Для цитирования: *Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами в зависимости от числа прандтля для различных геометрических и режимных параметров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 91-101 DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101*
For citation: *I.E. Lobanov. Modeling heat exchange depending on the prandtl number for various geometric and regime parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 91-101. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101*

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 532.517.4 : 536.24
DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ПОЛУКРУГЛЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Лобанов И.Е.
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия

Резюме. Цель. *Цель работы состоит в исследовании и доказательстве зависимости от числа Прандтля распределения интегрального теплообмена при турбулентном конвективном теплообмене в трубе с последовательностью периодических выступов полукруглой геометрии на основе численного решения системы уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках.* ***Метод.*** *Расчёт проводился на базе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ).* ***Результат.*** *Расчёты показали, что с увеличением числа Прандтля при малых числах Рейнольдса сначала имеет место заметное увеличение относительного теплообмена, а потом относительный теплообмен изменяется меньше, причём для малых шагов имеет место его увеличение, для средних — почти стабилизация, для больших — незначительное снижение. При больших числах Рейнольдса происходит снижение относительного теплообмена с увеличением числа Прандтля при дальнейшей его стабилизации. Проведён анализ полученных расчётных зависимостей относительного теплообмена от числа Прандтля Pr при различных значениях относительной высоты турбулизатора h/D, относительного шага между турбулизаторами t/D, при различных значениях числа Рейнольдса Re, при прочих равных условиях, который показал качественные и количественные изменения рассчитываемых параметров.* ***Вывод.*** *При малых числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше, а при больших — меньше, высоты пристенного слоя, следовательно, имеет место турбулизация только ядра потока, что приводит только к увеличению гидросопротивления и к неувеличению теплообмена. На основании ограниченного расчётного материала было теоретически подтверждено ощутимое снижение уровня интенсификации теплообмена для малых чисел Прандтля. Полученные результаты интенсифицированного теплообмена в области низких чисел Прандтля обосновывают перспективную разработку исследований в данном направлении. Полученные в работе теоретические данные детерминировали закономерности относительного теплообмена в широком диапазоне чисел Прандтля, в том числе в тех областях, где ещё не существует экспериментального материала.*

Ключевые слова: *моделирование; численный; канал; труба; конвективный; модель Ментера; турбулизатор; теплообмен; гидравлическое сопротивление; число Прандтля*

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

MODELING HEAT EXCHANGE DEPENDING ON THE PRANDTL NUMBER FOR VARIOUS GEOMETRIC AND REGIME PARAMETERS

I.E. Lobanov
Moscow Aviation Institute (National Research University),
125993, Moscow, A-80, GSP-3, Volokolamskoe Shosse, 4, Russia

Abstract. Objectives. *The aim is to study the dependency of the distribution of integral heat transfer during turbulent convective heat transfer in a pipe with a sequence of periodic protrusions of semicircular geometry on the Prandtl number using the calculation method based on a numerical solution of the system of Reynolds equations closed using the Menter's shear stress transport model and the energy equation on different-sized intersecting structured grids.* ***Method****. A calculation was carried out on the basis of a theoretical method based on the solution of the Reynolds equations by factored finite-volume method closed with the help of the Menter shear stress transport model, as well as the energy equation on different-scaled intersecting structured grids (fast composite mesh method (FCOM)).* ***Results****. The calculations performed in the work showed that with an increase in the Prandtl number at small Reynolds numbers, there is an initial noticeable increase in the relative heat transfer. With additional increase in the Prandtl number, the relative heat transfer changes less: for small steps, it increases; for median steps it is almost stabilised, while for large steps it declines insignificantly. At large Reynolds numbers, the relative heat transfer decreases with an increase in the Prandtl number followed by its further stabilisation.* ***Conclusion****. The study analyses the calculated dependencies of the relative heat transfer on the Pr Prandtl number for various values of the relative h/D height of the turbulator, the relative t/D pitch between the turbulators and for various values of the Re Reynolds number. Qualitative and quantitative changes in calculated parameters are described all other things being equal. The analytical substantiation of the obtained calculation laws is that the height of the turbuliser is less for small Reynolds numbers, while for large Reynolds numbers, it is less than the height of the wall layer. Consequently, only the core of the flow is turbulised, which results in an increase in hydroresistance and a decrease in heat transfer. In the work on the basis of limited calculation material, a tangible decrease in the level of heat transfer intensification for small Prandtl numbers is theoretically confirmed. The obtained results of intensified heat transfer in the region of low Prandtl numbers substantiate the promising development of research in this direction. The theoretical data obtained in the work have determined the laws of relative heat transfer across a wide range of Prandtl numbers, including in those areas where experimental material does not currently exist.*

Keywords*: modelling, numerical, channel, pipe, convective, Menter's model, turbuliser, heat exchange, hydraulic resistance, Prandtl number*

Введение. Нанесение периодических выступов на стенки омываемых поверхностей является хорошо апробированным на практике способом вихревой интенсификации теплообмена [1, 7, 8, 26]. Интенсификация теплообмена для условий течения теплоносителей в трубах с турбулизаторами проводились и проводятся в основном экспериментальными методами [7, 8, 26], а теоретические исследования довольно немногочисленны, многие из них основаны на интегральных подходах [2, 11, 14, 18, 19].

