

УДК 532.517.4 : 536.24

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ В ЛАМИНАРНОЙ ОБЛАСТИ И В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОМУ ТЕЧЕНИЮ

Лобанов И.Е.

*Аннотация:* осуществлено математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами при низких числах Рейнольдса, характерных для ламинарного ( $Re=10^2 \div 1,5 \cdot 10^3$ ) и переходного ( $Re=1,6 \cdot 10^3 \div 10^4$ ) режимов течений теплоносителей, которые ранее исследовались преимущественно экспериментально. Рассматривалось решение задачи о теплообмене для турбулизаторов потока полукруглого поперечного сечения на основе многоблочных вычислительных технологий, основанных на решении факторизованным конечно-объёмным методом (ФКОМ) уравнений Рейнольдса (замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера) и уравнения энергии (на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках). Данный метод ранее был успешно применён и верифицирован экспериментом для более высоких чисел Рейнольдса.

*Ключевые слова:* теплообмен, моделирование, поток, присоединение, труба, канал, турбулизатор, течение, ламинарный, турбулентный, переходный.

Традиционным и очень хорошо практически апробированным методом смерчевой интенсификации теплоотдачи является использование циклических выступов на стенках поверхности омывания [1].

Структурные исследования интенсифицированных течений, как правило, производились экспериментальными методами [1, 2], в то время как в плане расчёта были использованы преимущественно интегральный и приближённый подходы к при решении этой задачи.

Кроме экспериментального исследования, интенсификация теплообмена в переходном диапазоне течений исследовалась теоретически для выступа с поперечным профилем в виде полукруга на базе многоблоковой численной технологии, базирующейся на вычислениях факторизованных конечнообъёмных технологиях (ФКОМ-ах) рейнольдсовых уравнений (замыкаемых моделями переносовых менгеровских сдвиговых напряжений) и энергетических уравнений (на неравномасштабной структурированной пересамосекающейся сетке) [3].

Численный расчёт показал, что интенсификация теплообмена будет иметь место с определённых чисел Рейнольдса, а для малых чисел Рейнольдса она незначительна.

Также были рассчитаны линии токов для переходных условий течения, которые значительно различаются при увеличении числа Рейнольдса  $Re=2 \cdot 10^3 \div 10^4$ , что обосновывает качественное увеличение интенсификации теплообмена [3].

Были проведены также численные исследования для более высоких чисел Рейнольдса для труб с турбулизаторами:  $Re=10^4 \div 10^6$ , а затем и для  $Re=10^6 \div 10^{10}$  [4].

Успешное проведение математического моделирования для турбулентного и переходного режимов течения теплоносителя обосновывает применение этого метода для более низких чисел Рейнольдса, т.е. для ламинарной области, которая экспериментально исследовалась для трансформаторного масла в [5].

В данной работе исследовались также аналогичные течения и теплообмен для неньютоновских жидкостей [5], уровень интенсификации теплообмена который может превышать ньютоновские.

В качестве иллюстраций на рис. 1—8 для некоторых условий течения показаны расчётные линии токов между выступами с полукруглыми поперечными профилями, вычисленные на основе реализованных в работе низкорейнольдсовых ментеровых моделей (для транзитивных диапазонов), характерные для переходного ( $Re=2 \cdot 10^3 \div 10^4$ ;  $d/D=0,875 \div 0,983$ ;  $t/D=0,486 \div 1,987$ ;  $Pr=0,72 \div 50$ ) (рис. 1—4) и ламинарного (рис. 5—8) и режимов течений ( $Re=10^2 \div 1,5 \cdot 10^3$ ;  $d/D=0,80 \div 0,92$ ;  $t/D=0,33 \div 1,94$ ;  $Pr=170 \div 320$ ). Величина температурного фактора (отношения температуры стенки к среднемассовой температуре масла):  $1,07 \div 1,15$  [5].

В переходных режимах потока искусственные турбулизаторы оказывают неоднозначное воздействие на характер течения в каналах с турбулизаторами.

С одной стороны, они являются генератором возмущения, генерируют дополнительное турбулентное возмущение к уже существующему в течении естественному турбулентному возмущению. С другой стороны, турбулизаторы, достигая определённой относительной высоты, коммуницируют с турбулизированными участками перемежающихся течений и содействуют быстрому генерированию возмущения турбулентности, разрастающихся до размеров проходных сечений канала — так называемых "пробок турбулентности".

Ротация отрезков каналов, имеющих структуры, обладающие как турбулентной, так и ламинарной характеристикой, то есть промежутки с перемежаемостями течения в переходных участках, генерирует изменение в условиях для теплосъёмов в определённых установленных сечениях каналов, следовательно имеются колеблющиеся коэффициенты теплосъёма.

