

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)
УДК 536.25
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-4-499-506>

Поступила в редакцию 19.11.2018
Received 19.11.2018

Г. С. Маршалова¹, С. А. Сверчков²

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ

Аннотация. Смешанно-конвективный теплоперенос имеет большое значение для широкого класса инженерных задач. Однако проведение экспериментов по изучению смешанной конвекции требует значительных расходов на реализацию, высокой мощности оборудования, а также больших временных затрат, поэтому предлагается расширять границы экспериментальных исследований с помощью численного моделирования. В настоящей работе проведено численное моделирование смешанно-конвективного теплообмена однорядного пучка из биметаллических ребристых труб и его сопоставление с экспериментальными данными.

Для численного моделирования была осуществлена трехмерная постановка задачи. Для моделирования теплопередачи от ребер труб к воздуху решалась сопряженная задача. При численном моделировании количества движения воздуха учитывалось, что число Рейнольдса, построенное по диаметру несущей трубы и скорости в межреберном канале, изменялось от 100 до 720. Для замыкания уравнения Рейнольдса была использована $k-\omega$ модель переноса сдвиговых напряжений Ментера в стандартной постановке.

Полученная визуализация течения на поверхности трубы позволила выявить переходный характер течения воздуха. Визуализация распределения температур в пучке и вытяжной шахте дала возможность увидеть структуру охлаждения оребренного пучка при смешанной конвекции.

Результаты проведенного моделирования и экспериментальных исследований хорошо согласуются и могут быть использованы для расширения границ эксперимента.

Ключевые слова: смешанная конвекция, численное моделирование, воздухоохлаждаемый теплообменник, вытяжная шахта, расчетная сетка, $k-\omega$ модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, визуализация течения

Для цитирования. Маршалова, Г. С. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования и численного моделирования теплоотдачи однорядного пучка оребренных труб при смешанной конвекции / Г. С. Маршалова, С. А. Сверчков // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 499–506. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-4-499-506>

G. S. Marshalova¹, S. A. Sverchkov²

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND NUMERICAL SIMULATION OF SINGLE-ROW FINNED TUBE BUNDLE AT MIXED CONVECTION

Abstract. Mixed convective heat transfer is very important for a wide class of engineering tasks. However, the experimental study of mixed convection requires significant implementation costs, high-power equipment, as well as large time costs, so it is proposed to expand the scope of experimental studies using numerical simulation. Numerical simulation of the single-row bundle consisting of bimetallic finned tubes at mixed air convection conditions was performed and experimental data were compared.

The formulation of the third-dimensional problem for numerical simulation was realized. The conjugated problem for heat exchange modeling from the tube fins to air was solved. In numerical simulation of air momentum it was taken into account that the Reynolds number based on tube diameter and velocity in the space between fins was varied from 100 to 720. Menter's $k-\omega$ shear stress transport model in standard formulation was used to close the Reynolds equations.

Flow visualization on the tube surface revealed the transient nature of the air flow. The temperature distribution visualization in the bundle and the exhaust mine made it possible to see the nature of cooling the finned bundle at mixed convection.

Results of numerical simulation and experimental investigations are in good agreement and can be used for expansion of the scope of experiments.

The experimental data and the numerical simulation results for the single-row bundle consisting of bimetallic finned tubes at mixed air convection are compared in this paper. Flow near tube surfaces was visualized, and the temperature and velocity distributions in a bundle and in the exhaust mine were obtained.

Keywords: mixed convection, numerical simulation, air-cooled heat exchanger, exhaust mine, computational mesh, Menter's $k-\omega$ shear stress transport model, flow visualization

For citation. Marshalova G. S., Sverchkov S. A. Comparative analysis of experimental investigations and numerical simulation of single-row finned tube bundle at mixed convection. *Vestsi Natsyianal'най akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 499–506 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-4-499-506>

Введение. В конвективном теплопереносе принято выделять вынужденную и свободную конвекцию, и поэтому процессы рассматривают в предположении, что один из этих режимов течения является преобладающим. Однако создаваемые при конвективном течении перепады температур в окружающей среде при наличии поля объемных сил, таких как сила тяжести, приводят к возникновению свободно-конвективных течений. Таким образом, даже в условиях действия вынужденной конвекции будут присутствовать проявления свободной. В практических расчетах большое значение имеют условия, при которых можно пренебречь влиянием одного механизма конвективного переноса на другой. В реальных устройствах возникают условия, когда оба вида конвекции играют существенную роль, в этом случае возникает явление смешанной конвекции. Такие условия, например, реализуются при проведении термоанемометрических измерений проволочными и пленочными датчиками в низкоскоростных потоках, при вынужденном течении в нагреваемом канале, при охлаждении электронных приборов вентиляторами и во многих других случаях, представляющих практический интерес [1].

