

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4: 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-6-12



Оригинальная статья /Original article

**Моделирование интенсифицированного теплообмена в каналах с диафрагмами в ламинарной, переходной и турбулентной областях для перспективных теплообменников ракетно-космической техники**

**И.Е. Лобанов**

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

**Резюме. Цель.** Целью исследования является численное низкорейнольдсовое моделирование теплоотдачи в трубе с выступами полукруглых поперечных профилей с критериями Рейнольдса, характерными для ламинарных, переходных и турбулентных течений теплоносителей. **Метод.** Реализованные методом (ФКОМ-ом) в статье были сгенерированы как местные, так и интегральные, как стационарные, так и нестационарные характеристики потока и теплоотдачи в трубе с внутренними рёбрами при переходных и ламинарных поточных режимах теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с имеющимися опытными данными. **Результат.** Моделирование теплообмена на воздухе в трубах с турбулизаторами на базе низкорейнольдсовой модели Менгера при высоких числах Рейнольдса вплоть до миллиона обуславливает перспективное моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами данным методом и при более высоких числах Рейнольдса. **Вывод.** Модель адекватно описывает реализуемые явления интенсифицированной теплоотдачи для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течений теплоносителя с широким диапазоном чисел Прандтля. Полученные закономерности могут использоваться при инженерном и научном расчете интенсифицированного ламинарного, переходного и турбулентного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, применяемых, в том числе, в авиационной и ракетно-космической технике.

**Ключевые слова:** моделирование, теплоотдача, интенсификация, турбулизатор, теплообменный аппарат, режим течения, авиационный, ракетный, космический, диафрагма

**Для цитирования:** И.Е. Лобанов. Моделирование интенсифицированного теплообмена в каналах с диафрагмами в ламинарной, переходной и турбулентной областях для перспективных теплообменников ракетно-космической техники. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):6-12. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-6-12

**Modeling of intensified heat exchange in channels with diaphragms in laminar, transitional and turbulent regions for promising heat exchangers of rocket and space technology**

**I.E.Lobanov**

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4 Volokolamskoe highway, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is numerical low-Reynolds modeling of heat transfer in a pipe with protrusions of semicircular transverse profiles with Reynolds criteria characteristic of laminar, transitional and turbulent flows of coolants. **Method.** Implemented by the method (FCOM-om) in the article, both local and integral, both stationary and non-stationary characteristics of flow and heat transfer in a pipe with internal ribs were generated in transient and laminar flow modes of the coolant, which made it possible to determine for these modes the levels of heat transfer intensification, which satisfactorily correlate with the available experi-

mental data. **Result.** The successful modeling of air heat transfer in pipes with turbulators based on the low-Reynolds Mentor model at high Reynolds numbers up to one million determines the promising modeling of heat transfer in pipes with turbulators by this method and at higher Reynolds numbers. **Conclusion.** Therefore, the applied model adequately describes the realized phenomena of intensified heat transfer for laminar, transient and turbulent modes of coolant flows with a wide range of Prandtl numbers. The obtained patterns can be used in the engineering and scientific calculation of intensified laminar, transient and turbulent heat transfer during flow in channels with protrusions used in promising heat exchangers used, among other things, in aviation and rocket and space technology.

**Keywords:** modeling, heat transfer, intensification, turbulator, heat exchanger, flow mode, aviation, rocket, space, diaphragm

**For citation:** I.E. Lobanov. Modeling of intensified heat exchange in channels with diaphragms in laminar, transitional and turbulent regions for promising heat exchangers of rocket and space technology. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52 (1): 6-12. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-6-12

**Введение.** В разнообразных областях техники распространены различные типы трубчатых теплообменных аппаратов и теплообменных устройств, где, в результате интенсифицирования теплоотдачи может быть достигнуто снижение их массо- и габаритных показателей для заданного значения тепловых потоков, гидropотерь, расхода и температурного уровня теплоносителя. Нередко задача заключается в снижении температурных уровней поверхностей теплосъёма при фиксированном режимном и конструктивном наборе характеристик.

Расчётные способы исследований интенсификаций теплообмена при турбулентных потоках в трубах разработаны ещё недостаточно [1, 2]. Чаще всего эти методы базируются на упрощённых моделях сложного физического явления, а сумма допущений приводит к заметному различию между расчётным и экспериментальным материалом [3, 4]. Кроме того, теоретические исследования в данном направлении довольно разрозненны и узкоограниченны [5-9].

