

УДК 532.517.4 : 536.24  
eLIBRARY.RU: 55.47.29; 55.49.07

**И.Е. Лобанов**

*ФГБОУ высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)», г. Москва*

**ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ДИАФРАГМАМИ  
КАК ФУНКЦИЯ КРИТЕРИЯ ПРАНДТЛЯ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ )**

**THE THEORY OF HEAT TRANSFER IN PIPES WITH DIAPHRAGMS  
AS A FUNCTION OF THE PRANDTL CRITERION  
IN A WIDE RANGE OF ITS VARIATION ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ )**

**Аннотация:** Расчётным методом исследована зависимость от числа Прандтля в самом широком диапазоне его изменения ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ): распределения интегрального теплообмена при турбулентной конвекции в трубе с периодическими полукруглыми выступами на основе численного решения системы уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках.

Минимум относительного теплообмена для увеличенных чисел Прандтля наблюдаются при высоких числах Рейнольдса для высоких выступов с большим шагом между ними, а для уменьшенных — при средних для высоких выступов с большим шагом между ними.

**Ключевые слова:** теплообмен, моделирование, турбулизатор, канал, труба, критерий Прандтля.

**Abstract:** The dependence on the Prandtl number in a wide range of its variation is investigated by the calculation method ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ): the distribution of integral heat exchange during turbulent convective heat exchange in pipes with turbulators. A general analysis of the calculated data obtained showed: for increased ( $Pr > 1$ ) Prandtl numbers, the maximum increase in relative heat transfer, which can be quite noticeable, occurs at small Reynolds numbers, large relative heights of turbulators, small relative steps between turbulators, and for reduced ( $Pr < 1$ ) Prandtl numbers — for large Reynolds numbers, large relative heights of turbulators, large relative steps between turbulators.

The minimum values of relative heat transfer for increased Prandtl numbers are observed at high Reynolds numbers for high turbulators with a large step between them, and for reduced Prandtl numbers — at average Reynolds numbers for high turbulators with a large step between them.

**Keywords:** modeling; numerical; channel; pipe; convective; Mentor model; turbulator; heat transfer; hydraulic resistance; Prandtl number.

## Введение

Нанесение периодических выступов на стенки омываемых поверхностей является хорошо апробированным на практике способом вихревой интенсификации теплообмена [1]. Интенсификация теплообмена для условий течения теплоносителей в трубах с турбулизаторами проводились и проводятся в основном экспериментальными методами [1], а теоретические исследования довольно немногочисленны, многие из них основаны на интегральных подходах [2—5]. На современном этапе исследований задачи аэромеханики и теплофизики отрывных и вихревых течений всё активнее решаются методами многоблочных вычислительных технологий, базирующихся на пересекающихся структурированных сетках [6]. Настоящее исследование является логическим продолжением вышеуказанных вычислительных методов [3, 7—8] 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 в широком диапазоне его изменения:  $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ . Ранее данный аспект исследовался недостаточно полно и для гораздо более узкого диапазона критериев Прандтля.

## 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.

Многоблочный алгоритм решения задачи на пересекающихся разномастных сетках, апробированный при решении задач вихревой динамики и теплообмена [6], применяется для корректного описания турбулентного теплообмена.

С помощью зональной низкорейнольдсовой модели Менстера [6] реализовано описание турбулентного переноса. В исследовании рассматривались каналы постоянного цилиндрического сечения с расположенными на стенках восемью турбулизаторами в форме периодических диафрагм полукруглого поперечного сечения. Численные расчёты для квадратных турбулизаторов были реализованы в работе [3].

Параметры изменялись в следующих диапазонах:  $d/D = 0,98 \div 0,90$ ;  $t/D = 0,25 \div 1$ , где  $t$  — шаг размещения турбулизаторов;  $d$  — диаметр диафрагмы;  $D$  — диаметр трубы;  $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^5$  — число Рейнольдса;  $Pr = 0,0038 \div 96432$  ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ).

В основной части исследования расчёт теплообмена проводился при граничном условии на стенке первого рода с последовательным изменением числа

Прандтля в целях установления закономерности изменения интенсификации теплообмена для различных теплоносителей.

В дальнейшем не будем останавливаться на подробностях непосредственно модельных аспектов численных расчётов по данной методике, поскольку они были рассмотрены в [1, 3, 6, 7, 9].

### **Данные для исходных расчётов**

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 (в т.ч., для широкого диапазона его изменения  $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ).

В отличие от более ранних научных работ [10, 11], в данной статье расчёты интенсифицированного теплообмена по данному факторизированному контрольно-объёмному методу проводились в трёхмерной постановке вместо двумерной (как в работах [3—5, 7, 8]) при увеличении количества турбулизаторов в канале до 12, с меньшей невязкой ( $10^{-5}$ ), что позволило значительно расширить расчётный диапазон для геометрических характеристик турбулизаторов и для определяющих критериев Рейнольдса и Прандтля: с  $Pr=1 \div 20$  до предельных их значений для применяемых в технике теплоносителей  $Pr=0,0038 \div 96432$ . Ранее в таких широких пределах критериев Прандтля расчёты интенсифицированного теплообмена ещё не проводились.