У граничных условий 2-го рода, то есть для регулируемой подачи тепловой энергии, непостоянство коэффициентов теплосъёмов проявляются в

колебании у температуры стенок с определённой амплитудой в зависимости от целого ряда факторов: максимальных значений коэффициентов теплосъёмов, что согласуется с турбулентным режимом и ламинарным режимом режимами потоков в трубах для определённых критериев Рейнольдса и Струхала, то есть частотой колебаний; величиной термических нагрузок; методов подводов тепловой нагрузки; от величин и баланса для теплоёмкости стенки и теплоёмкости жидкости.

К наружным проявлениям взаимодействия в потоке искусственных поверхностных выступов в пространствах с транзитивными потоками возможно детерминировать нижеследующие:

уменьшение величин среднего временного коэффициента теплосъёма на участках канала при ламинарном режиме течения;

определённо предварительная генерация перемежаемостей потоков с одновременными сужениями промежутков критериев Рейнольдса их осуществления;

генерация эффекта интенсифицирования теплоотдачи на отрезках со слаборазвитой структурной турбулизацией потоков;

уменьшение критических  $Re_{кр}$  чисел Рейнольдса.

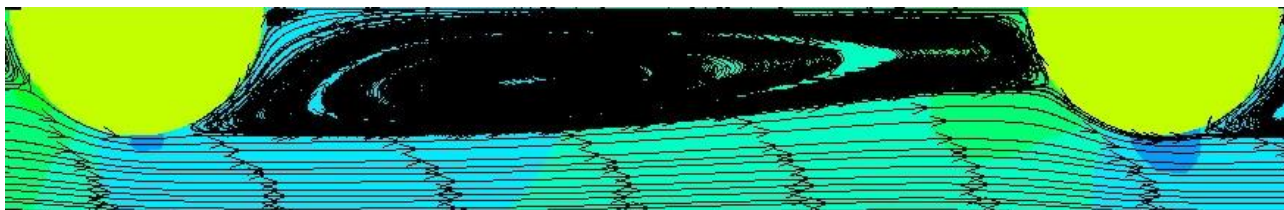


Рис. 1 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,496$ ,  $d/D=0,875$ ,  $Pr=0,72$ ,  $Re=10^4$ .

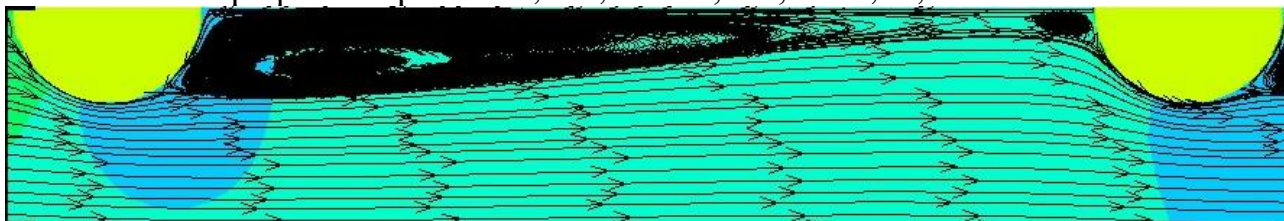


Рис. 2 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,500$ ,  $d/D=0,912$ ,  $Pr=0,72$ ,  $Re=2 \cdot 10^3$ .

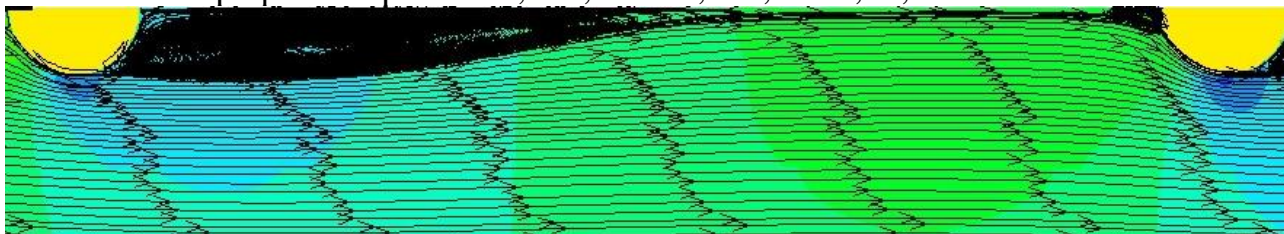


Рис. 3 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,497$ ,  $d/D=0,943$ ,  $Pr=0,72$ ,  $Re=10^4$ .