Смешанно-конвективный теплоперенос имеет большое значение для широкого класса инженерных задач. К сожалению, этому вопросу уделялось недостаточно внимания. В прошлом большинство работ было посвящено определению границ различных режимов переноса, т. е. определению условий, когда при вынужденном течении можно пренебречь влиянием свободной конвекции или, наоборот, при свободно-конвективном течении пренебречь влиянием вынужденного. Большая часть исследований смешанно-конвективного теплообмена посвящена изучению ламинарных течений около поверхностей относительно несложной геометрической формы [1]. Смешанно-конвективный теплообмен около вертикальных поверхностей рассматривался в работах [2–4], для оребренных труб в модели воздушного конденсатора [5], а также для аппаратов воздушного охлаждения [6].

Проведение экспериментов по изучению смешанной конвекции требует значительных расходов на реализацию, высокой мощности оборудования, а также больших временных затрат. Вследствие этого чаще всего охватить весь желаемый диапазон вариантов экспериментов не представляется возможным. Для решения этой проблемы предлагается расширять границы эксперимента с помощью численного моделирования.

Цель работы – сопоставление экспериментальных данных и результатов численного моделирования для однорядного пучка, состоящего из биметаллических ребристых труб, в условиях смешанной конвекции.

Изучался однорядный шахматный пучок воздухоохлаждаемого теплообменника, состоящий из шести биметаллических ребристых труб, расположенных с поперечным шагом $S_1 = 58$ мм, относительным поперечным шагом $\sigma_1 = 1,036$. Для организации смешанной конвекции над экспериментальным пучком устанавливалось два типа вытяжных шахт – с прямоугольным и круглым сечениями. Подробное описание установки, вытяжной шахты, трубы-калориметра и методики экспериментального исследования представлено в [7].

Для сравнения результатов экспериментальных исследований и численного моделирования были выбраны следующие виды вытяжных шахт: $d_{\text{отв}} = 0,160$ м, $H = 0,52$ м; $d_{\text{отв}} = 0,205$ м, $H = 0,52$ м; $d_{\text{отв}} = 0,105$ м, $H = 1,16$ м, где $d_{\text{отв}}$ – диаметр выходного отверстия вытяжной шахты, H – высота вытяжной шахты.

Методы. Для подготовки расчетной сетки (рис. 1) был использован пакет Ansys Meshing, который позволяет подготовить сетку с необходимым качеством и достаточным количеством конечных элементов. Численное моделирование проводилось при помощи пакета Ansys Fluent 19.1.

Для расчета задачи в стационарной постановке был использован компьютер с 12-ядерным процессором Intel Xeon E5 и 64 Гб ОЗУ. Среднее время расчета на распараллеленной версии составляло порядка 6–8 ч.

Для численного моделирования была осуществлена трехмерная постановка задачи. Размеры расчетной области составляли $10,348 \times 4,0868 \times 0,00972$ м. Расчет осуществлялся на представленной на рис. 1 неструктурированной пространственной сетке, состоящей из тетрагексагональных элементов, т. е. элементов, имеющих в своем основании треугольник. Для описания расчетной области потребовалось около 8,7 млн ячеек.

В начале расчета по всей расчетной области устанавливается статическое давление $P = 101\,325$ Па, и температура воздуха $T_{\text{вх}} = t_0$. Для моделирования теплопередачи от ребер труб к воздуху решалась сопряженная задача.

Зависимость теплофизических характеристик теплоносителя – воздуха (плотности, теплопроводности и динамической вязкости) от температуры и давления задавалась в виде законов: для плотности – согласно закону идеального газа; для коэффициента теплопроводности – в виде полинома третьей степени; коэффициент динамической вязкости – согласно закону Сазерленда.