Критерии сходимости для динамической и тепловой задач 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  $10^{-5}$ .

### **Влияние числа Прандтля в очень широком диапазоне его изменения $Pr=0,0038 \div 96432$ ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ) на теплообмен в прямых круглых трубах с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока полукруглого поперечного сечения при различных геометрических и режимных параметрах**

Коэффициент сопротивления  $\xi$  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, 7, 8] 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, 7, 8]) адекватность существующим экспериментальным данным реализованной расчётной модели для локальных и осреднённых характеристик течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами обуславливает её применение в целях выявления закономерности интегральных (осреднённых) параметров теплообмена в трубах с различными числами Прандтля (в т.ч., в широком диапазоне его изменения  $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ) 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. Для турбулизаторов более резких очертаний диапазон сходимости задачи может быть ощутимо более узким.

Данный вопрос представляется важным, поскольку необходимо знать, для каких чисел Прандтля (в т.ч., для очень широкого диапазона его изменения  $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ ) будет иметь место более высокая интенсификация теплообмена в зависимости от определяющих параметров.

В более ранних исследованиях [10, 11] расчёты интенсифицированного теплообмена по данному факторизированному контрольно-объёмному методу проводился лишь для наиболее характерных геометрических и режимных характеристик для труб с турбулизаторами ( $d/D=0,92; 0,90; t/D=0,25; 0,50; 1,00; Re=10^4 \div 10^5$ ) [2, 12] для сравнительно ограниченного диапазона чисел Прандтля  $Pr=1 \div 20$ .

В рамках настоящей статьи ставится задача исследования на более высоком уровне и с более высокой точностью интенсифицированного теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами для предельно широкого диапазона изменения числа Прандтля ( $Pr=0,0038 \div 96432$ ), т.е. для чисел Прандтля порядка:  $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ .

Решения задачи исследования интенсифицированного теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами для предельно широкого диапазона изменения числа Прандтля проводились для следующих характерных точек (для теплоносителя виде воздуха расчёты проводились на том основании, что он является наиболее распространённым, т.е. по воздуху имеются самые обширные экспериментальные данные, и наиболее пригоден для верификации расчётных данных):

$Pr=0,0038$  для калия при  $700^\circ\text{C}$  ( $Pr=0,0039$  для натрия при  $700^\circ\text{C}$ );  $Pr=0,005$  для калия при  $300^\circ\text{C}$  (для натрия при  $450^\circ\text{C}$ );  $Pr=0,05$  для лития при  $200^\circ\text{C}$ ;  $Pr=0,67$  для одноатомных газов;  $Pr=0,72$  для воздуха;  $Pr=1,00$  для многоатомных газов;  $Pr=1,75$  для воды при  $100^\circ\text{C}$ ;  $Pr=13,7$  для воды при  $0^\circ\text{C}$ ;  $Pr=22,4$  для этиленгликоля при  $100^\circ\text{C}$ ;  $Pr=34,8$  для трансформаторного масла при  $120^\circ\text{C}$ ;  $Pr=125$  для этиленгликоля при  $34^\circ\text{C}$  (для трансформаторного масла при  $46^\circ\text{C}$ ; для глицерина при  $100^\circ\text{C}$ );  $Pr=328$  для глицерина при  $80^\circ\text{C}$ ;  $Pr=615$  для этиленгликоля при  $0^\circ\text{C}$ ;  $Pr=919$  для глицерина при  $60^\circ\text{C}$ ;  $Pr=11846$  для глицерина при  $20^\circ\text{C}$ ;  $Pr=96432$  для глицерина при  $0^\circ\text{C}$ .

Характерные значения для режимных и геометрических параметров выбирались следующими:  $d/D=0,90\div 0,98$ ;  $t/D=0,25\div 1,00$ ;  $Re=10^4\div 5\cdot 10^5$ .

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.

В качестве основополагающего расчётного относительного симплекса следует выбрать параметр  $\frac{Nu/Nu_{ГЛ}}{(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Pr=1}}$  (кратко  $Nu_{Pr}$ ) — безразмерный единичный приведённый критерий Нуссельта —, который показывает насколько, при прочих равных условиях, интенсифицированный теплообмен для текущего числа Прандтля отличается от интенсифицированного теплообмена для единичного критерия Прандтля.

Основанием для такого анализа служит метод относительного соответствия, который находит широкое применение в исследованиях интенсифицированного теплообмена [1, 4, 9].

Из анализа физических процессов интенсифицированного теплообмена можно постулировать, что

$$\lim_{Pr \rightarrow \infty} \frac{Nu/Nu_{ГЛ}}{(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Pr=1}} = \frac{1}{(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Pr=1}};$$
$$\lim_{Pr \rightarrow 0} \frac{Nu/Nu_{ГЛ}}{(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Pr=1}} = \frac{1}{(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Pr=1}}.$$

Полученные результаты расчёта по предложенной модели для вышеуказанного диапазона определяющих параметров сводятся при прочих равных условиях в зависимости от числа Прандтля, где они распределены для повышенных ( $Pr > 1$ ) пониженных ( $Pr < 1$ ) чисел Прандтля.

