

УДК 536.24

Теплоотдача и гидравлическое сопротивление дискретно шероховатых труб при вынужденном течении воды

А.В. Щелчков, И.А. Попов, М.З. Яркаев, А.К. Русев

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб с дискретной шероховатостью в виде кольцевых выступов (полученных методом накатки) и сферических выступов (полученных методом штамповки) при вынужденной конвекции воды в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=200\div 100000$. Проведена оценка теплогидравлической эффективности труб.

Ключевые слова

поверхностные интенсификаторы; сферические выступы/выемки; кольцевые выступы; теплогидравлическая эффективность

Поверхностные интенсификаторы теплообмена широко используются в системах охлаждения газотурбинных двигателей и энергетических установок, а также в теплообменных аппаратах различного назначения [1,2]. В настоящее время хорошо изучены теплогидравлические характеристики интенсифицированных каналов при турбулентных и ламинарных режимах течения, имеются конкретные рекомендации по выбору оптимальных высот, шагов и т.д. интенсификаторов с целью получения максимальной теплоотдачи или теплогидравлической эффективности. В первую очередь выбор параметров поверхностных интенсификаторов различного типа (кольцевые выступы, сферические выступы и др.) связан с необходимостью разрушения ламинарного пограничного слоя или вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя. В современной мировой литературе имеется ограниченное количество работ посвященных исследованиям интенсификации теплоотдачи при переходных числах Рейнольдса Re [3-14]. В данных работах не приводятся рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров интенсификаторов для переходной области. Результаты исследований [3] позволяют утверждать, что поверхностные интенсификаторы могут обеспечить значительные показатели теплогидравлической эффективности на переходных режимах течения, при этом указывается,

что поверхностные 3D интенсификаторы могут иметь сравнимую с 2D теплогидравлическую эффективность [4,5].

Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб с шероховатостью в виде кольцевых выступов и сферических выступов

Экспериментальные исследования теплоотдачи и гидродинамики проводились при вынужденном течении дистиллированной воды в трубах относительной длиной $L/D=100$. Характерные геометрические, безразмерные параметры труб с кольцевыми и со сферическими выступами и выемками представлены в таблице 1 и 2.

Таблица 1

Геометрические характеристики теплообменных труб с кольцевыми выступами

№	$h \cdot 10^3, \text{м}$	$D \cdot 10^3, \text{м}$	$L, \text{м}$	$t \cdot 10^3, \text{м}$	d/D	t/D	t/h	Обозн.
1	0,11	10	1	2,5	0,98	0,25	22,7	☒
2	0,5	10	1	2,5	0,9	0,25	5	☐
3	0,6	10	1	2,5	0,88	0,25	4,2	☐
4	0,5	10	1	5	0,9	0,5	10	△
5	1	10	1	5	0,8	0,5	5	▲
6	1	7,6	1	4	0,74	0,5	4	▲
7	0,15	10	0,76	10	0,97	1	67	⊗
8	0,45	10	1	10	0,91	1	22,2	⊙
9	0,5	10	1	10	0,9	1	20	⊖
10	0,7	10	1	10	0,86	1	14,3	⊕
11	1	10	1	10	0,8	1	10	●
12	1	7,6	0,76	7,5	0,74	1	7,5	●

Таблица 2

Геометрические характеристики теплообменных труб со сферическими выступами

№	$h, \text{м}$	$d_c, \text{м}$	$D, \text{м}$	$L, \text{м}$	d/D	h/d_c	$S_1, \text{м}$	$S_2, \text{м}$	f	Обозн.
1с	0,0013	0,004	0,01	1	0,76	0,33	0,009	0,006	0,27	☐
2с	0,0013	0,005	0,01	1	0,76	0,26	0,009	0,006	0,42	■
3с	0,005	0,0026	0,01	1	0,9	0,2	0,006	0,005	0,2	★
4с	0,005	0,0025	0,01	1	-	0,2	0,007	0,007	0,2	◁
5с	0,001	0,0018	0,01	1	0,98	0,05	0,010	0,006	0,05	☆
6с	0,005	0,0026	0,01	1	0,9	0,2	0,009	0,006	0,11	◡

Подвод теплоты к рабочему участку осуществлялся омическим способом (непосредственно пропусканием электрического тока через трубу). Для стабилизации течения и исключения дополнительных возмущений потока устанавливались прямолинейные участки с внутренним диаметром 0,01 или 0,0076 м на входе с $L/D=200$ и на выходе $L/D=100$. В ходе эксперимента измерялись: расход воды через теплообменную трубку, полное давление и температура теплоносителя на входе и выходе из рабочего участка, температуры стенки по длине трубы, параметры электрического тока системы

нагрева трубки. По измеряемым данным определялись потери давления и коэффициенты гидросопротивления, тепловые потоки, воспринимаемые теплоносителем и средние коэффициенты теплоотдачи.