В процессе решения сходимость задачи контролировалась уровнем погрешности: для давления и скоростей (уравнения Навье – Стокса и неразрывности) минимальный уровень погрешности составлял 10^{-3} , для температуры (уравнение энергии) – 10^{-5} . Обычно расчеты прекращались по достижении погрешности для поправок давления 10^{-4} , для температуры (уравнение энергии) – 10^{-8} .

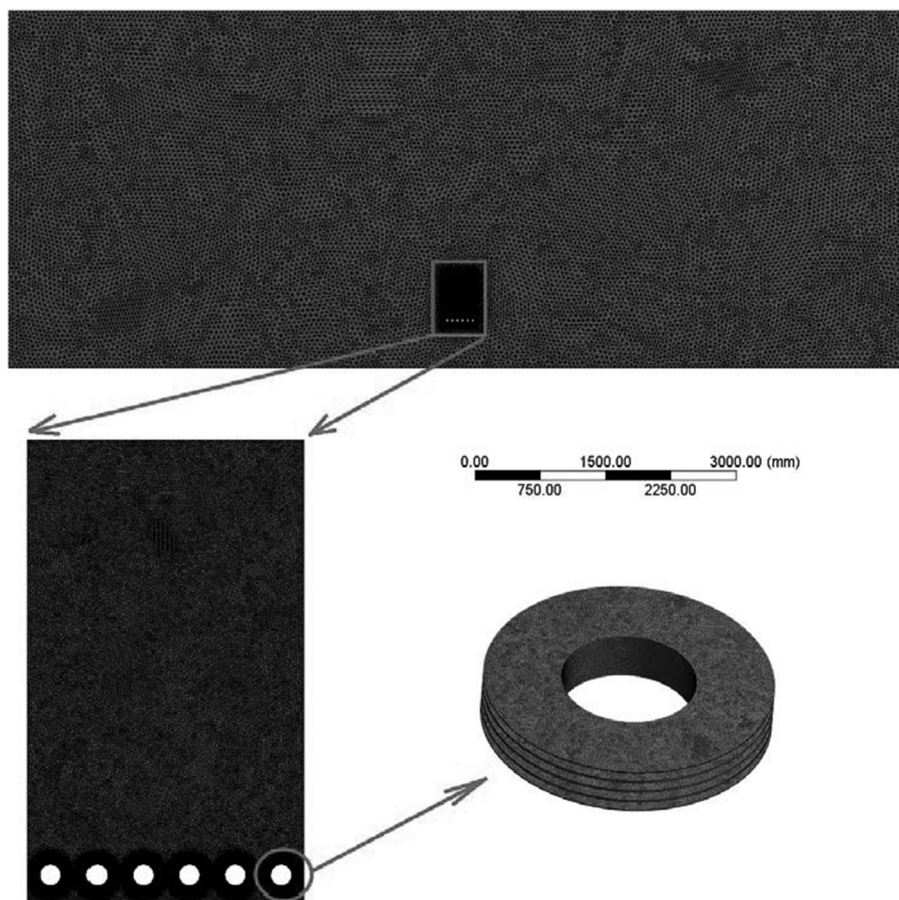


Рис. 1. Расчетная сетка

Fig. 1. Computational mesh

Одним из критериев, характеризующим процесс смешанно-конвективного теплообмена, является число Ричардсона $Ri = Gr / Re^2$, где число Грасгофа и число Рейнольдса выражают соответственно интенсивность свободной и вынужденной конвекции [1]. При $Ri \ll 1$ режим течения считается преимущественно вынужденным, а при $Ri \gg 1$ – преимущественно свободным. Для проведенного эксперимента число Ричардсона составляло 0,45–1,5, что свидетельствует о наличии смешанно-конвективного теплообмена, при этом с увеличением высоты и диаметра выходного сечения вытяжной шахты число Ричардсона уменьшалось.

При численном моделировании количества движения воздуха учитывалось, что число Рейнольдса, построенное по диаметру несущей трубы и скорости в межреберном канале, изменялось от 100 до 720, таким образом, течение – ламинарное. Однако расчеты проводятся для случая смешанной конвекции. В следе за трубами могут присутствовать как двумерные, так и трехмерные структуры. Для численной идентификации этих структур необходимо решение трехмерных уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, уравнения неразрывности и уравнения энергии.

Для замыкания уравнения Рейнольдса была использована $k-\omega$ модель турбулентности Ментера в стандартной постановке [11].