В дальнейшем представленные данные позволяют сделать анализ влияния на относительный теплообмен (при прочих равных условиях) не только числа Рейнольдса, но и относительной высоты (по параметру  $d/D$ ) и шага между турбулизаторами ( $t/D$ ).

### **Теоретические характерные линии тока для исследуемых в статье различных чисел Рейнольдса и Прандтля и геометрии канала, рассчитанные по предложенной модели**

В качестве иллюстрации полученных данным методом расчётных данных, которые приводятся на рис. 1—6, приведены характерные расчётные линии тока (а также изотермы, т.е. линии постоянных температур) для труб с поперечными кольцевыми турбулизаторами полукруглого поперечного сечения для рассматриваемых условий течения для закрытых (рис. 1 и рис. 2), полуоткрытых (рис. 3) и открытых впадин (рис. 4) — классификация по [3—5].

На рис. 5 и рис. 6 приводятся аналогичные линии тока и изотермы для турбулизаторов меньших относительных высот ( $d/D=0,96$ ), из которых видно, что для турбулизаторов малых высот характерны открытые впадины.

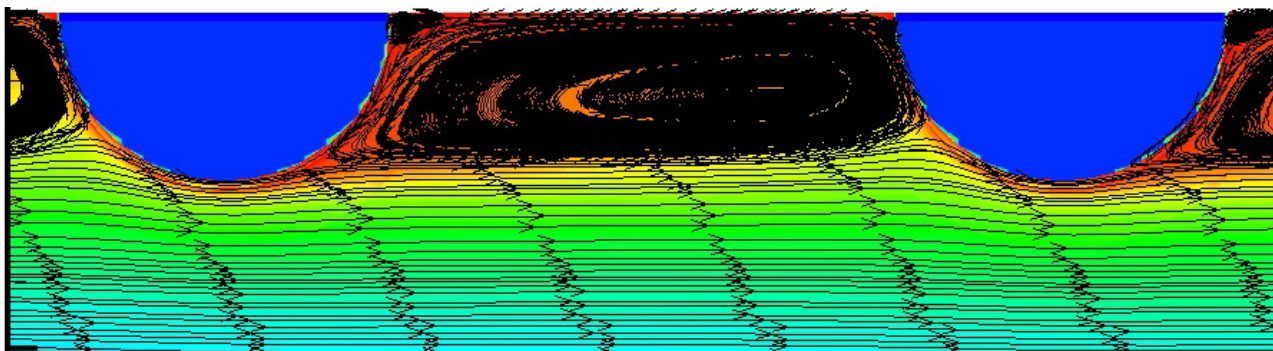


Рисунок. 1 - Расчётные линии тока при течении в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением для интенсификации теплообмена для закрытой впадины при  $Pr=0,05$ ;  $Re=5 \cdot 10^5$ ;  $d/D=0,90$ ;  $t/D=0,25$

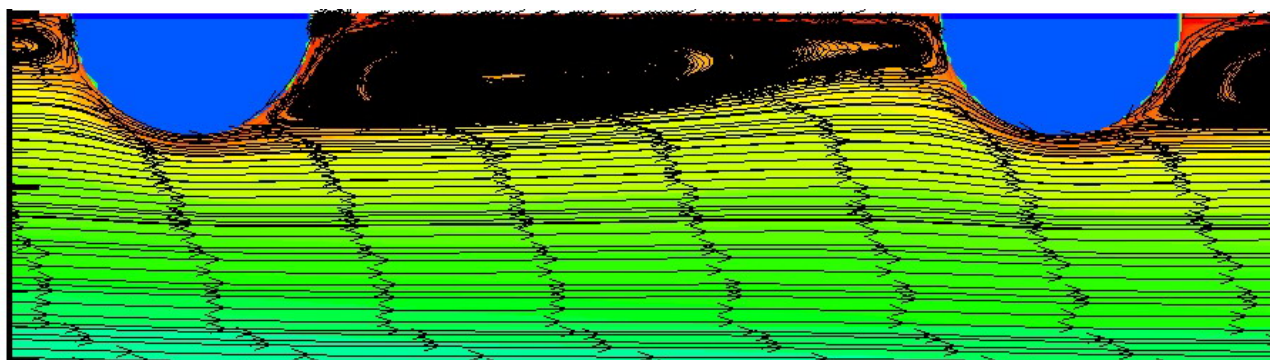


Рисунок. 2 - Расчётные линии тока при течении в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением для интенсификации теплообмена для полуоткрытой впадины при  $Pr=0,0038$ ;  $Re=5 \cdot 10^5$ ;  $d/D=0,93$ ;  $t/D=0,25$