**Постановка задачи.** В связи с этим, возникает необходимость разработки современных, уточнённых по сравнению с существующими, теоретических методов исследований интенсифицированного теплообмена при ламинарном, переходном, турбулентном течениях в трубах.

В рамках данной статьи под интенсификацией понимается использование искусственных турбулизаторов потока на поверхности [10-12].

Моделирование рассматривает 2-мерные поверхности с выступами, что применимо и для трубы с периодической диафрагмой. Течения в каналах могут быть ламинарных и переходных режимов для вязких теплоносителей (напр., масла) и турбулентных режимов для газовых теплоносителей (например, воздух).

**Методы исследования.** Рассмотрим методы моделирования течения и теплообмена для этих условий. Для ламинарных и переходных течений ( $Re=10^2 \div 10^4$ ) результаты моделирования будут нижеследующими. В переходных режимах у потоков перемежаемости потоков в переходных режимах обуславливают колеблющийся характер коэффициента теплоотдачи [10-12].

Теоретические исследования теплоотдачи при её интенсификации для потоков со слабой турбулентностью и в переходных областях производилось в ощутимо меньших объёмах, нежели для областей с развитой турбулентностью. Интенсифицирование теплоотдачи в переходных диапазонах потоков изучалось теоретическим способом для выступов с трансверсальными профилями в форме полукругов на многоблоковых численных технологиях, на расчётах факторизованными конечно-объёмными технологиями (ФКОМ-ами) рейнольдсового уравнения и энергетического уравнения [13, 14]. Численные

расчёты показали, что интенсифицирование теплосъёма будет происходить с некоторых критериев Рейнольдса, а для низких критериев Рейнольдса оно незначительно. Также были рассчитаны линии токов для переходных условий течения, которые значительно различаются при увеличении критерия Рейнольдса  $Re=2 \cdot 10^3 \div 10^4$ , что обосновывает качественное увеличение интенсификации теплообмена [15, 16].

Низкорейнольдсовая ламинарная область изучена опытным образом и было установлено, что при  $Re \approx 1600$  режим течения становится переходным, поскольку качественно меняется характер изменения гидравлического сопротивления [17–19, 3, 20].

Моделирования режимов выше  $Re > 1600$  ( $Re=1,6 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^3$ ) и далее вплоть до  $Re=2,4 \cdot 10^3$  производилось так же, как и для турбулентного потока апробированным способом [15, 16].

**Обсуждение результатов.** В работе получена расчётная информация по интенсифицированной теплоотдаче и гидросопротивлению для рассматриваемых условий ( $Re=10^2 \div 2,4 \cdot 10^3$ ;  $d/D=0,80 \div 0,92$ ;  $t/D=0,33 \div 1,22$ ;  $Pr=170 \div 320$ ).

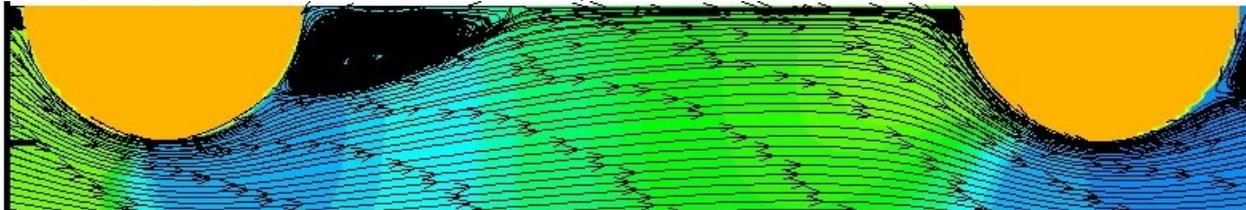
Максимальные значения относительного теплообмена составили  $Nu/Nu_{гл} \approx 2,5$  при  $Re=2,4 \cdot 10^3$ ;  $d/D=0,80$ ;  $t/D=0,66$ ;  $Pr=250$ , а относительное гидросопротивление были наибольшими при  $\xi/\xi_{гл} \approx 2,5$  при  $Re=2,4 \cdot 10^3$ ;  $d/D=0,80$ ;  $t/D=0,33$ ;  $Pr=250$ .

Для более низких турбулизаторов  $d/D=0,86$  вышеуказанные значения ниже:  $Nu/Nu_{гл} \approx 2,3$  при  $\xi/\xi_{гл} \approx 2,3$  при тех же условиях идентичности.