Ввиду того, что $k-\varepsilon$ модель имеет преимущество в зонах течения вдали от стенок, а стандартная $k-\omega$ модель – вблизи стенок, то для численного моделирования была использована объединенная модель – модель переноса сдвиговых напряжений (*SST*), в которой применялся математический аппарат для автоматического переключения между моделями $k-\varepsilon$ и $k-\omega$, разработанный Ментером.

Обсуждение полученных результатов. На рис. 2 представлено течение воздуха в пучке оребренных труб. Холодный воздух за счет разности температур и вытяжной шахты засасывается в пучок, огибая носовую часть труб. В межтрубном сечении пучка наблюдается значительное увеличение скорости воздушного потока, связанное с резким сужением проходного сечения в межтрубном пространстве. В межреберном пространстве скорость воздуха также увеличивается, однако при этом примерно в 2 раза меньше скорости в проходном сечении.

Также на рис. 2 показано, что узкие области с повышенной скоростью воздуха наблюдаются и в следе, вплоть до выхода из вытяжной шахты из-за затрудненного перемешивания слоев воздуха, поскольку скорость потока в продольном направлении выше, чем в поперечном.

Также в кормовой части оребренных труб видны отрывные зоны. При малых числах Рейнольдса течение можно считать безотрывным. Однако при увеличении мощности нагрева,

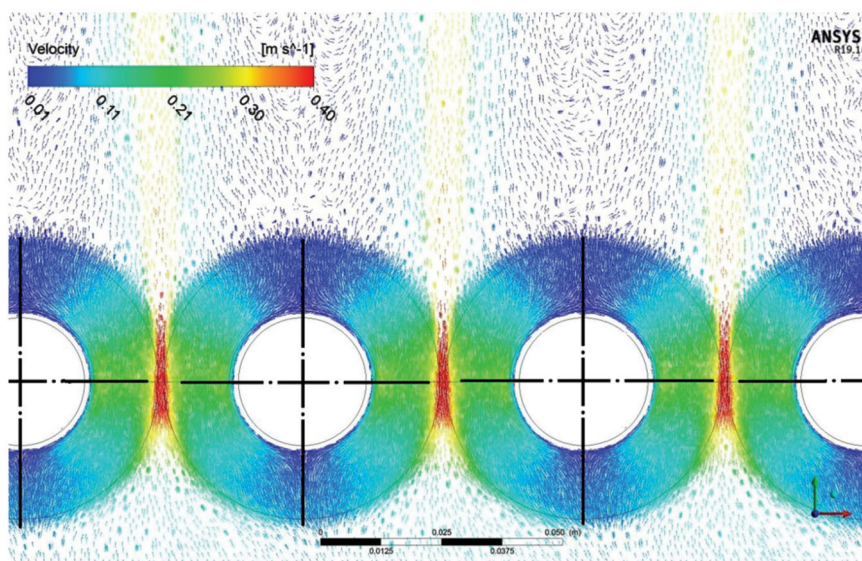


Рис. 2. Визуализация течения воздуха на ребре и несущей трубе
Fig. 2. Air flow visualization on the fin and on the carrying tube