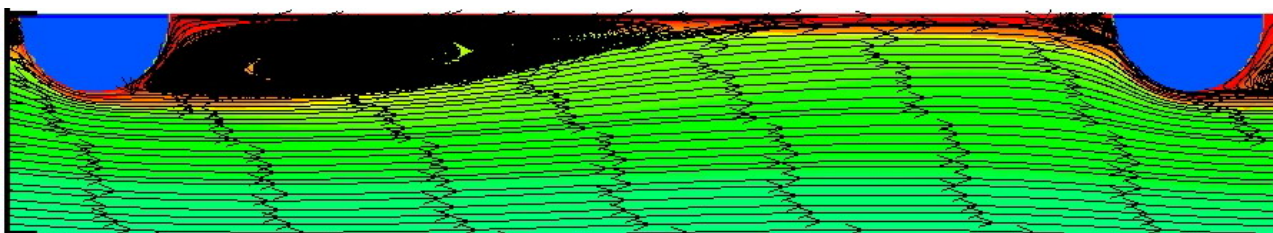


Рисунок. 3 - Расчётные линии тока при течении в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением для интенсификации теплообмена для открытой впадины при  $Pr=13,7$ ;  $Re=10^4$ ;  $d/D=0,93$ ;  $t/D=0,50$

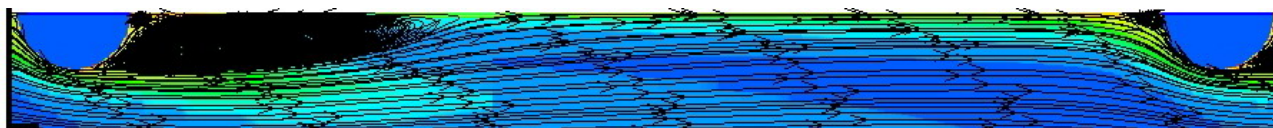


Рисунок. 4 - Расчётные линии тока при течении в трубе с турбулизаторами с интенсификацией теплообмена для открытой впадины с полукруглым поперечным сечением при  $Pr=919$ ;  $Re=10^5$ ;  $d/D=0,90$ ;  $t/D=1,00$



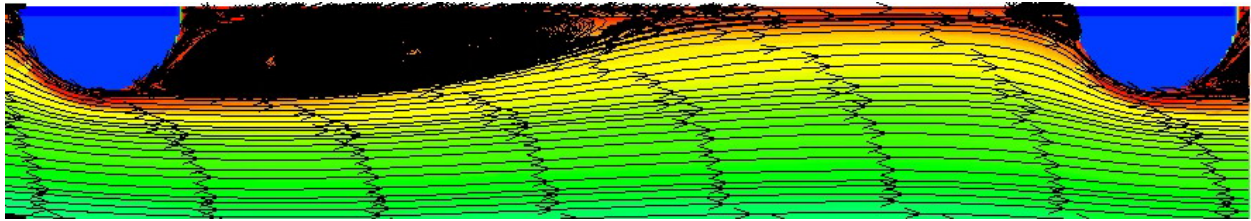


Рисунок. 5 - Расчётные линии тока при течении в трубе с интенсификацией теплообмена с относительно невысокими турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при  $Pr=0,67$ ;  $Re=10^5$ ;  $d/D=0,96$ ;  $t/D=0,25$

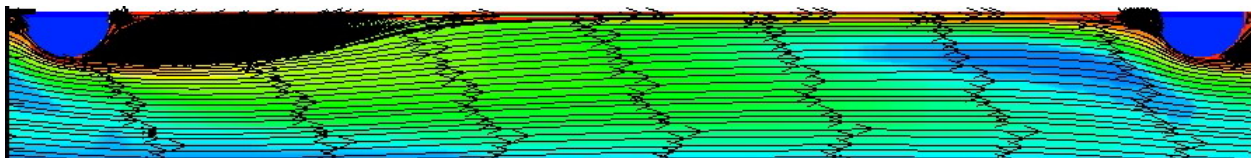


Рисунок 6 - Расчётные линии тока при течении в трубе с интенсификацией теплообмена с относительно невысокими турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при  $Pr=328$ ;  $Re=5 \cdot 10^5$ ;  $d/D=0,96$ ;  $t/D=0,50$

Анализ линий тока позволяет качественно оценить, какой конкретно подслоем турбулизуется, т.е. позволяет судить о характере интенсификации теплообмена.

Например, если вихревые зоны забрасываются в ядро потока, то течение интенсифицируется при большом увеличении гидравлического сопротивления; наличие застойных зон указывает на то, что теплообмен будет ухудшаться при увеличении гидравлического сопротивления; важно расположение точки присоединения турбулентного пограничного слоя, поскольку именно там имеет место максимальное увеличение теплоотдачи при минимизации гидравлического сопротивления и т.д., и т.п.

Подробный анализ характерных линий тока ранее был проведён в работах [2, 3, 7, 8, 10, 11], поэтому в рамках данной статьи приводится ограниченный материал, частично верифицирующий полученные результаты расчётов.

Общее различия в закономерностях изменения относительного теплообмена в зависимости от числа Прандтля обосновывается тем, что при небольших числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше высоты пристенного слоя [1, 4, 9], а при больших числах Рейнольдса — меньше. Последнее обуславливает турбулизацию только ядра потока, увеличивая только гидравлическое сопротивление, почти не увеличивая теплообмен.

**Анализ результатов расчёта по предложенной модели безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта для различных чисел Рейнольдса  $Re=10^4 \div 5 \cdot 10^5$  для повышенных ( $Pr > 1 \div 96432$ ) чисел Прандтля**

Получены результаты расчёта по предложенной модели безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта для различных чисел Рейнольдса  $Re=10^4 \div 5 \cdot 10^5$  для повышенных ( $Pr > 1 \div 96432$ ) чисел Прандтля для турбулизато-

ров различных высот  $d/D=0,90\div 0,98$  с различными шагами между ними  $t/D=0,25\div 1,00$ .