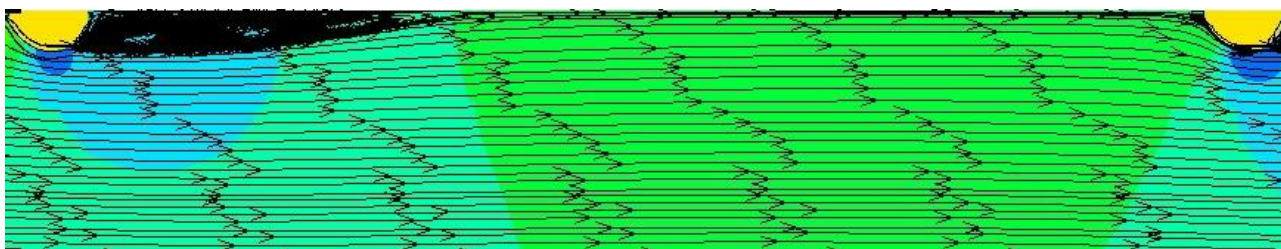


Рис. 4 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,498$ ,  $d/D=0,966$ ,  $Pr=0,72$ ,  $Re=10^4$ .

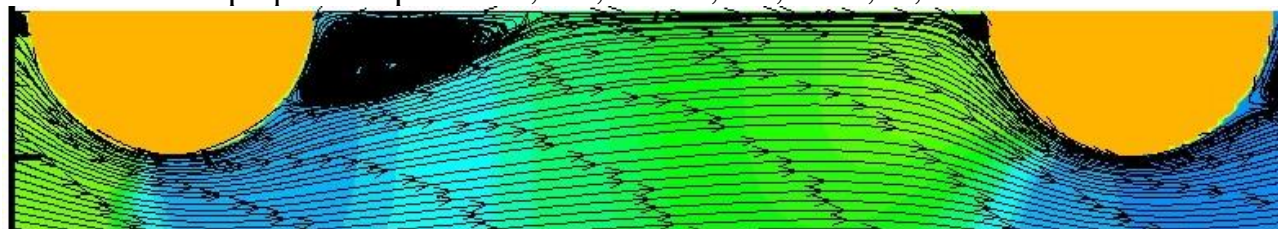


Рис. 5. Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,66$ ,  $d/D=0,80$ ,  $Pr=170$ ,  $Re=10^2$ .

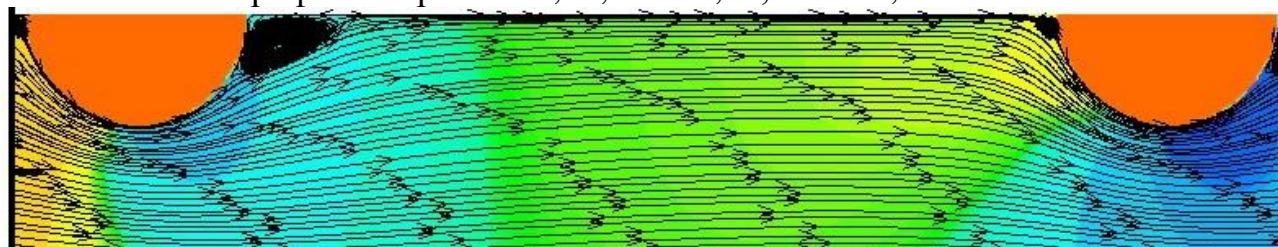


Рис. 6 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,66$ ,  $d/D=0,86$ ,  $Pr=170$ ,  $Re=10^2$ .

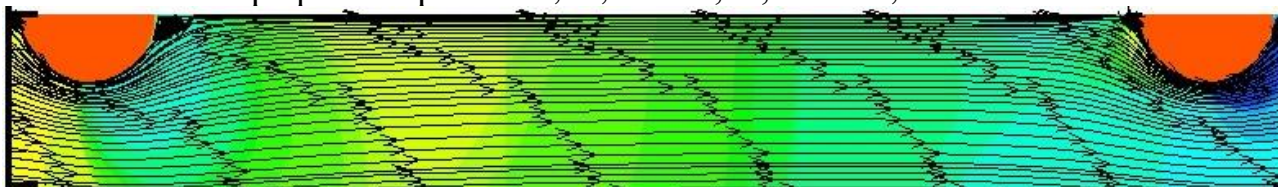


Рис. 7 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,66$ ,  $d/D=0,92$ ,  $Pr=170$ ,  $Re=10^2$ .