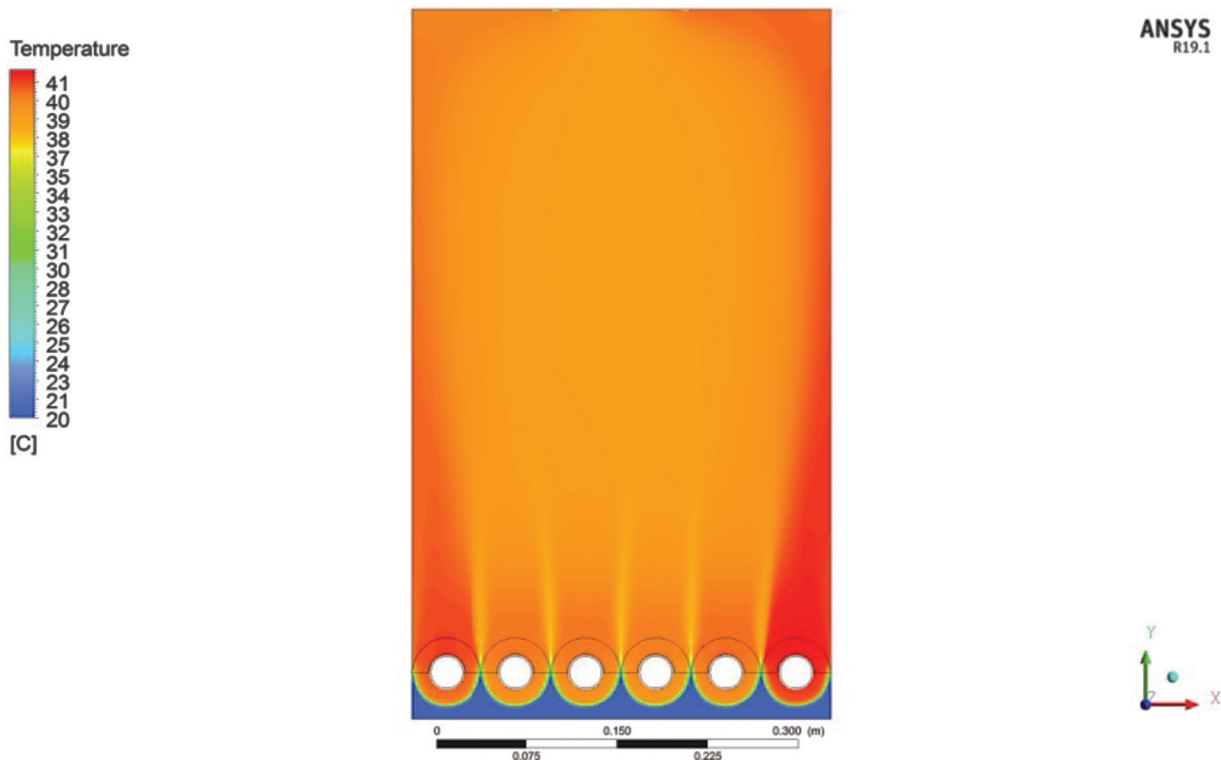


Рис. 3. Распределение температур в пучке и вытяжной шахте
 Fig. 3. Temperature distribution in the bundle and in the exhaust mine

а следовательно, и при увеличении скорости в межреберных каналах и между трубами пучка, число Рейнольдса растет и отрывная зона в кормовой части труб также увеличивается, след за пучком становится более размытым, и слои воздуха перемешиваются интенсивнее.

Распределение температур в однорядном оребренном пучке с вытяжной шахтой представлено на рис. 3 при $W = 30$ Вт, $H = 520$ мм соответственно. Диаметр выходного отверстия шахты $d_{\text{отв}} = 205$ мм.

На рис. 3 видно, что холодный воздух поднимается вверх и, охлаждая поверхность оребренных труб, поступает в вытяжную шахту. В межреберном пространстве температура воздуха снижается от основания трубы к вершине ребра. Сформировавшаяся между трубами зона повышенных скоростей (см. рис. 2) приводит к тому, что в этой же зоне наблюдаются участки с пониженной температурой. По мере продвижения воздуха вверх по вытяжной шахте слои начинают интенсивно перемешиваться, и через выходное отверстие воздушные массы поступают в окружающую среду.

В углах и по бокам шахты видны застойные зоны с воздухом более высокой температуры по сравнению со средней частью, что обуславливается геометрией шахты и центральным расположением выходного отверстия.

Ввиду близости крайних труб к теплоизолированным стенкам вытяжной шахты на них наблюдается более высокая температура по сравнению с центральными трубами.

Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования производилось в виде зависимости скорости воздуха в пучке w_n , температуры стенки $t_{\text{ст}}$ от мощности, подаваемой на калориметр (рис. 4). Как видно из графиков, расхождение между результатами эксперимента и численного моделирования не превышают 15 %.

Выводы. Характер течения воздуха, как показывают результаты численного моделирования, в следе за пучком оребренных труб при смешанной конвекции изменяется от безотрывного обтекания при малом нагреве труб до отрывного при максимальном. С увеличением числа Рейнольдса происходит увеличение отрывных зон и интенсификация смешения потоков в следе за пучком.