При уменьшении высоты турбулизатора до параметра  $d/D=0,92$  вышеуказанные относительные параметры будут ещё меньшими. Минимальные значения относительного теплообмена имели место в ламинарной области течения при  $Re=10^2$ :  $Nu/Nu_{гл} \approx 0,90 \div 0,95$  при относительных гидросопротивлениях  $\xi/\xi_{гл} \approx 1,15 \div 1,75$ .

Интенсифицирование теплоотдачи проявляется в ламинарной области при  $Re=10^3$ , когда значения относительного интенсифицированного гидросопротивления  $\xi/\xi_{гл} \approx 1,35 \div 2,25$ . Полученные в исследовании расчётные данные хорошо согласуются с аналогичными данными, ранее полученными автором [13, 15, 16].

В качестве иллюстрации на рис. 1 для определённых течений приведены вычисленные линии тока между рёбрами с полукруглым трансверсальным профилем, вычисленным на основах реализованной в статье ментеровской модели (для транзитивного диапазона), что характерно для переходных и ( $Re=2 \cdot 10^3 \div 10^4$ ;  $d/D=0,875 \div 0,983$ ;  $t/D=0,486 \div 1,987$ ;  $Pr=0,72 \div 50$ ) (рис. 2) и ламинарных (рис. 1) режимов течений ( $Re=10^2 \div 1,5 \cdot 10^3$ ;  $d/D=0,80 \div 0,92$ ;  $t/D=0,33 \div 1,94$ ;  $Pr=170 \div 320$ ).



**Рис. 1 - Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при  $t/D=0,66$ ,  $d/D=0,80$ ,  $Pr=170$ ,  $Re=10^2$  (ламинарное течение)**

**Fig. 1 - Streamlines for a pipe with protrusions of a semicircular transverse profile at  $t/D=0.66$ ,  $d/D=0.80$ ,  $Pr=170$ ,  $Re=10^2$  (laminar flow)**

Течения в каналах теплообменных аппаратов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике, для газовых теплоносителей могут быть и турбулентных режимов, поскольку для этих режимов имеет место большая теплоотдача, чем при невысоких числах Рейнольдса. Были проведены также численные исследования для более высоких критериев Рейнольдса для труб с турбулизаторами:  $Re=10^4 \div 10^6$ .

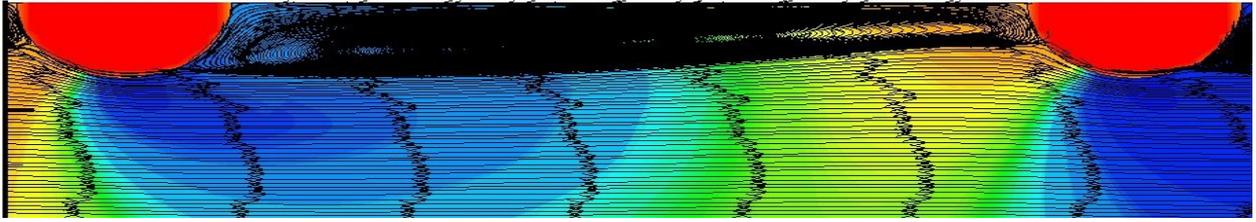


Рис. 2 - Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при  $t/D=0,66$ ,  $d/D=0,86$ ,  $Pr=250$ ,  $Re=2,4 \cdot 10^3$  (переходное течение)

Fig. 2 - Streamlines for a pipe with protrusions of a semicircular transverse profile at  $t/D=0.66$ ,  $d/D=0.86$ ,  $Pr=250$ ,  $Re=2.4 \cdot 10^3$  (transitional flow)

Влияние на интегральные характеристики течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами ( $d/D=0,95 \div 0,90$  и  $t/D=0,25 \div 1,00$ ) структуры интенсифицированного потока при больших числах Рейнольдса  $Re=10^6$  выглядит нижеследующим образом.

Расчётные данные по теплообмену на воздухе в трубах с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения, полученные по сгенерированной в данной работе теории, очень хорошо согласуются с существующим экспериментом для больших чисел Рейнольдса ( $Re=4 \cdot 10^5$ ), а также для несколько меньших чисел Рейнольдса ( $Re=2 \cdot 10^5$ ). Кроме того, эти данные хорошо согласуются и с теоретическими данными, полученными по независимой четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя [16] по осреднённому теплообмену, в то время как данные по низкорейнольдсовой модели позволяют рассчитать и локальный теплообмен. Последнее обосновывает, что этот метод обоснованно применять и для более высоких чисел Рейнольдса для вышеуказанных геометрических параметров труб.