Внешний вид дискретной шероховатости в виде кольцевых выступов, выполненных накаткой, и сферических выступов, получаемых штамповкой, представлены на рисунке 1.

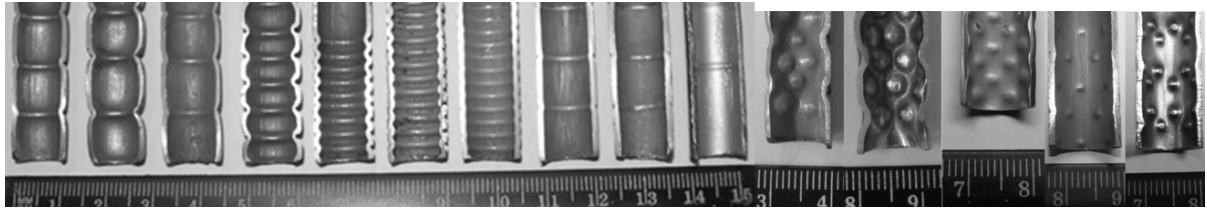


Рис.1. Фотографии профилей сечения труб с кольцевыми выступами и труб со сферическими выступами.

Результаты тестовых опытов по гидросопротивлению и теплоотдаче прямой трубы удовлетворительно, с отклонениями не более $\pm 5 \div \pm 10\%$ согласуются с известными зависимостями:

для ламинарного режима –

$$\xi = 64/Re_D \quad (1)$$

для турбулентного режима –

$$\xi = 0,3164/Re_D^{0,25} \quad (2)$$

$$Nu_D = c \cdot Re_D^m \cdot Pr_f^n \cdot (Gr \cdot Pr_f)^k \cdot (Pr_f/Pr_w)^p \cdot \varepsilon_1 \quad (3)$$

где $c=0,15$; $m=0,33$; $n=0,33$; $k=0,1$; $p=0,25$ - для ламинарного режима; $c=0,021$; $m=0,8$; $n=0,43$; $k=0$; $p=0,25$ - для турбулентного режима; $n=0,43$; $k=0$; $p=0,25$; $K_0 = c \cdot Re_D^m$ (по данным табл.3) - для переходного режима.

Таблица3

$Re_D \cdot 10^{-3}$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	8	10
K_0	1,9	2,7	3,3	3,8	4,4	7,0	10,3	15,5	27	33,3

На рисунках 2 и 3 представлены экспериментальные данные по коэффициентам гидравлического сопротивления и средним коэффициентам теплоотдачи в каналах с кольцевыми выступами.

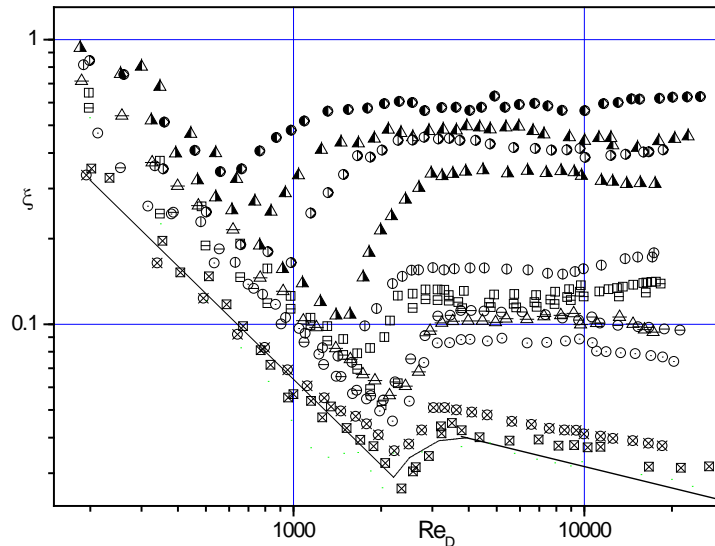


Рис.2. Экспериментальные данные по гидросопротивлению в каналах с кольцевыми выступами. Обозначение в табл.1. Линии – расчет по (1), (2).