Общий анализ этих результатов показывает, что максимальное увеличение безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта наблюдается при низких числах Рейнольдса ( $Re=10^4$ ):

около +60% для турбулизаторов относительно средних высот ( $d/D=0,93$  и  $d/D=0,96$ ) с малым шагом между ними ( $t/D=0,25$ ) в районе  $Pr\approx 125\div 615$ ;

около +65% для турбулизаторов относительно малых высот ( $d/D=0,98$ ) с малым шагом между ними ( $t/D=0,25$ ) в районе  $Pr\approx 10^4$ .

Несколько меньшие значения, немногим менее +50%, имеют место для турбулизаторов относительно больших высот ( $d/D=0,90$ ) с малыми шагами между ними при низких числах Рейнольдса ( $Re=10^4$ );

увеличения порядка +40% имеют место для турбулизаторов с  $d/D=0,96$  с шагом  $t/D=1,00$  при  $Re=10^4$  при числах Прандтля  $Pr\approx 10^2\div 10^3$ .

Минимальные значения безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта наблюдаются при высоких числах Рейнольдса ( $Re=5\cdot 10^5$ ):

–(40÷45)% для высоких и средних турбулизаторов ( $d/D=0,90$  и  $d/D=0,93$ ) с большим и средним шагом между ними ( $t/D=1,00$  и  $t/D=0,50$ ) в районе  $Pr\approx 10^4\div 10^5$ .

Общий характер зависимости безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта от числа Прандтля для малых чисел Рейнольдса заключается в том, что сначала он увеличивается, достигая максимума, а затем неуклонно снижается вплоть до максимальных значений числа Прандтля.

Для высоких чисел Рейнольдса происходит неуклонное снижение относительного теплообмена сначала резкое (до  $Pr\approx 15$ ), а затем довольно незначительное вплоть до предельных значений чисел Прандтля.

Для средних чисел Прандтля характер зависимости будет промежуточным.

Общий характер зависимости безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта от числа Прандтля для одинаковых высот турбулизаторов, но для различных относительных шагов между турбулизаторами показывает, что число Прандтля больше всего влияет на него для больших турбулизаторов и для малых чисел Рейнольдса, меньше всего это влияние для низких турбулизаторов с большими относительными шагами между ними с большими числами Рейнольдса (на некоторых участках оно практически не наблюдается).

Для промежуточных определяющих значений имеют место промежуточные значения расчётных параметров.

Вышеуказанный вывод можно сделать, перераспределив полученные расчётные данные для одинаковых относительных высот турбулизаторов, но при разных относительных шагах между турбулизаторами.

Общий характер зависимости безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта от числа Прандтля для одинаковых шагов между турбулизаторами, но для различных относительных высот турбулизаторов показывает,



что число Прандтля, как правило, больше всего влияет на него для больших турбулизаторов и для малых чисел Рейнольдса, меньше всего это влияние для низких турбулизаторов с большими относительными шагами между ними с большими числами Рейнольдса.

Для промежуточных определяющих значений имеют место промежуточные значения расчётных параметров.

Вышеуказанный вывод можно сделать, перераспределив полученные расчётные данные для одинаковых относительных шагов между турбулизаторами, но для разных относительных высот турбулизаторов.

Таким образом, влияние повышенного числа Прандтля на относительную интенсификацию теплообмена является значительной и зависит как от геометрии канала (относительных высот и шагов выступов), так и от режима течения теплоносителя (числа Рейнольдса): он может как увеличиваться почти в два раза, так и уменьшаться более чем наполовину в рассматриваемом диапазоне.

### **Анализ результатов расчёта по предложенной модели безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта для различных чисел Рейнольдса $Re=10^4 \div 5 \cdot 10^5$ для пониженных ( $Pr < 1 \div 0,0038$ ) чисел Прандтля**

Получены результаты расчёта по предложенной модели безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта для различных чисел Рейнольдса  $Re=10^4 \div 5 \cdot 10^5$  для пониженных ( $0,0038 < Pr < 1$ ) чисел Прандтля для  $d/D=0,90 \div 0,98$ ;  $t/D=0,25 \div 1,00$ , общий анализ которых показывает, что максимальное увеличение безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта наблюдается в районе  $Pr \approx 0,05$  при высоких числах Рейнольдса ( $Re=5 \cdot 10^5$ ) для средних относительных шагов между турбулизаторами ( $t/D=0,50$ ): +17% для высоких турбулизаторов ( $d/D=0,90$ ) и +22% для турбулизаторами с  $d/D=0,93$ ; изменения значений относительных шагов приводит к снижению относительного теплообмена, к ещё большему снижению приводит уменьшение относительных высот турбулизаторов.