Постановка задачи. На современном этапе исследований задачи аэромеханики и теплофизики отрывных и вихревых течений всё активнее решаются методами многоблочных вычислительных технологий, базирующихся на пересекающихся структурированных сетках [22-25, 28]. Настоящее исследование является логическим продолжением вышеуказанных вычислительных методов [1, 3-6, 9-13, 15-17] для анализа турбулентного течения и теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами потока (диафрагмами) с различными относительными

высотами, шагами для различных режимов течения теплоносителя с целью более подробного анализа интенсификации теплообмена для теплоносителей с различными числами Прандтля. Ранее данный аспект исследовался недостаточно полно.

Методы исследования. Математическая и дискретная модели. В данной работе с помощью полностью неявных конечно-разностных схем на центрированной неравномерной косоугольной сетке решается система уравнений Рейнольдса и энергии, записанных в естественных переменных.

Для расчёта поля давления используется процедура SIMPLEC; имеет место принцип расщепления по физическим процессам. Аппроксимация конвективных слагаемых производится с помощью квадратичной противопоточной схемы. Разностные уравнения решаются с помощью высокоэффективного метода неполной матричной факторизации при ускоренной сходимости с применением метода аддитивной коррекции. Многоблочный алгоритм решения задачи на пересекающихся разномасштабных сетках, апробированный при решении задач вихревой динамики и теплообмена [22], применяется для корректного описания турбулентного теплообмена. С помощью зональной низкорейнольдсовой модели Ментера [28] реализовано описание турбулентного переноса. В исследовании рассматривались каналы постоянного цилиндрического сечения с расположенными на стенках восемью турбулизаторами в форме периодических диафрагм полукруглого поперечного сечения.

Параметры изменялись в следующих диапазонах: d/D=0,95÷0,92; t/D=0,25÷1, где t — шаг размещения турбулизаторов; d — диаметр диафрагмы; D — диметр трубы; Re=10^4÷10^5 — число Рейнольдса; Pr=1÷20 — число Прандтля (для ограниченного расчётов — Pr=1÷0,05).

Кратким образом расчётная модель может быть охарактеризована следующим образом. Исследуемая трёхмерная расчётная область имеет несколько секций, каждая из которых состоит из одного выступа (рис. 1).

Рис. 1. Сетка трубы, состоящая из нескольких секций с расположенным посередине полукруглым турбулизатором, входного и выходного гладкого участков
Fig. 1. A pipe grid consisting of several sections with a semicircular turbulator located in the middle, inlet and outlet smooth sections

При расчёте предполагается, что при рассматриваемом числе турбулизаторов турбулентное течение становиться установившимся.

В основной части исследования расчёт теплообмена проводился при граничном условии на стенке первого рода с последовательным изменением числа Прандтля с 1 до 20 в целях установления закономерности изменения интенсификации теплообмена для различных теплоносителей. На предварительном этапе исследования проводится модификация многопрофильного вычислительного комплекса численного моделирования пространственных отрывных течений и вихревого теплообмена с целью адаптации и уточнения математической модели течения и вихревого теплообмена в каналах с турбулизаторами в предположении возникновения пространственных вихревых структур, ответственных за вихревую интенсификацию теплообменных процессов, в пристеночных зонах труб с турбулизаторами.

В целях решения задачи интенсифицированного теплообмена расчётная трёхмерная сетка строилась одинаковым образом: конструировалась двумерная сетка в осевой и радиальной координатах, разворачиваемая по окружной координате с постоянным шагом. В целях достижения необходимого разрешения в окрестности препятствия использовались двумерные сетки в виде многоярусных структурированных сеток, а препятствие описывалось на наиболее подробной сетке с наибольшим пространственным разрешением. Подробная сетка встраивалась в бо-

лее грубую сетку, с помощью которой описывалось течение в ближнем следе препятствия, а переход от пристеночной области к оси также осуществлялся с использованием промежуточных сеток, назначение которых — увеличение продольного шага сетки в районе препятствия и изменение разрешения по окружной координате. В дальнейшем не будем останавливаться на подробностях непосредственно модельных аспектов численных расчётов по данной методике, поскольку они были рассмотрены в [3,4, 6, 8, 9, 11, 15, 20, 22-24, 28].