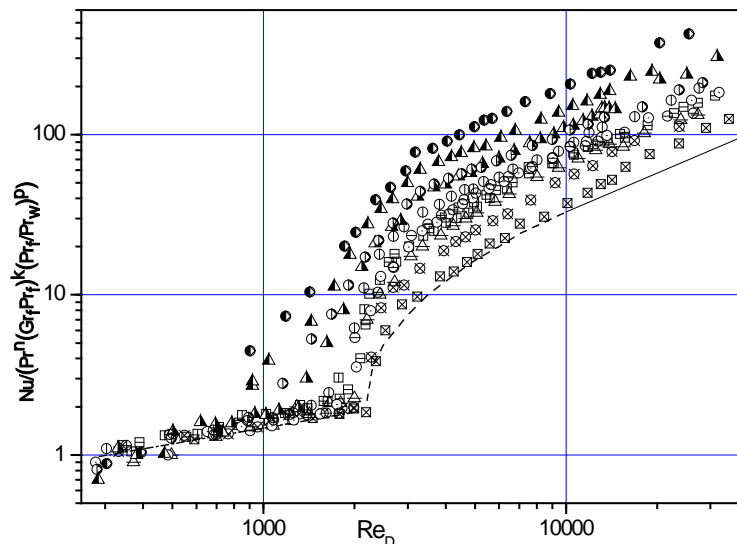


Рис.3. Экспериментальные данные по теплоотдаче в каналах с кольцевыми выступами. Обозначение в табл.1. Линии – расчет по 3.

Данные для турбулентного режима сравнивались с данными [6], отмечено удовлетворительное согласование данных с отклонениями до 15%.

Из анализа рисунков 2 и 3 хорошо видно, что с увеличением относительной высоты выступов отмечается более ранний ламинарно-турбулентный переход. Данные по переходным числам Рейнольдса $Re_{кр1}$ сравнены с данными Коха, приведенными в [6]. Получено удовлетворительное согласование по уровню переходных чисел Рейнольдса и характеру их изменения с данными [6] (рис.4).

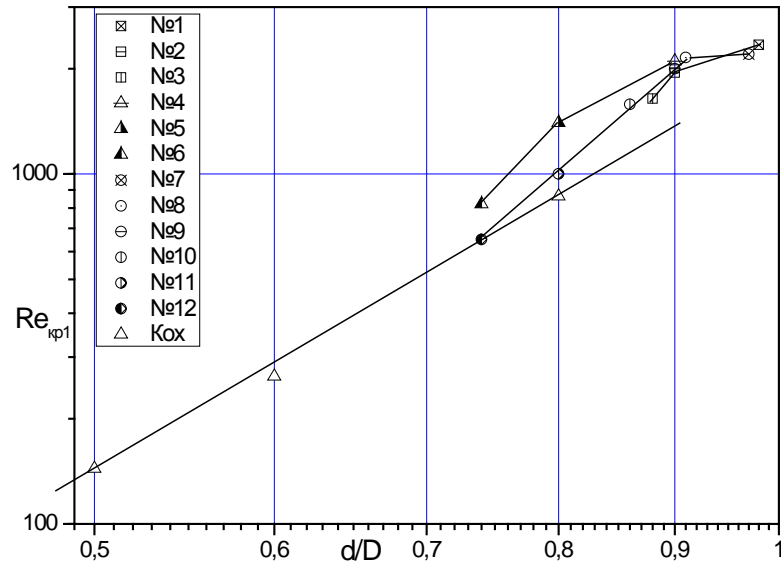


Рис.4. Зависимость переходного числа $Re_{кр1}$ от параметров кольцевых выступов в трубах.