Полученные расчётные данные по интенсифицированному теплообмену в трубах с полукруглыми турбулизаторами на воздухе для  $d/D=0,90$ ,  $t/D=0,25 \div 1,00$ ,  $Re=10^6$ , относительный теплообмен  $Nu/Nu_{гл}$  ещё более увеличивается по сравнению с меньшими значениями числа Рейнольдса, что, естественно, сопровождается ещё бóльшим увеличением гидравлического сопротивления.

Как показывают полученные расчётные данные по интенсифицированному теплообмену в трубах с полукруглыми турбулизаторами на воздухе для  $d/D=0,95$ ,  $t/D=0,25 \div 1,00$ ,  $Re=10^6$ , относительный теплообмен  $Nu/Nu_{гл}$  увеличивается с ростом числа Рейнольдса по сравнению с меньшими значениями числа Рейнольдса гораздо меньше, чем при более высоких турбулизаторах с  $d/D=0,95$  и  $t/D=0,25$  и  $t/D=0,50$ , а при  $d/D=0,95$  и  $t/D=1,00$  роста относительного теплообмена не происходит (рис. 3).

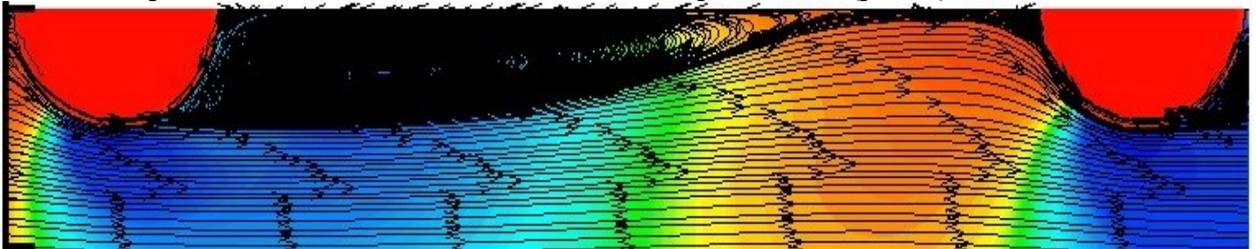


Рис. 3 - Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при  $t/D=0,50$ ,  $d/D=0,90$ ,  $Pr=0,72$ ,  $Re=10^6$  (турбулентное течение)

Fig. 3 - Streamlines for a pipe with protrusions of a semicircular transverse profile at  $t/D=0.50$ ,  $d/D=0.90$ ,  $Pr=0.72$ ,  $Re=10^6$  (turbulent flow)

В отличие от аналогичных случаев с  $d/D=0,90$  рост теплоотдачи при  $d/D=0,95$  сопровождается гораздо меньшим увеличением гидравлического сопротивления, что обусловлено уменьшением генерации дополнительных вихреобразований в последнем случае.

Следовательно, интенсификация теплообмена при больших числах Рейнольдса (порядка  $Re=10^6$ ) может быть даже несколько сильнее, чем для меньших критериев Рейнольдса (порядка  $Re=4 \cdot 10^5$ ) для относительно высоких турбулизаторов потока (порядка  $d/D=0,90$ ), однако здесь придётся ощутимым образом повысить уровень гидро-

потерь. Для более низких турбулизаторов (порядка  $d/D=0,95$ ) интенсификация теплообмена при больших числах Рейнольдса (порядка  $Re=10^6$ ) не всегда выше [16], чем для меньших чисел Рейнольдса (порядка  $Re=4\cdot 10^5$ ), но и достигается это для малых и средних шагов между турбулизаторами (порядка  $t/D=0,25$  и  $t/D=0,50$ ) при менее ощутимых гидрпотерях.

Полученные по низкорейнольдсовой модели данные по интенсифицированному теплообмену в трубах с турбулизаторами соответствуют физическим представлениям реализуемых процессов. Как показывает анализ полученных для сравнений данных по теплосъёму для шероховатых каналов для больших чисел Рейнольдса  $Re=10^6$ , относительный теплообмен в шероховатых трубах приближается к относительному теплообмену в трубах с турбулизаторами с  $t/D=0,50$  при  $d/D=0,90$  и с  $t/D=0,25$  при  $d/D=0,95$ .

В более ранних работах [10] был установлен вывод, что по мере повышения критерия Рейнольдса относительный теплообмен в шероховатых трубах приближается к относительному теплообмену в трубах с турбулизаторами с малыми относительными шагами промежутка турбулизаторами  $t/D$ . Последнее обосновывает, что и при ещё большем увеличении числа Рейнольдса, вплоть до  $Re=10^6$ , данная тенденция сохраняется, что подтверждается полученным расчётными данными для условий течения воздуха в трубах с турбулизаторами с  $d/D=0,95\div 0,90$ ,  $t/D=0,25\div 1,00$ .