Данные для исходных расчётов. Во входном сечении рассматриваемого участка трубы рассматривался равномерный поток с тонким допускающим варьирование пограничным слоем; параметры турбулентности соответствуют экспериментальным испытаниям в трубе, полагая масштаб турбулентности порядка диаметра трубы, который выбран в качестве характеристического размера, а степень турбулентности принимается равной полутора процентам.

В выходном сечении рассматриваемого участка трубы задаются «мягкие» граничные условия, иначе называемые условиями продолжения решения, для которых характерно экстраполирование параметров вне области расчёта. На омываемых теплоносителем стенках трубы, считающихся при граничных условиях первого рода изотермическими и имеющих большую или меньшую на определённое число градусов по отношению к температуре набегающего потока температуру, имеют место условия прилипания.

Для выбранной геометрии канала каждая отдельная задача из нескольких секций решается два этапа: сначала решается динамическая задача, после чего для предварительного рассчитанных полей составляющих скорости потока и характеристик турбулентности решается тепловая задача для различных чисел Прандтля.

Критерии сходимости для динамической задачи детерминируются ограничением погрешностей расчёта декартовых составляющих скорости, а для тепловой задачи — ограничением величины приращения тепловых потоков на стенках; в рамках данной работы за относительную погрешность была принята величина 0,0001.

Определение влияния числа прандтля на теплообмен в прямых круглых трубах с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока полукруглого поперечного сечения при различных геометрических и режимных параметрах. Коэффициент сопротивления ξ и осреднённое число Нуссельта Nu для трубы с полукруглыми турбулизаторами при турбулентном конвективном теплообмене в данной работе детерминировались расчётным методом на основе численного решения системы уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках.

Адекватность применённого метода обоснована тем, что ранее для сравнения в [3-5, 9-11, 13, 15, 16] были использованы аналогичные экспериментальные данные по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению для труб с полукруглыми турбулизаторами или диафрагмами, где имела место хорошая корреляция теории и эксперимента.

Выявленная в предыдущих теоретических работах автора (например, в [3-5, 9-11, 13, 15, 16]) адекватность существующим экспериментальным данным реализованной расчётной модели для локальных и осреднённых характеристик течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами обусловливает её применение в целях выявления закономерности интегральных (осреднённых) параметров теплообмена в трубах с различными числами Прандтля в зависимости от геометрии канала и режима течения теплоносителя.

В данном исследовании рассматриваются только самые распространённые турбулизаторы полукруглого поперечного сечения, характерные для труб с диафрагмами. Данный вопрос представляется важным, поскольку необходимо знать, для каких чисел Прандтля имеет место более высокая интенсификация теплообмена в зависимости от определяющих параметров.

Расчёт интенсифицированного теплообмена по данному факторизированному контрольно-объёмному методу проводился для наиболее характерных геометрических и режимных характеристик для труб с турбулизаторами (d/D=0,92; 0,90; t/D=0,25; 0,50; 1,00; Re=10^4; 10^5) [7, 8, 26] для довольно широкого диапазона чисел Прандтля Pr=1÷20.

В качестве иллюстрации полученных данным методом расчётных данных на рис. 2-4 приведены характерные расчётные линии тока для труб с поперечными кольцевыми турбулизаторами полукруглого поперечного сечения для рассматриваемых условий течения для закрытых (рис. 2), полуоткрытых (рис. 3) и открытых (рис. 4) впадин (классификация по [11-19]) соответственно.

Рис. 2. Расчётные линии тока для закрытой впадины в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при Re=10^5; d/D=0,92; t/D=0,25
Fig. 2. The calculated streamlines for a closed cavity in a pipe with turbulators with a semicircular cross section at Re = 105; d / D = 0.92; t / D = 0.25

Рис. 3. Расчётные линии тока для полуоткрытой впадины в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при Re=10^4; d/D=0,95; t/D=0,25
Fig. 3. The calculated streamlines for a half-open cavity in the pipe with turbulators with a semicircular cross section at Re = 104; d / D = 0.95; t / D = 0.25

Рис. 4. Расчётные линии тока для открытой впадины в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при Re=10^4; d/D=0,92; t/D=1,00
Fig. 4. The calculated streamlines for the open cavity in the pipe with turbulators with a semicircular cross section at Re = 104; d / D = 0.92; t / D = 1.00

Значения относительного теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ для различных чисел Прандтля при прочих равных условиях рассчитывались для изотермического течения при эквивалентных параметрах как для труб с турбулизаторами, так и без них. Полученные результаты расчёта по предложенной модели для вышеуказанного диапазона определяющих параметров приведены на рис. 5-7, где они распределены по малым (*t/D*=0,25), средним (*t/D*=0,50) и большим (*t/D*=1,00) шагам между турбулизаторами.