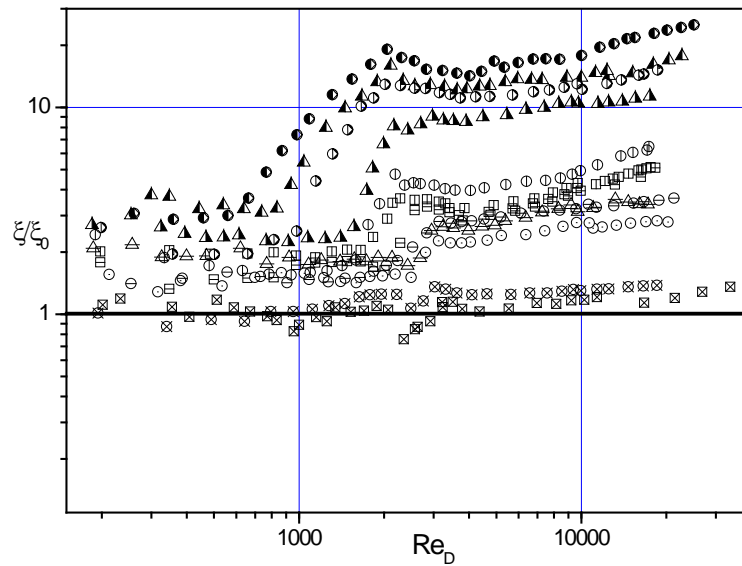


Рис.5. Данные по повышению коэффициентов гидросопротивления в трубах с кольцевыми выступами по сравнению с гладкими трубами. Обозначение табл.1.

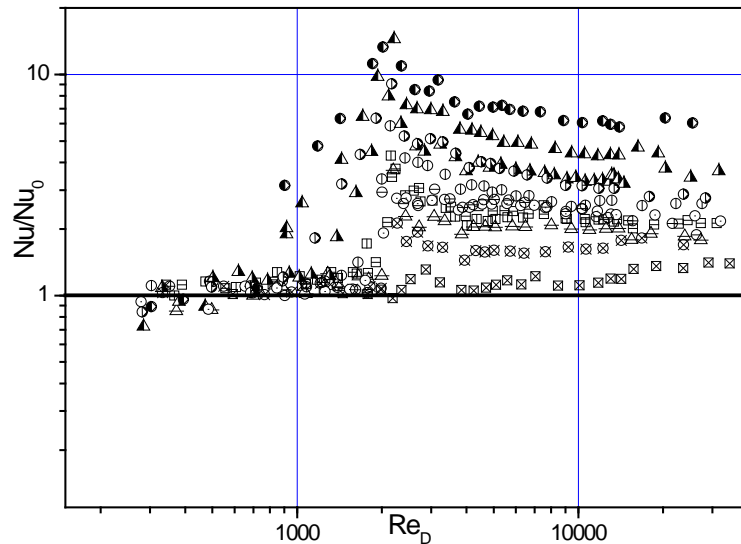


Рис.6. Данные по повышению коэффициентов теплоотдачи в трубах с кольцевыми выступами по сравнению с гладкими трубами. Обозначение табл.1.

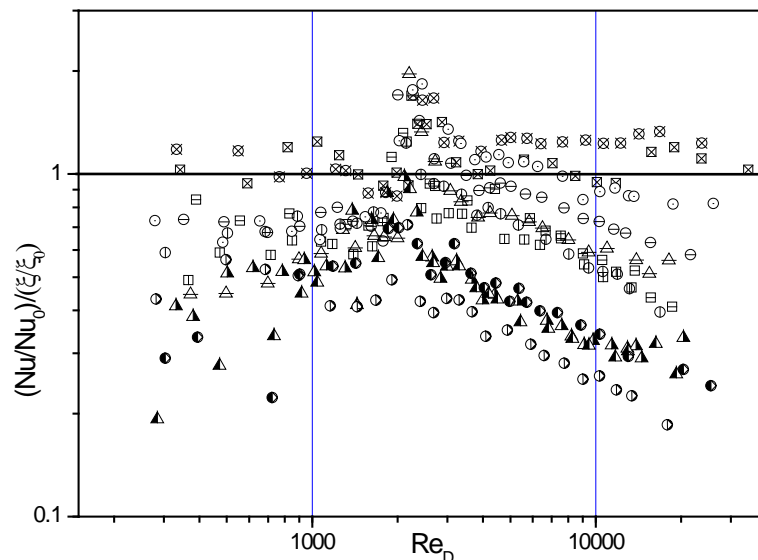


Рис.7. Данные по теплогидравлической эффективности в трубах с кольцевыми выступами по сравнению с гладкими трубами. Обозначение табл.1.