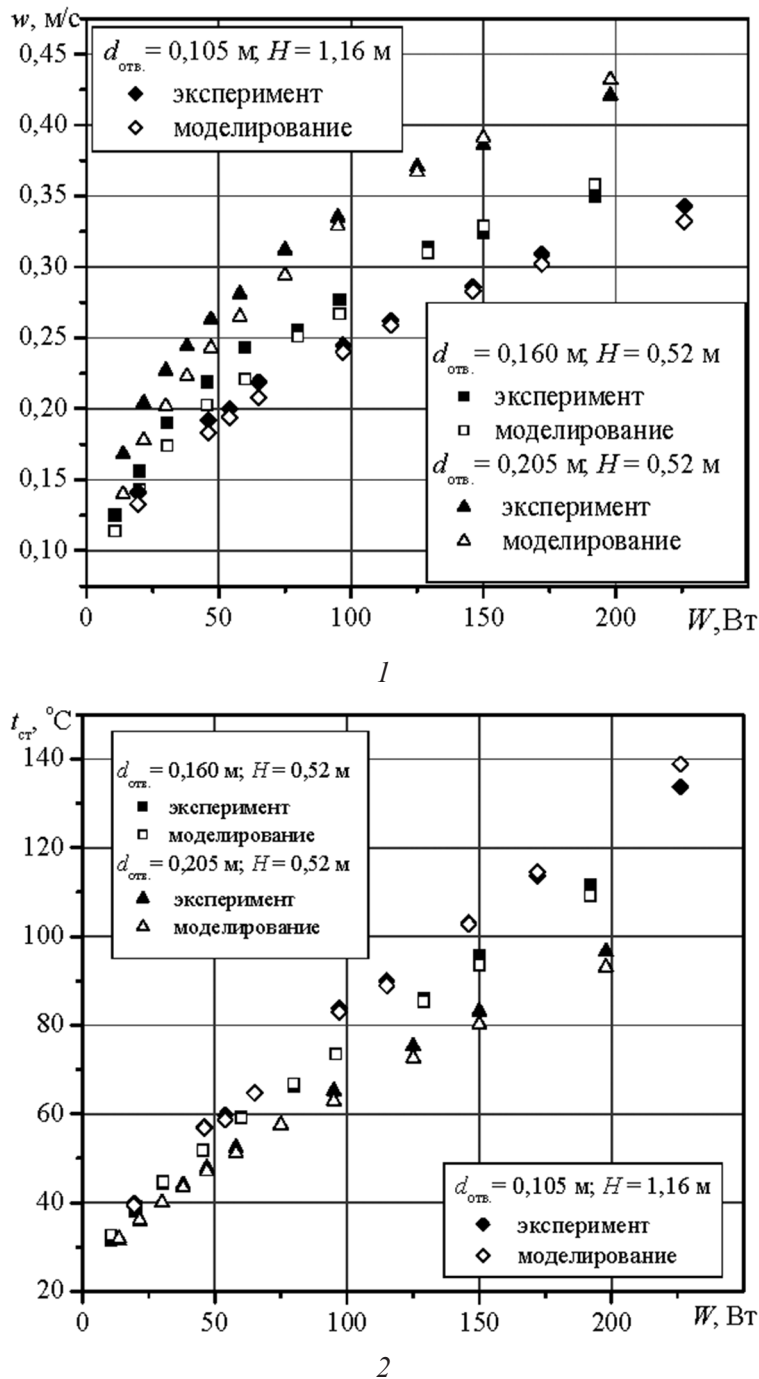


Рис. 4. Зависимости скорости воздуха в пучке w_n (1) и температуры стенки $t_{ст}$ (2) от мощности, подаваемой на калориметр

Fig. 4. Dependence of the air velocity in the bundle w_b (1) and the wall temperature t_w (2) on the power supplied to the calorimeter

Визуализация структуры течения в пучке и вытяжной шахте, проведенная на основе результатов численного моделирования, позволила получить распределение температур при обтекании нагретого оребренного пучка в режиме смешанной конвекции и определить перегревы на крайних трубах пучка, связанные с близостью к теплоизолированным стенкам, а также зоны повышенной температуры в верхней части шахты.

Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, и в дальнейшем разработанная методика может быть использована для расширения границ эксперимента и визуализации структуры течения в многорядных пучках труб.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (номер проекта T17PM-081).

Acknowledgements. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project number T17PM-081).