Для верификации полученных данных по интенсифицированному теплообмену в трубах с турбулизаторами для высоких чисел Рейнольдса  $Re=10^6$ , полученных по сгенерированному в данной статье способу, были произведены соответствующие расчётные работы по способам, которые использовались в ранних исследованиях [13, 15, 16].

Как показали расчёты теплообмена для 12-ти секций турбулизаторов по методу [13, 15, 16], различие промежутка между ним и сгенерированными в настоящей статье способом составит в пределах  $(3\div 4)\%$ , но сходимость настоящего способа более быстрая, примерно на пару порядков по времени с увеличением точностей базовых характеристик с  $10^{-4}$  для метода [13, 15, 16] до  $10^{-5}$  для настоящего способа.

Результаты исследования доказывают преимущество метода, разработанного в данной научной статье. Проведённое в данной статье успешное моделирование теплообмена на воздухе в трубах с турбулизаторами при  $d/D=0,95\div 0,90$ ,  $t/D=0,25\div 1,00$  на базе низкорейнольдсовой модели Менгера при высоких числах Рейнольдса вплоть до  $Re=10^6$  обуславливает перспективное моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами данным методом и при более высоких числах Рейнольдса.

Следовательно, применённая модель адекватно описывает реализуемые явления интенсифицированной теплоотдачи для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течений теплоносителя с широким диапазоном чисел Прандтля.

**Вывод.** В данном научном исследовании были произведены математические моделирования теплосъёмов в каналах с внутренним оребрением полукруглого поперечного профилирования с числами О.Рейнольдса, которые были характерны для переходного ( $Re=2\cdot 10^3\div 10^4$ ) и ламинарного ( $Re=10^2\div 2\cdot 10^3$ ) и гидрорежима, на основаниях разноточных численных технологий, сформированных на расчетах конечно-объемным факторизованным способом рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений, и выявлены уровни интенсифицирования теплосъёмов для этих условий в широком диапазоне критерия Прандтля.

Получены результаты по интенсификации теплоотдачи для более высоких чисел Рейнольдса ( $Re\leq 10^6$ ) для воздуха, которая может быть выше при ощутимом увеличении гидросопротивления, чем для меньших чисел ( $Re=4,0\cdot 10^5$ ), для относительно высоких турбулизаторов потока  $d/D=0,90$  для всего рассматриваемого диапазона относительных шагов между ними  $t/D=0,25\div 1,00$ , превышая значения для шероховатых труб; а при более низких турбулизаторах с  $d/D=0,95$  происходит определённое увеличение относительного (безразмерного) теплообмена для больших чисел Рейнольдса ( $Re=10^6$ ) сравнительно с меньшими числами ( $Re=4,0\cdot 10^5$ ) только при малых шагах между турбулизаторами

с  $t/D=0,25$ , приближаясь к значениям для шероховатых труб, а при увеличении относительного шага между турбулизаторами ( $t/D=0,50\div 1,00$ ) этого увеличения почти не происходит.

Реализованные методом (ФКОМ-ом) в статье были сгенерированы как местные, так и интегральные, как стационарные, так и нестационарные характеристики потока и теплоотдачи в трубе с внутренними рёбрами при переходных и ламинарных поточных режимов теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с имеющимися опытными данными.

Полученные закономерности могут использоваться при инженерном и научном расчёте интенсифицированного ламинарного, переходного и турбулентного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, применяемых, в том числе, в авиационной и ракетно-космической технике.