Как видно из рис. 5-7, при относительно небольших числах Рейнольдса (Re=10^4) сначала имеет место ощутимое увеличение относительного теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ с увеличением числа Прандтля, затем относительный теплообмен изменяется слабее: для малых шагов имеет место его увеличение, для средних — почти стабилизация, для больших — незначительное снижение.

Рис. 5. Расчётные значения относительного теплообмена Nu/Nu$_{ГЛ}$ для t/D=0,25; d/D=0,92 и 0,90; Re=10^4 и 10^5 в зависимости от числа Прандтля Pr=1÷20

Fig. 5. The calculated values of the relative heat transfer Nu / NuГЛ for t / D = 0.25; d / D = 0.92 and 0.90; Re = 104 and 105 depending on the Prandtl number Pr = 1 ÷ 20

Рис. 6. Расчётные значения относительного теплообмена Nu/Nu$_{ГЛ}$ для t/D=0,50; d/D=0,92 и 0,90; Re=10^4 и 10^5 в зависимости от числа Прандтля Pr=1÷20

Fig. 6. The calculated values of the relative heat transfer Nu / NuГЛ for t / D = 0.50; d / D = 0.92 and 0.90; Re = 104 and 105 depending on the Prandtl number Pr = 1 ÷ 20

При относительно больших числах Рейнольдса (Re=10^5) имеет место снижение относительного теплообмена с увеличением числа Прандтля при практической его стабилизации для наибольших значений из рассматриваемого диапазона чисел Прандтля.

Различие в закономерностях изменения относительного теплообмена в зависимости от числа Прандтля (рис. 5-7) обосновывается тем, что при небольших числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше высоты пристенного слоя [7, 8, 20, 21, 26], а при больших числах Рейнольдса - меньше. Последнее обусловливает турбулизацию только ядра потока, увеличивая только гидравлическое сопротивление, почти не увеличивая теплообмен. Экспериментальное подтверждение приведённых теоретических данных было приведено в работах [7, 8, 20, 21, 26], где анализируются собственно эксперименты авторов, эксперименты [27], а также закономерности для предельного теплообмена [7, 8, 20, 21, 26].

Рис. 7. Расчётные значения относительного теплообмена Nu/Nu$_{ГЛ}$ для t/D=1,00; d/D=0,92 и 0,90; Re=10^4 и 10^5 в зависимости от числа Прандтля Pr=1÷20.

Fig. 7. The calculated values of the relative heat transfer Nu / NuГЛ for t / D = 1.00; d / D = 0.92 and 0.90; Re = 104 and 105 depending on the Prandtl number Pr = 1 ÷ 20.

Ещё одним подтверждением полученных расчётных численных зависимостей являются данные аналитических решений для интенсифицированного теплообмена, полученных по модифицированной четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя [2, 11, 18, 19].

Обсуждение результатов. В рамках данной работы были проведены расчёты для условий, сходных с характерными для вышеупомянутых экспериментов [27] (*d/D*=0,912; *t/D*=0,50; Re=10^4; Pr=1,15÷6,7) [7, 8, 26], которые представлены на рис. 8 (расчётные линии тока представлены на рис. 9), из которого видно, что теоретический характер изменения относительного теплообмена от числа Прандтля полностью сходен с экспериментом [7, 8, 26].

Рис. 8. Расчётные значения относительного теплообмена Nu/Nu$_{ГЛ}$ для d/D=0,912; t/D=0,50; Re=10^4 в зависимости от числа Прандтля Pr=1÷100

Fig. 8. The calculated values of the relative heat transfer Nu / NuГЛ for d / D = 0.912; t / D = 0.50; Re = 104 depending on the Prandtl number Pr = 1 ÷ 100

В классических работах по интенсифицированному теплообмену [7, 8, 26] указывается, что надёжных экспериментальных данных не имеется, но предполагается, что искусственная турбулизация жидкометаллических потоков должна иметь низкую эффективность [7, 8, 26]. В рамках данной работы было проведено моделирование интенсифицированного теплообмена при течении жидких металлов в только в ограниченном диапазоне, поскольку данный аспект не является главным для данной работы, которое показало, что относительный теплообмен для условий вышеупомянутых экспериментов [27] снижается на 12% для Pr=0,5 по отношению к относительному теплообмену для Pr=1; аналогичные снижения для Pr=0,1 и Pr=0,05 составляют 37% и 40% соответственно. Следовательно, теоретически подтверждено, что интенсифицированный теплообмен для жидких металлов ниже, чем для газообразных теплоносителей. Вышесказанное подтверждается и данными аналитических решений для интенсифицированного теплообмена, полученных по модифицированной четырёхслойной модели турбулентного по-

граничного слоя [2, 11, 18, 19].

