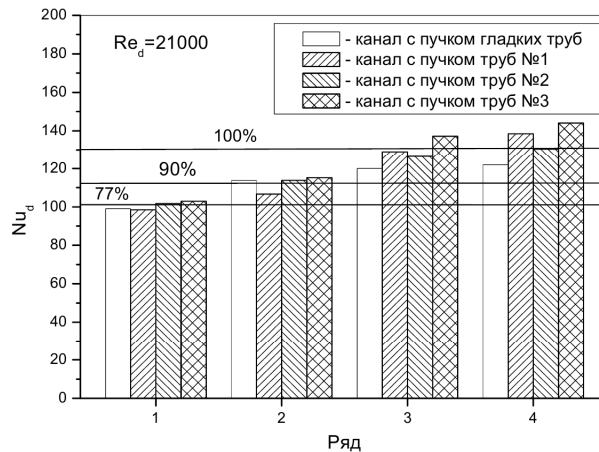


Рис. 8. Теплоотдача в различных рядах пучков труб при коридорной компоновке

Установлено, что наибольшая интенсификация теплоотдачи характерна для труб № 3 (рис. 9) и составляет 1,05–1,16 раз. Наименьшая интенсификация теплоотдачи наблюдается в пучках труб № 1 и в среднем составляет 1,02 раз в диапазоне $Re = 10^4 - 3.5 \cdot 10^4$.

При коридорной компоновке пучков теплообменных труб уровень теплоаэродинамической эффективности (рис. 10) во всем диапазоне исследуемых чисел Re ниже, чем эффективность гладкотрубного пучка. Наименьшая эффективность у пучка труб № 1 и № 2 и составила в среднем 0,9 в диапазоне $Re = 15 \cdot 10^3 - 34 \cdot 10^3$. Наибольшая эффективность в этом диапазоне Re у пучков труб № 3 с площадью нанесения вихрегенераторов 100% и составляет 0,98–1, при этом уровень интенсификации теплоотдачи составляет 1,1–1,16 раз.

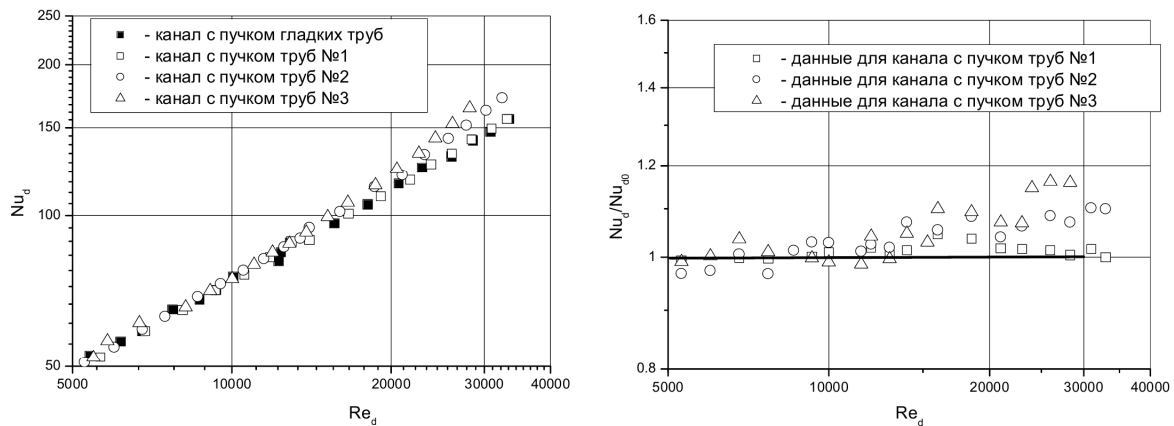


Рис. 9. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в канале с пучком труб при коридорной компоновке

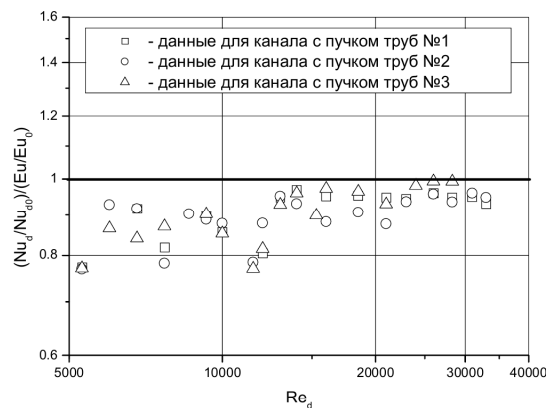


Рис. 10. Теплоаэродинамическая эффективность каналов с пучками труб при коридорной компоновке

Заключение. Проведено исследование гидравлического сопротивления шахматных и коридорных пучков труб с различными компоновками вихрегенераторов на поверхностях, распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по длине окружности труб, распределения теплоотдачи в рядах труб и средней теплоотдачи пучков труб.