Список использованных источников

1. Свободноконвективные течения: тепло- и массообмен: в 2 кн.: пер. с англ. / Б. Гебхарт [и др.]; под ред. О. Г. Мартыненко. – М.: Мир, 1991. – Кн. 1. – 678 с.
2. Szewczyk, A. A. Combined Forced and Free-Convection Laminar Flow / A. A. Szewczyk // *J. Heat Transfer*. – 1964. – Vol. 86, № 4. – С. 501–507. <https://doi.org/10.1115/1.3688729>
3. Merkin, J. H. The effect of buoyancy forces on the boundary-layer flow over a semi-infinite vertical flat plate in a uniform free stream / J. H. Merkin // *J. Fluid Mechanics*. – 1969. – Vol. 35, № 3. – P. 439–450. <https://doi.org/10.1017/s0022112069001212>
4. Lloyd, J. R. Combined forced and free convection flow on vertical surface / J. R. Lloyd, E. M. Sparrow // *Int. J. Mass Transfer*. – 1970. – Vol. 13, № 2. – P. 434–438. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90119-5)
5. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман // *Теплоэнергетика*. – 2005. – № 5. – С. 16–19.
6. Васильев, Ю. Н. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций / Ю. Н. Васильев, Г. А. Марголин. – СПб.: Недра, 1977. – 222 с.
7. Сидорик, Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглорбрых труб и пучков / Г. С. Сидорик // *Тр. БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. – 2018. – № 1 (204). – С. 85–93.
8. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. В. Самородов. – СПб., 1999. – 22 с.
9. Сухоцкий, А. Б. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик // *Тр. БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2017. – № 1 (193). – С. 68–74.
10. Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников / В. Б. Кунтыш [и др.]; под ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 2000. – 300 с.
11. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.

References

1. Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan Roop L., Sammakia B. *Buoyancy-Induced Flows and Transport*. Springer-Verlag, 1988.
2. Szewczyk A. A. Combined Forced and Free-Convection Laminar Flow. *Journal of Heat Transfer*, vol. 86, no. 4, pp. 501–507. <https://doi.org/10.1115/1.3688729>
3. Merkin J. H. The effect of buoyancy forces on the boundary-layer flow over a semi-infinite vertical flat plate in a uniform free stream. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, vol. 35, no. 3, pp. 439–450. <https://doi.org/10.1017/s0022112069001212>
4. Lloyd J. R., Sparrow E. M. Combined forced and free convection flow on vertical surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1970, vol. 13, no. 2, pp. 434–438. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(70\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(70)90119-5)
5. Mil'man O. O. Experimental study of heat transfer at natural air circulation in the model of an air condenser with an exhaust shaft. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2005, no. 5, pp. 16–19 (in Russian).
6. Vasil'ev Ju. N. *Cooling Compressor and Pumping Stations*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 1977. 222 p. (in Russian).
7. Sidorik G. S. The experimental stand for a research of thermal and aerodynamic processes of mixed convection heat exchange for round-finned pipes and bunches. *Trudy BGTU. Seriya 1, Lesnoe khozyaistvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry. Environmental management. Reprocessing of renewable resources*, 2018, no. 1, pp. 85–93 (in Russian).
8. Samorodov A. V. *Improvement of Methods of Thermal Calculation and Design of Air Cooling Devices with Staggered Finned Beams*. Saint Petersburg, 1999. 22 p. (in Russian).
9. Sukhotskii A. B., Sidorik G. S. Intesification of free convection in a single row finned bunch in air cooler heat exchangers *Trudy BGTU. Seriya 2, Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya = Proceedings of BSTU. Series 2, Chemical technologies. Biotechnology. Geoecology*, 2017, no. 1, pp. 68–74 (in Russian).
10. Kuntyshev V. B., Bessonnyi A. N., Dreitser G. A., Egorov I. F. *Examples of calculations of non-standard efficient heat exchangers*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 2000. 300 p. (in Russian).
11. Bystrov Yu. A., Isaev S. A., Kudryavtsev N. A., Leont'ev A. I. *Numerical simulation of vortex intensification of heat exchange in packages of tubes*. Saint Petersburg, Sudostroenie Publ., 2005. 392 p. (in Russian).

Информация об авторах

Маршалова Галина Сергеевна – аспирант, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Сверчков Сергей Александрович – младший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: serge0788@gmail.com

Information about the authors

Galina S. Marshalova – Postgraduate Student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Sergey A. Sverchkov – Junior Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: serge0788@gmail.com