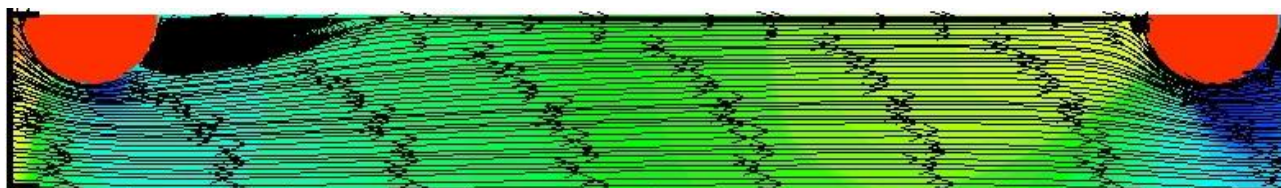


Рис. 8 Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при  $t/D=0,66$ ,  $d/D=0,92$ ,  $Pr=170$ ,  $Re=10^3$ .

Представленные данные по токовым линиям в каналах с выступами полностью согласуются с общефизическими представлениями о приоттекающем в канале физическому процессу [1, 2, 5].

Отчётливо видны промежутки отрывных и присоединённых течений, а также основной вихрь для закрытых впадин.

Линии тока также показывают генерирование вихрей в зависимости от режимов потоков и геометрии выступа.

В рамках данного исследования проводились математические моделирования вышеуказанным методом ламинарных течений и теплообмена ньютоновской жидкости в трубах с турбулизаторами с параметрами:  $Pr=170\div 320$ ;  $d/D=0,80; 0,86; 0,92$ ;  $t/D=0,33; 0,66; 1,22$ ;  $Re=10^2\div 10^3\div 1,5\cdot 10^3$ .

Данная область была опытным образом изучена в [5], где было установлено, что при  $Re\approx 1600$  режим течения становится переходным, поскольку качественно меняется характер изменения гидравлического сопротивления [5].

Математические моделирования режима после  $Re>1600$  ( $Re=1,6\cdot 10^3\div 2\cdot 10^3$ ) и далее вплоть до  $Re=2,4\cdot 10^3$  проводилось как для турбулентных течений методом, апробированным в [3, 4].

### Заключение

1. В работе были произведены математические моделирования теплосъёмов в каналах с турбулизаторами с полукруглыми поперечными очертаниями при критериях Рейнольдса, характерных для ламинарных ( $Re=10^2\div 2\cdot 10^3$ ) и переходных ( $Re=2\cdot 10^3\div 10^4$ ) гидрорежимов течений, на основании разноблочной численной технологии, сформированной на решениях конечно-объёмными факторизованными способами рейнольдсового уравнения и энергетического уравнения, и выявлено, что интенсифицирование теплосъёма для относительно небольших чисел Рейнольдса  $Re=2\cdot 10^3\div 10^4$  в большом диапазоне чисел Прандтля что может быть актуально в каналах.

2. Преимущество применённого в работе метода на основе метода контрольных объёмов над существующими состоит в том, что последние [5] основывались на целом ряде приближений, например: приближения Галёркина, линеаризации уравнений, применения методов переменных направлений с последующей реализацией методов прогонки, применения метода переменных уравнений с последующей реализацией на основе методов прогонки и т.п.

3. Применённым методом ФКОМ в работе были получены как локальные, так и осреднённые характеристики потока и теплосъёма в трубе с системой турбулизаторов для ламинарных и переходных режимов течений теплоносителей и позволило детерминировать для этих режимных диапазонов уровни интенсификации теплообмена.

### Список литературы

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
2. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического

оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.

3. 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.

4. 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.

5. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М. : Энергоатомиздат, 1998. 372 с.

*Лобанов Игорь Евгеньевич, д.т.н., в.н.с. НИО–204,  
grigorchuk.grigorchuck@yandex.ru, Россия, Москва, Московский авиационный  
институт (национальный исследовательский университет)*

***MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN PIPES WITH  
TURBULATORS IN THE LAMINAR REGION AND IN THE TRANSITION  
REGION TO THE TURBULENT FLOW***

*Lobaanov I.E.*

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

*Annotation. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators at low Reynolds numbers characteristic of laminar ( $Re=10^2 \div 1,5 \cdot 10^3$ ) and transient ( $Re=1,6 \cdot 10^3 \div 10^4$ ) modes of coolant flows, which were previously studied mainly experimentally, was carried out. The solution of the heat exchange problem for semicircular cross-section flow turbulators based on multi-block computing technologies based on the solution of Reynolds equations (closed using the Menter shear stress transfer model) and energy equations (on multi-scale overlapping structured grids) by the factorized finite-volume method (FCOM) was considered. This method has previously been successfully applied and verified by experiment for higher Reynolds numbers.*

*Key words: heat exchange, modeling, flow, connection, pipe, channel, turbulator, flow, laminar, turbulent, transient.*