#### Библиографический список:

1. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
2. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. 144 с.
3. Гортышов Ю.В., Олимпиев В.В. К вопросу об интенсификации теплообмена посредством сферических выемок // Известия вузов. Авиационная Техника. 1999. № 3. С. 54-58.
4. Гортышов Ю.В., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. Казань: КГТУ им. А.Н.Туполева, 1999. 175 с.
5. Kant K., Qayoum A. Numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a ribbed heated duct with variable aspect ratios. *Recent Trends in Fluid Mechanics*. 2016;3(1): 23-37.
6. Saha S.K., Dayanidhi G.L. Thermo-Fluid Characteristics of Laminar Flow of Viscous Oil through a Circular Tube having Integral Helical Corrugations and Fitted with Centre-Cleared Twisted-Tape. *Heat Mass Transfer*. 2012;48:2059-2068.
7. Tanda G. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45-Deg Angled Rib Turbulators on One/Two Walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011; February. 54 (54):1081-1090.
8. Менялкина Е.Н. Исследование влияния формы оребрения на динамику потока и сопротивление канала // Альманах современной науки и образования. 2017. № 4-5 (118). С. 65-68.
9. Park J., Park S., Ligrani P. M. Numerical predictions of detailed flow structural characteristics in a channel with angled rib turbulators. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;November.29 (11): 4981-4991.
10. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З. Эффективные поверхности теплообмена. Москва : Энергоатомиздат, 1998. 407 с.
11. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
12. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
13. 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.
14. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
15. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами в области перехода к турбулентному течению // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. Том 1. № 13. С. 60-65.
16. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 9. С. 8-18.
17. Назмеев Ю.Г., Олимпиев В.В., Шинкевич О.П. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при ламинарном течении вязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью // Теплоэнергетика. 1993. № 4. С. 66-69.
18. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998. 372 с.
19. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
20. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzrohren // *Forsch. Ing.-Wes.* 1974; 40(4):117-119.

### References:

1. Migai V.K. Modeling of heat exchange power equipment. L.: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1987:263 (In Russ.)
2. Migai V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers. L.: Energiya. Leningrad branch, 1984:144(In Russ.)
3. Gortyshov Yu.V., Olympiev V.V. On the issue of intensification of heat transfer by means of spherical recesses. *Izvestiya vuzov. Aviation Equipment*. 1999;3:54-58. (In Russ.)
4. Gortyshov Yu.V., Olympiev V.V. Heat exchangers with intensified heat exchange. Kazan: KSTU named after A.N.Tupolev, 1999;175. (In Russ.)
5. Kant K., Qayoum A. Numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a ribbed heated duct with variable aspect ratios. *Recent Trends in Fluid Mechanics*. 2016;3(1): 23-37.
6. Saha S.K., Dayanidhi G.L. Thermo-Fluid Characteristics of Laminar Flow of Viscous Oil through a Circular Tube having Integral Helical Corrugations and Fitted with Centre-Cleared Twisted-Tape. *Heat Mass Transfer*. 2012;48:2059-2068.
7. Tanda G. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45-Deg Angled Rib Turbulators on One/Two Walls . *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011;. February. 54 (54):1081-1090.
8. Menyalkina E.N. Investigation of the influence of the fin shape on the flow dynamics and channel resistance. *Almanac of modern science and education*. 2017; 4-5 (118): 65-68. (In Russ.)
9. Park J., Park S., Ligrani P. M. Numerical predictions of detailed flow structural characteristics in a channel with angled rib turbulators. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015; November.29 (11): 4981-4991.
10. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Kopp I.Z. Effective heat transfer surfaces. Moscow : Energoatomizdat, 1998;. 407 (In Russ.)
11. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. M.: Mashinostroenie, 1972;220 (In Russ.)
12. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. M.: Mashinostroenie, 1990;208 (In Russ.)
13. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of current lines and kinetic energy components of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators. *Branch aspects of Technical Sciences*. 2011;12: 4-15. (In Russ.)
14. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Leontiev A.I. Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages. St. Petersburg: Shipbuilding, 2005; 398 (In Russ.)
15. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators in the field of transition to turbulent flow. *Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2019;1(13):60-65. (In Russ.)
16. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators, as well as in rough pipes, in air at high Reynolds numbers. *Branch aspects of Technical Sciences*. 2013; 9:8-18. (In Russ.)
17. Nazmeev Yu.G., Olympiev V.V., Shinkevich O.P. Heat transfer and hydraulic resistance during laminar flow of viscous liquid in pipes with artificial roughness. *Thermal power engineering*. 1993;4:66-69. (In Russ.)
18. Nazmeev Yu.G. Heat transfer during laminar fluid flow in discretely rough channels. M.: Energoatomizdat, 1998;372. (In Russ.)
19. Nazmeev Yu.G., Lavygin V.M. Heat exchangers of thermal power plants. M.: Energoatomizdat, 1998;288 (In Russ.)
20. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzrohren. *Forsch. Ing.-Wes*. 1974; 40(4):117-119.

### Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МА, igorlobanow0@yandex.ru; ORCID 0000-0001-8421-0248

### Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, PNIL-204 MA, igorlobanow0@yandex.ru; ORCID 0000-0001-8421-0248

### Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 10.12.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 21.01.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 22.01.2025.