Рис. 9. Расчётные линии тока для течения в трубе с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения при Re=10^4; d/D=0,912; t/D=0,50

Fig. 9. The calculated streamlines for flow in a pipe with turbulators of a semicircular cross-section at Re = 104; d / D = 0.912; t / D = 0.50

Полученные в работе для ограниченного диапазона определяющих параметров теоретические расчётные данные о снижении уровня интенсификации теплообмена для малых числах Прандтля обусловливают перспективность данного научного направления — в дальнейшем по данной модели можно будет рассчитать относительный теплообмен в трубах с диафрагмами для жидких металлов для широкого диапазона геометрии канала и режима течения теплоносителя.

Вышепредставленный анализ указывает на то, что теоретические данные полностью соответствуют существующему экспериментальному материалу, значительно перекрывая диапазон определяющих параметров последнего. Теоретические данные позволили выявить закономерности относительного теплообмена в зависимости от числа Прандтля в тех областях, где ещё нет надёжных экспериментальных данных.

Вывод. 1. Разработанный и используемый в данном исследовании метод расчёта, основанный на решении конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью моделью переноса сдвиговых напряжений Ментера и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках позволил с приемлемой точностью провести расчёты относительного теплообмена в трубах с полукруглыми кольцевыми турбулизаторами для теплоносителей с различным числами Прандтля.

2. В исследовании был проведён анализ полученных расчётных зависимостей относительного теплообмена от числа Прандтля Pr при различных значениях относительной высоты турбулизатора *h/D*, относительного шага между турбулизаторами *t/D*, при различных значениях числа Рейнольдса Re, при прочих равных условиях, который показал качественные и количественные изменения рассчитываемых параметров.

3. Проведённые в работе расчёты показали, что с увеличением числа Прандтля при малых числах Рейнольдса сначала имеет место заметное увеличение относительного теплообмена, а потом относительный теплообмен изменяется меньше, причём для малых шагов имеет место его увеличение, для средних — почти стабилизация, для больших — незначительное снижение.

4. При больших числах Рейнольдса происходит снижение относительного теплообмена с увеличением числа Прандтля при дальнейшей его стабилизации.

5. Аналитическое обоснование полученных расчётных закономерностей заключается в том, что при малых числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше, а при больших — меньше, высоты пристенного слоя, следовательно, имеет место турбулизация только ядра потока, что приводит только к увеличению гидросопротивления и к неувеличению теплообмена.

6. В работе на основании ограниченного расчётного материала было теоретически подтверждено ощутимое снижение уровня интенсификации теплообмена для малых чисел Прандтля. Полученные результаты интенсифицированного теплообмена в области низких чисел Прандтля обосновывают перспективную разработку исследований в данном направлении.

7. Полученные в работе теоретические данные детерминировали закономерности относительного теплообмена в широком диапазоне чисел Прандтля, в том числе в тех областях, где ещё не существует экспериментального материала.

Библиографический список:

1. Вихревая интенсификация конвективного теплообмена при турбулентном течении воздуха и масла в трубах и каналах с периодическими элементами дискретной шероховатости / С.А.Исаев, И.Е.Лобанов, О.А.Бояркина и др. // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный

теплообмен. М.: МЭИ, 2010. С. 84-87.
2. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 5460.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 223-230.
4. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. 2004. Т. 11. № 2. С. 28-35.
5. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. М.: МЭИ, 2003. Т. 1. С. 57-60.
6. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей / С.А.Исаев, П.А.Баранов, И.Е.Лобанов и др. // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 66.
7. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
8. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
9. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2008. Т. 1. С. 101-103.
10. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. 2011. № 12. С. 4-15.
11. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М., 2005. 632 с.
12. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 12. С. 9-15.
13. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 7. С. 45-58.
14. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей с переменными физическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 144-147.
15. Лобанов И.Е. Структура вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Электронный научный журнал "Исследования технических наук". 2012. Май. Выпуск 4. Том 2. С. 18-24.
16. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование кинетической энергии турбулентных пульсаций и её составляющих в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 1. С. 23-30.
17. Лобанов И.Е., Антюхов И.В. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах с помощью периодически поверхностно расположенных турбулизаторов потока прямоугольного поперечного сечения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3–2(299). С. 22-27.
18. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: Издательство МАИ, 2011. — 160 с.
19. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. – М.: МГАКХиС, 2010. – 288 с.
20. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
21. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. 144 с.
22. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В.Ермишина и С.А.Исаева. М.–СПб, 2001. 360 с.
23. Численное исследование струйно-вихревого механизма интенсификации тепломассообмена в окрестности сферической лунки на плоскости при обтекании её потоком несжимаемой вязкой жидкости с учётом влияния асимметрии формы, естественной конвекции и нестационарных процессов / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, А.Е.Усачов и др. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 121—124.
24. Численные методы исследования течений вязкой жидкости, А.Д.Госмен, В.М. Пан, А.К.Ранчел и др. М.: Мир, 1986. 234 с.
25. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев и др. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
26. Эффективные поверхности теплообмена. Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З.Копп. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
27. Hustrup R.C., Sabersky R.H., Bartz D.F., Noel M.B. // Jet Propulsion. 1958. Vol. 28. № 4. P. 259-263.
28. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32. № 8. P. 1598.

References:

1. Vikhrevaya intensifikatsiya konvektivnogo teploobmena pri turbulentnom techenii vozdukha i masla v trubakh i kanalakh s periodicheskimi elementami diskretnoy sherokhovatosti / S.A.Isayev, I.Ye.Lobanov, O.A.Boyarkina i dr. // Trudy Pyatoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. Tom 6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teploobmen. M.: MEI, 2010. S. 84-87. [Vortex intensification of convective heat exchange in turbulent flow of air and oil in pipes and channels with periodic elements of discrete roughness / S.A.Isaev, I.E.Lobanov, O.A.Boyarkina et al. // Proceedings of the Fifth Russian national confer-

ence on heat exchange. In 8 volumes. Volume 6. Intensification of heat exchange. Radiation and complex heat exchange. Moscow: MEI, 2010. pp. 84–87. (In Russ)]

2. Dreytser G.A., Lobanov I.Ye. Modelirovaniye izotermicheskogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh v usloviyakh intensifikatsii teploobmena // Teploenergetika. 2003. № 1. S. 5460. [Dreitser G.A., Lobanov I.E. Modeling of isothermal heat exchange at turbulent current in channels in conditions intensification of heat transfer // Heat Power engineering. 2003. No. 1. pp. 54–60. (In Russ)]

3. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheski raspolozhennymi poverkhnostnymi turbulizatorami potoka // Teplofizika vysokikh temperatur. 2005. T. 43. № 2. S. 223-230. [Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically arranged surface vortex generators flow // Thermophysics of high temperatures. 2005. V. 43. No. 2. pp. 223–230. (In Russ)]

4. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami // Vestnik MAI. 2004. T. 11. № 2. S. 28-35. [Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions // Bulletin of the MAI. 2004. V. 11. No. 2. pp. 28–35. (In Russ)]

5. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami // Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XIV Shkoly-seminara molodykh uchonykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I.Leont'yeva. M.: MEI, 2003. T. 1. S. 57-60. [Draytser G. A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic projections // Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: Proceedings of the XIV school-seminar of young scientists and specialists under the leadership of academician A. I. Leontiev. Moscow: MEI, 2003. V. 1. pp. 57–60. (In Russ)]

6. Intensifikatsiya teploobmena v trubakh s ob"yomnymi i poverkhnostnymi vikhregeneratorami dlya neodnorodnykh tep-lonositeley / S.A.Isayev, P.A.Baranov, I.Ye.Lobanov i dr. // Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh: Chetvortaya mezhdunarodnaya konferentsiya: tezisy dokladov. - M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2011. S. 66. [Intensification of heat exchange in pipes with volumetric and surface vortex generators for inhomogeneous heat carriers / S.A.Isaev, P.A. Baranov, I.E. Lobanov et al. // Heat and mass Transfer and hydrodynamics in swirling flows: Fourth international conference: Abstracts. – Moscow: Publishing house MEI, 2011. pp. 66. (In Russ)]

7. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye, 1972. 220 s. [Kalinin E.K., Dreitser G.A., Jarcho S.A. Intensification of heat exchange in channels. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 220 p. (In Russ)]

8. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 208 s. [Kalinin E.K., Dreitser G.A., Jarcho S.A. Intensification of heat exchange in channels. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 208 p. (In Russ)]