На рисунках 5 и 6 приведены уровни повышения коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи при различных режимах течения в трубах с кольцевыми выступами. Анализ данных показывает, что с увеличением относительной высоты выступов d/D возрастает уровень повышения теплоотдачи, однако сопоставимо растет и уровень гидравлического сопротивления данных труб. Увеличение относительного шага t/D между выступами чаще приводит к падению гидросопротивления, что отмечалось и в [6]. Интенсификация теплоотдачи в области турбулентных течений достигает больших значений, чем в области ламинарных течений, на что указывалось в [6]. В диапазоне чисел $Re=1000-4000$ наблюдается резкое увеличение повышения теплоотдачи и гидросопротивления в дискретно-шерховатых трубах по сравнению с гладкими трубами. Это связано с тем, что в

гладких трубах может еще наблюдаться ламинарное течение, а в дискретно-шероховатых при этих же числах Рейнольдса уже развивается турбулентное и переходное течение.

Анализ теплогидравлической эффективности труб с кольцевыми выступами по критерию М.В. Кирпичева $((Nu / Nu_0) / (\xi / \xi_0))$ (рис.7) показал, что при турбулентном течении наибольшая теплогидравлическая эффективность свойственна трубам с выступами $d/D=0,98$, что подтверждает выводы [2,3]. При числах Рейнольдса от 3000 до 10000 максимальная теплогидравлическая эффективность обеспечивается трубами с $d/D=0,98, 0,97, 0,91, 0,9$ и $0,86$ при снижении чисел Рейнольдса. Однако, при ламинарных течениях – числа Рейнольдса меньше 1000 – максимальная теплогидравлическая эффективность опять свойственна трубам с $d/D=0,98$, что несколько расходится с рассуждениями работы [3]. Ожидаемая высокая теплогидравлическая эффективность трубы с $d/D=0,74-0,8$ при $Re < 2000$ не подтверждена. Выбор «высоких» выступов связан с тем, что толщина ламинарного пограничного слоя значительно больше толщины вязкостного подслоя турбулентного пограничного слоя. Высокая тепловая эффективность данных труб нивелируется высоким уровнем роста гидросопротивления.

Полученные данные позволяют получить расчетные рекомендации по переходным числам Рейнольдса, коэффициентам теплоотдачи и гидросопротивления при ламинарном и переходном режимах течения в дискретно-шероховатых трубах с кольцевыми выступами, а также обосновать выбор рациональных параметров интенсификаторов теплоотдачи для достижения максимальных значений теплогидравлической эффективности.

В последнее время в литературе появляются утверждения, что использование сферических выступов и выемок может привести к более высокой теплогидравлической эффективности теплообменных каналов, по сравнению с кольцевыми выступами [4,5]. Поэтому в данной работе были проведены исследования теплогидравлической эффективности труб с системами сферических выступов и выемок на внутренней поверхности.

На рисунках 8 и 9 показаны данные по коэффициентам гидросопротивления и средним коэффициентам теплоотдачи в каналах с шероховатостью в виде системы сферических выемок и выступов.

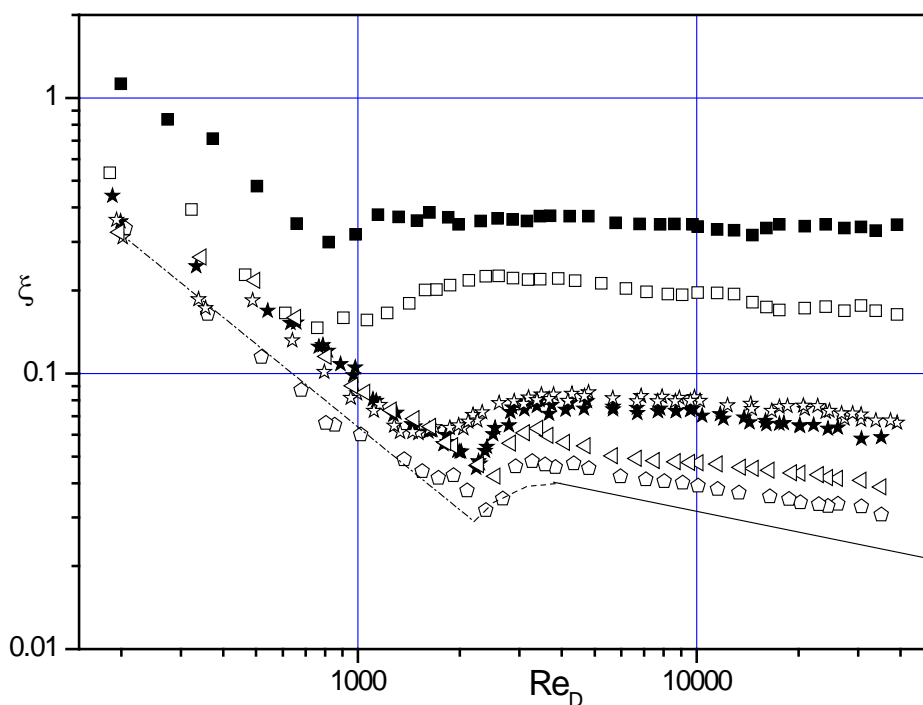


Рис.8. Экспериментальные данные по гидросопротивлению в каналах со сферическими выступами и выемками. Обозначение в табл.2. Линии – расчет по (1) и (2).