Выявлено, что увеличение аэродинамического сопротивления в шахматных пучках труб составило: для $f = 1,21$ и $1,31$ в среднем 1,05–1,11 раз, а при $f = 1,41$ сопротивление приблизительно равно уровню сопротивления в каналах с пучком гладких труб. Для коридорных пучков труб для $f = 1,21$; $1,31$ и $1,41$ – в 1,1–1,3 раза.

Определена интенсификация теплоотдачи в шахматных пучках труб: для $f = 1,21$ – 1,01–1,08 раза, $f = 1,31$ – 1,03–1,13 раза, $f = 1,41$ – 1,06–1,14 раза и в коридорных пучках труб соответственно 1,01–1,05; 1,01–1,1 и 1,05–1,16 раз.

Наибольшая теплоаэродинамическая эффективность выявлена для пучков труб с площадью нанесения вихрегенераторов 100% при шахматной компоновке и составила 1,1. Наименьшая эффективность наблюдается у пучка труб с площадью нанесения вихрегенераторов 50% и составила 0,95, что ниже эффективности гладкого канала. Наибольшая теплоаэродинамическая эффективность для пучков труб с площадью нанесения вихрегенераторов 100% при коридорной компоновке и составила 0,98–1,0. Наименьшая эффективность для пучка труб с площадью нанесения вихрегенераторов 50 и 75% и составила в среднем 0,89.

Исследования сопротивления пучков труб выполнены в рамках соглашения с Министерством науки и образования РФ № 075-03-2020-051/3 (№ гос. рег. НИОКТР АААА-А20-120102190039-6), исследования теплоотдачи – в рамках гранта РФФИ 20-58-04002 и грантов БРФФИ Т21РМ-019 и Ф21МС-011.

Литература

1. Eiffel G. Experiences sur la resistance de l'air // Comptes Rendus. 1903. Vol. 137. P. 30–32.
2. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Теоретическая физика. М.: Наука, 1986. Т. 6. – 736 с.
4. Yurchenko N., River R., Pavlovsky R. Control of the profile aerodynamics using stream-wise vortices generated in a boundary layer // Proc. World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. Kyiv, Ukraine, 2003. P. 14–16.
5. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Копп И. З., Мякочин А. С. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
6. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А. Олимпиев В. В., Щелчков А. В., Каськов С. И. Тепло-гидравлическая эффективность перспективных методов интенсификации теплоотдачи в теплообменном оборудовании: Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
7. Исаев С. А., Баранов П. А., Гортышов Ю. Ф., Гувернюк С. В., Мазо А. Б., Смуров М. Ю., Судаков А. Г., Усачов А. Е., Харченко В. Б. Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование. СПб: Издательский дом Политехнического университета, 2016. – 215 с.
8. Чжен П. К. Отрывные течения: в 3 т. М.: Мир, 1972 – 916 р.
9. Roshko A. On the drag and shedding frequency of bluff cylinders // Nat. Adv. Comm. Aero., Wash., Tech. 1954. Note 3169.
10. Igarashi T. Correlation between heat transfer and fluctuating pressure in separated region of a circular cylinder // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1984. Vol. 27, Issue 6. P. 927–937.
11. Zhdanov V., Kukharchuk I., Terekhov V. Velocity field behind a plate installed in the inner region of a turbulent boundary layer // J. of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Vol. 93, No. 5. P. 1233–1239.
12. Dyachenko A. Yu., Zhdanov V. L., Smulsky Ya. I., Terekhov V. I. Experimental study of heat transfer in the separation region behind the reverse ledge in the presence of tabs // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26, No. 4. P. 549–560.
13. Baranova T. A., Zhdanov V. L., Zhukova Yu. V., Isaev S. A., Reduction of resistance and heat transfer enhancement in flow past a cylinder with jet and vortex generators // Heat Transfer Research. 2010. Vol. 41, No. 4. P. 401–411.
14. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Мир, 1982. – 472 с.