9. Kalinin E.K., Lobanov I.Ye. Problemy issledovaniya teploobmennykh protsessov pri techeniyakh odnofaznykh sred na etape uspeshnogo razvitiya chislennogo modelirovaniya // Tezisy dokladov i soobshcheniy VI Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu. Minsk, 2008. T. 1. S. 101-103. [Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problems of research of heat exchange processes at flows of single-phase environments at a stage of successful development of numerical modeling / / Abstracts of reports and messages of VI Minsk international forum on heat and mass transfer. Minsk, 2008. V. 1. pp. 101–103. (In Russ)]

10. Lobanov I.Ye., Kalinin E.K. Teoreticheskoye issledovaniye, sopostavleniye s eksperimentom liniy toka i sostavlyayushchikh kineticheskoy energii turbulentnykh pul'satsiy v vikhrevykh strukturakh v trubakh s turbulizatorami // Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk. 2011. № 12. S. 4-15. [Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical research, comparison with experiment of current lines and components of kinetic energy of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators // Branch aspects of technical Sciences. 2011. No. 12. pp. 4–15. (In Russ)]

11. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchonoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. M., 2005. 632 s. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels: Thesis for the degree of doctor of technical Sciences. M., 2005. 632 p. (In Russ)]

12. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki razvitiya vikhrevykh struktur v trubakh s turbulizatorami // Moskovskoye nauchnoye obozreniye. 2013. № 12. S. 9-15. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of dynamics of development of vortex structures in pipes with turbulators. Moscow scientific review. 2013. No. 12. pp. 9–15. (In Russ)]

13. Lobanov I.Ye. Modelirovaniye struktury vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi tur-bulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // Matematicheskoye modelirovaniye. 2012. T. 24. № 7. S. 45-58. [Lobanov I.E. Modeling of the structure of vortex zones between periodic surface-located turbulators of rectangular cross-section flow. Mathematical modeling. 2012. V. 24. No. 7. pp. 45–58. (In Russ)]

14. Lobanov I.Ye. Modelirovaniye teploobmena i soprotivleniya pri turbulentnom techenii v kanalakh teplonositeley s peremennymi fizicheskimi svoystvami v usloviyakh intensifikatsii teploobmena // Trudy Tret'yey Rossiyskoy natsio-nal'noy konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. T.6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teplo-obmen. M.: Izd-vo MEI, 2002. S. 144-147. [Lobanov I.E. Modeling of heat transfer and resistance under turbulent flow in heat transfer media channels with variable physical properties under conditions of heat exchange intensification. Proceedings of the Third Russian national conference on heat exchange. In 8 volumes. Volume. 6. Intensification of heat exchange. Radiation and complex heat exchange. Moscow: MEI Publishing house, 2002. pp. 144–147. (In Russ)]

15. Lobanov I.Ye. Struktura vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Issledovaniya tekhnicheskikh nauk". 2012. May. Vypusk 4. Tom 2. S. 18-24. [Lobanov E.I. Structure of vortex zones between periodic surface-located flow turbulators of rectangular cross-section // Electronic scientific journal "Research of technical Sciences". 2012. Issue 4. Vol. 2. pp. 18–24. (In Russ)]

16. Lobanov I.Ye. Teoreticheskoye issledovaniye kineticheskoy energii turbulentnykh pul'satsiy i yeyo sostavlyayushchikh v trubakh s turbulizatorami // Moskovskoye nauchnoye obozreniye. 2013. № 1. S. 23-30. [Lobanov E.I. Theoretical study of the kinetic energy of turbulent pulsations and its components in pipes with turbulators // Moscow scientific review. 2013. No. 1. pp. 23–30. (In Russ)]

17. Lobanov I.Ye., Antyukhov I.V. Sovremennyye problemy intensifikatsii teploobmena v kanalakh s pomoshch'yu periodi-cheski poverkhnostno raspolozhennykh turbulizatorov potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2013. № 3–2(299). S. 22-27. [Lobanov E.I., Antyukhov I.V. Modern problems of heat transfer intensification in channels with the help of periodically surface-located turbulators of rectangular cross-section flow. fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2013. No. 3–2 (299). pp. 22–27. (In Russ)]

18. Lobanov I.Ye., Paramonov N.V. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri techenii v kanalakh na

osnove slozhnykh modeley turbulentnogo pogranichnogo sloya. — M.: Izdatel'stvo MAI, 2011. — 160 s. [Lobanov E.I., Paramonov N.V. Mathematical modeling of intensified heat transfer during flow in channels based on complex models of turbulent boundary layer. – Moscow: MAI publishing house, 2011. 160 p. (In Russ)]