Минимальное снижение безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта наблюдается в районе  $Pr \approx 0,0038$  при средних числах Рейнольдса ( $Re=5 \cdot 10^4 \div 10^5$ ): -46% для высоких турбулизаторов ( $d/D=0,90$ ) с большим шагом между ними ( $t/D=1,00$ ); с уменьшением относительных высот турбулизаторов вплоть до  $d/D=0,90 \div 0,96$  уменьшение относительного теплообмена составляет примерно 40%; дальнейшее уменьшение относительной высоты турбулизатора приводит к меньшим уменьшениям относительного теплообмена.

Снижение порядка -30% имеет место при  $d/D=0,90$  и  $t/D=1,00$ ;  $d/D=0,93$  и  $t/D=0,50$ ;  $d/D=0,96$  и  $t/D=0,25$  для чисел Прандтля  $Pr \approx 0,05$ .

Увеличение относительного теплообмена при пониженных числах Прандтля имеет место при больших числах Рейнольдса ( $Re=5 \cdot 10^4$ ) и чисел Прандтля ( $Pr \approx 0,05$ ): порядка +20% у турбулизаторов средних высот ( $d/D=0,93$ ) и средних шагов между ними ( $t/D=0,50$ ); увеличение порядка +15% происходит

при  $d/D=0,93$  и  $t/D=1,00$ ; увеличение порядка +10% имеет место при  $d/D=0,93$  и  $t/D=0,25$ , а также при  $d/D=0,96$  и  $t/D=0,50$ .

Общий характер зависимости безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта от уменьшенных чисел Прандтля для одинаковых высот турбулизаторов, но для различных относительных шагов между турбулизаторами показывает, что число Прандтля больше всего влияет на него при небольших числах Рейнольдса и малых шагов между турбулизаторами; гораздо меньше это влияние на низких турбулизаторах с большими числами Рейнольдса.

Для промежуточных определяющих значений имеют место промежуточные значения расчётных параметров.

Вышеуказанный вывод можно сделать, перераспределив полученные расчётные данные для одинаковых относительных высот турбулизаторов, но при разных относительных шагах между турбулизаторами.

Общий характер зависимости безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта от уменьшенных чисел Прандтля для одинаковых шагов между турбулизаторами, но для различных относительных высот турбулизаторов показывает, что число Прандтля, как правило, больше всего влияет на него для небольших турбулизаторов ( $d/D=0,96$  и  $d/D=0,98$ ) и для средних чисел Рейнольдса, меньше всего это влияние при больших числах Рейнольдса.

Вышеуказанный вывод можно сделать, перераспределив полученные расчётные данные для одинаковых относительных шагов между турбулизаторами, но для разных относительных высот турбулизаторов.

**Обобщающий анализ результатов расчёта по предложенной модели  
безразмерного единичного приведённого критерия Нуссельта  
для всего рассматриваемого диапазона чисел Прандтля  
 $Pr=0,0038 \div 96432$  ( $Pr \sim 10^{-3} \div \sim 10^{+5}$ )**

Вышеприведённый анализ показывает, что для увеличенных ( $Pr > 1$ ) чисел Прандтля максимальное увеличение относительного теплообмена, которое может быть довольно ощутимым, происходит при малых числах Рейнольдса, больших относительных высотах турбулизаторов, малых относительных шагах между турбулизаторами, а для уменьшенных ( $Pr < 1$ ) числах Прандтля — для больших чисел Рейнольдса, больших относительных высот турбулизаторов, больших относительных шагов между турбулизаторами.

Минимальные значения относительного теплообмена для увеличенных чисел Прандтля наблюдаются при высоких числах Рейнольдса для высоких турбулизаторов с большим шагом между ними, а для уменьшенных чисел Прандтля — при средних числах Рейнольдса для высоких турбулизаторов с большим шагом между ними.

Общий характер зависимости относительной интенсификации от числа Рейнольдса заключается в том, что чаще всего увеличение относительного теплообмена при повышенных числах Прандтля происходит при малых шагах

между турбулизаторами, а увеличение — при больших шагах между турбулизаторами.

Для пониженных чисел Прандтля повышение относительного теплообмена происходит чаще всего при больших шагах между турбулизаторами, а снижение — при малых.

Для увеличенных чисел Прандтля увеличение относительного теплообмена может быть довольно значительным — в несколько раз выше, чем для уменьшенных; а уменьшение — примерно то же самое.

Для габаритной наглядности на рис. 7 и рис. 8 приведены графики, построенные на основании расчётных данных для повышенных и пониженных критериев Прандтля соответственно.

На рис. 7 и рис. 8 отчётливо видны области увеличения и снижения относительного теплообмена в зависимости от чисел Прандтля, которые были проанализированы в настоящей статье. Вышеуказанные графики подтверждают вывод о том, что влияние числа Прандтля на относительную интенсифицированную теплоотдачу может быть довольно значительной.

Частичное (поскольку диапазон теоретических данных гораздо шире экспериментального диапазона) экспериментальное подтверждение приведённых теоретических данных было приведено в работах [1, 4, 9], где анализируются собственно эксперименты авторов, эксперименты [13], а также закономерности для предельного теплообмена [2, 3, 5, 7—9].

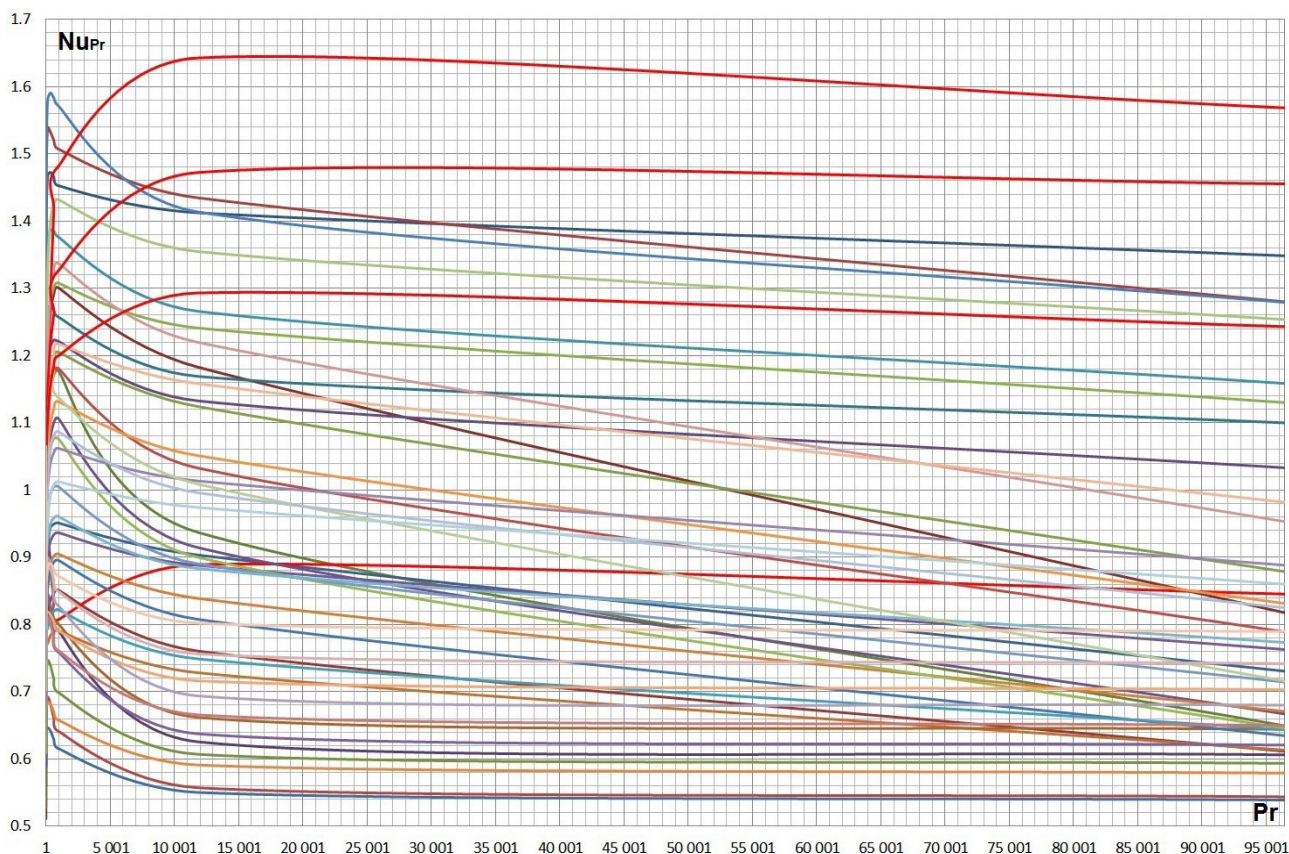


Рисунок 7 - Графики относительной теплоотдачи в зависимости от повышенных значений критериев Прандтля