19. Lobanov I.Ye., Shteyn L.M. Perspektivnyye teploobmennyye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennykh apparatov, primenyayemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom III. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniyem mnogosloynykh, supermnogo-sloynykh i kompaundnykh modeley turbulentnogo pogranichnogo sloya. – M.: MGAKKhiS, 2010. – 288 s. [Lobanov E.I., Stein L.M. Perspective heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels using multilayer, super-multilayer and compound models of turbulent boundary layer. Moscow: MGAKHiS, 2010. 288 p. (In Russ)]

20. Migay V.K. Modelirovaniye teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya. L.: Energoatomizdat. Leningradskoye otdeleniye, 1987. 263 s. [Migaj V.K. Modeling of heat exchange power equipment. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1987. 263 p.

21. Migay V.K. Povysheniye effektivnosti sovremennykh teploobmennikov. L.: Energiya. Leningradskoye otdeleniye, 1980. 144 s. [Migaj V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers. – Leningrad: Energy. Leningrad branch, 1980. 144 p.

22. Upravleniye obtekaniyem tel s vikhrevymi yacheykami v prilozhenii k letatel'nym apparatam integral'noy komponovki (chislennoye i fizicheskoye modelirovaniye) / Pod red. A.V.Yermishina i S.A.Isayeva. M.–SPb, 2001. 360 c. [Control of the flow of bodies with vortex cells in the application to aircraft integrated layout (numerical and physical modeling) / Ed. A.V.Ermishin and S.A.Isaev. St. Petersburg, 2001. 360 p. (In Russ)]

23. Chislennoye issledovaniye struyno-vikhrevogo mekhanizma intensifikatsii teplomassoobmena v okrestnosti sfericheskoy lunki na ploskosti pri obtekanii yeyo potokom neszhimayemoy vyazkoy zhidkosti s uchotom vliyaniya asimmetrii formy, yestestvennoy konvektsii i nestatsionarnykh protsessov / S.A.Isayev, A.I.Leont'yev, A.Ye.Usachov i dr. // Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. T.6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teploobmen M.: Izd-vo MEI, 1998. S. 121—124. [Numerical study of jet-vortex mechanism of intensification of heat and mass transfer in the vicinity of a spherical well on the plane when the flow of incompressible viscous fluid flows taking into account its influence of shape asymmetry, natural convection and unsteady processes / S.A.Isaev, A.I.Leontiev, A.E.Usachov et al. // Proceedings of the second Russian national conference on heat exchange. In 8 volumes. Vol. 6. Intensification of heat exchange. Radiation and complex heat transfer. – Moscow: MEI Publishing house, 1998. pp. 121–124. (In Russ)]

24. Chislennyye metody issledovaniya techeniy vyazkoy zhidkosti / A.D.Gosmen, V.M. Pan, A.K.Ranchel i dr. M.: Mir, 1986. 234 s. [Numerical methods for the study of viscous fluid flows / A.D.Gosman, V.M.Pan, A.K.Ranchel et al. Moscow: Mir, 1986.– 234 p. (In Russ)]

25. Chislennoye modelirovaniye vikhrevoy intensifikatsii teploobmena v paketakh trub / YU.A.Bystrov, S.A.Isayev, H.A.Kudryavtsev i dr. SPb: Sudostroyeniye, 2005. 398 s. [Numerical simulation of vortex intensification of heat transfer in pipe packages / Y.A.Bystrov, S.A.Isaev, H.A.Kudryavtsev et al. St. Petersburg: Sudostroenie, 2005. 398 p. (In Russ)]

26. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena / E.K.Kalinin, G.A.Dreytser, I.Z.Kopp i dr. M.: Energoatomizdat, 1998. 408 s. [Effective heat transfer surfaces / E.K.Kalinin, G.A.Dreitzer, I.Z.Kopp et al. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 408 p. (In Russ)]

27. Hustrup R., Sabersky R.H., Bartz D.F., Noel M.B. // Jet propulsion. 1958. V. 28. No. 4. pp. 259–263.

28. Menter F.R. Turbulence models with two vortex viscosity equations for engineering applications / / AIAA J. 1994. V. 32. No. 8. pp. 1598.

Сведения об авторе:

Игорь Евгеньевич Лобанов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории (ПНИЛ) – 204. e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Information about the author.

Igor' E.Lobanov , Dr. Sci. (Technical), Leading researcher, Problematic scientific-research Laboratory – 204 e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 04.11.2019.

Принята в печать 22.11.2019.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 04.11.2019.

Accepted for publication 22.11.2019.