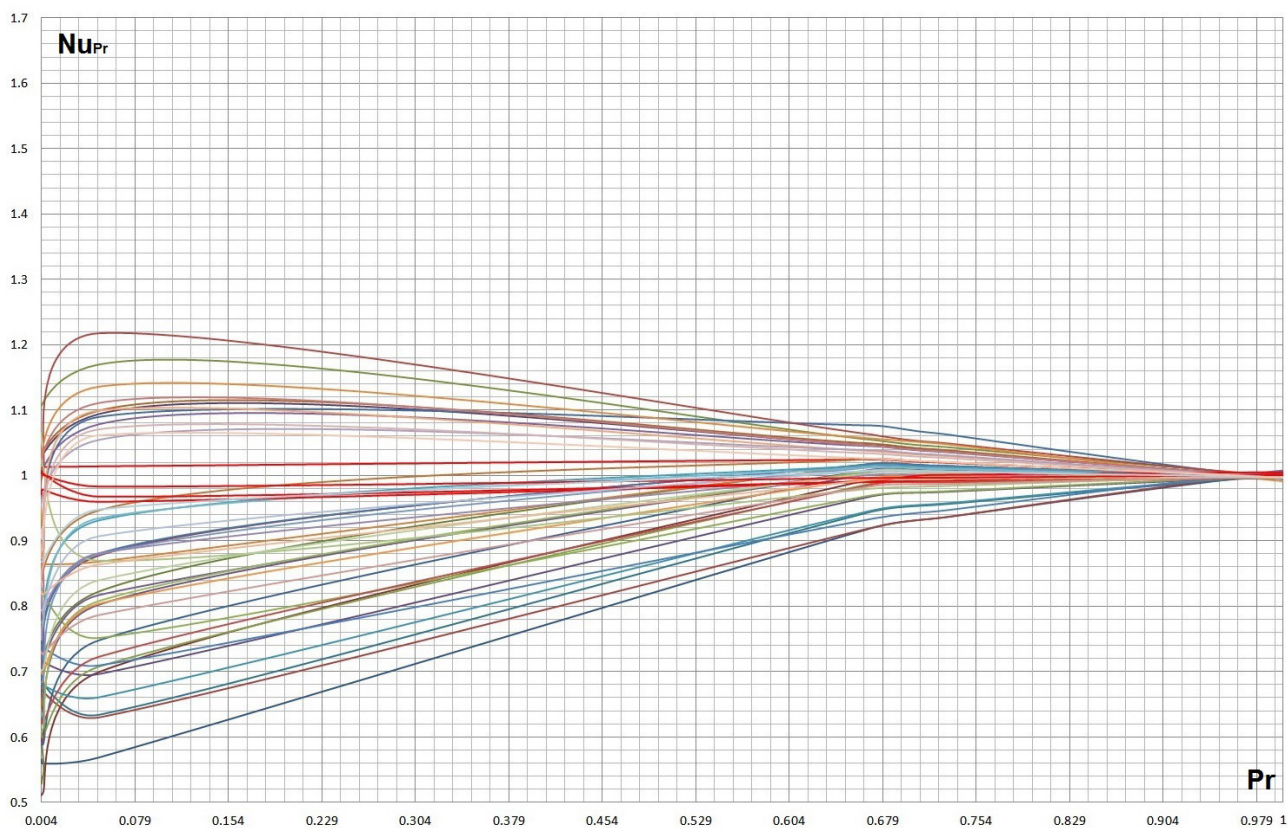


Рисунок 8 - Графики относительной теплоотдачи в зависимости от пониженных значений критериев Прандтля

Ещё одним частичным подтверждением полученных расчётных численных зависимостей являются данные аналитических решений для интенсифицированного теплообмена, полученных по модифицированной четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя [2, 3—5].

Кроме того, в классических работах по интенсифицированному теплообмену [1, 4] указывается, что надёжных экспериментальных данных не имеется, но предполагается, что искусственная турбулизация жидкометаллических потоков должна, как правило, иметь низкую эффективность [1, 4], что подтверждается и данными аналитических решений для интенсифицированного теплообмена, полученных по модифицированной четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя [2, 3—5].

Выше представленный анализ указывает на то, что теоретические данные полностью соответствуют существующему экспериментальному материалу, значительно перекрывая диапазон определяющих параметров последнего.

Теоретические данные позволили выявить закономерности относительно теплообмена в зависимости от числа Прандтля в тех областях, где ещё нет надёжных экспериментальных данных, которые позволяют прогнозировать диапазоны увеличения и уменьшения интенсифицированного теплообмена.

## Основные выводы

1. Разработанный и используемый в данном исследовании метод расчёта, основанный на решении конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью моделью переноса сдвиговых напряжений Менгера 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 — больше, высоты пристенного слоя, следовательно, имеет место турбулизация только ядра потока, что приводит только к увеличению гидросопротивления и к неувеличению теплообмена.

6. 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.

7. Для увеличенных ( $Pr > 1$ ) чисел Прандтля максимальное увеличение относительного теплообмена, которое может быть довольно ощутимым и происходит, в основном, при малых числах Рейнольдса, средних относительных высотах турбулизаторов, малых относительных шагах между турбулизаторами; а для уменьшенных ( $Pr < 1$ ) числах Прандтля — для больших чисел Рейнольдса, больших относительных высот турбулизаторов, больших относительных шагов между турбулизаторами. Минимальные значения относительного теплообмена для увеличенных чисел Прандтля наблюдаются при высоких числах Рейнольдса для высоких и средних турбулизаторов с большим и средним шагом между ними, а для уменьшенных чисел Прандтля — при средних числах Рейнольдса для высоких турбулизаторов с большим шагом между ними.



8. Для увеличенных чисел Прандтля увеличение относительного теплообмена может быть довольно значительным — в несколько раз выше, чем для уменьшенных; а уменьшение — примерно то же самое.

### Литература

1. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С.54—60.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Изд-во Машиностроение, 1990. - 208 с.
3. 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: Изд-во ИТМО НАНБ, 2008. Т. 1. С.101—103.
4. 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.
5. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М.: Изд-во МАИ, 2005. - 632 с.
6. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: Изд-во МАИ, 2011. - 160 с.
7. 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.: Изд-во МГАКХиС, 2010. - 288 с.
8. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Изд-во Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. - 263 с.
9. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32. № 8. P. 1598.
10. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование теплообмена в прямых круглых трубах с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока полукруглого поперечного сечения в зависимости от числа Прандтля для различных геометрических и режимных параметров // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества "Ped-library.ru". 2019. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1576364809>.



11. 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. Том 46. № 4. С.91—101.
12. 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.
13. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.