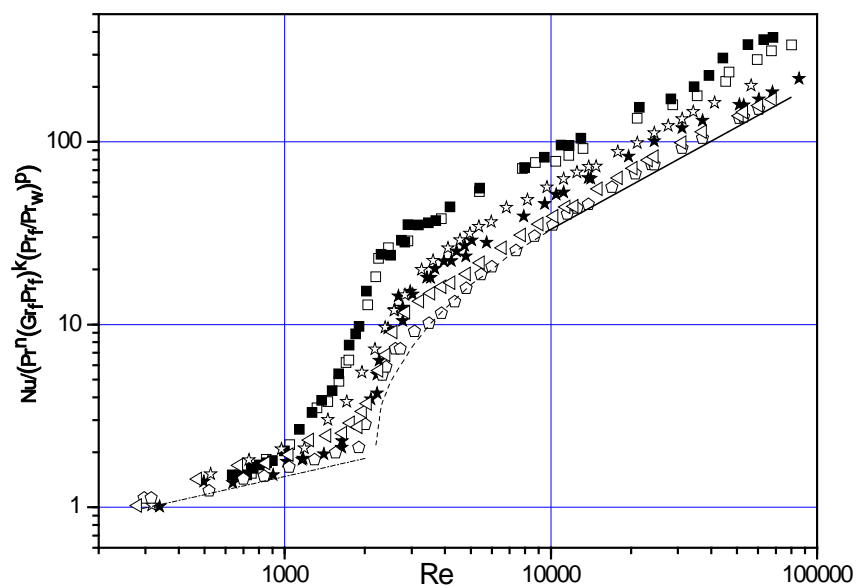


Рис.9. Экспериментальные данные по теплоотдаче в каналах со сферическими выступами и выемками. Обозначение в табл.2. Линии – расчет по (3).

Также как и для кольцевых выступов, для сферических выступов и выемок с ростом высоты выступов наблюдается более ранний ламинарно-турбулентный переход по сравнению с гладкой трубой. При увеличении высоты выступов значительно возрастает уровень гидравлического сопротивления, по сравнению с кольцевыми выступами. Это связано с дополнительной диссипацией энергии на образование продольных вихрей за сферическими выступами данной формы.

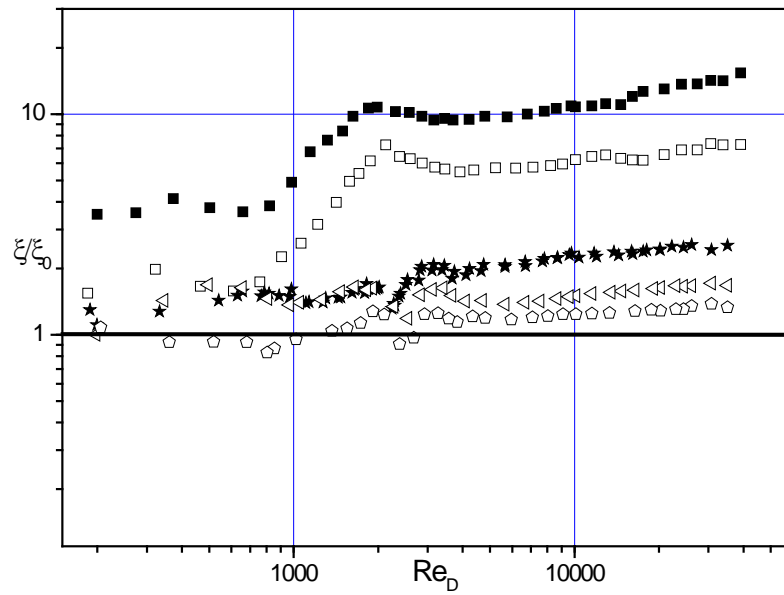


Рис.10. Данные по повышению коэффициентов гидросопротивления в трубах со сферическими выступами и выемками по сравнению с гладкими трубами. Обозначение табл.2.

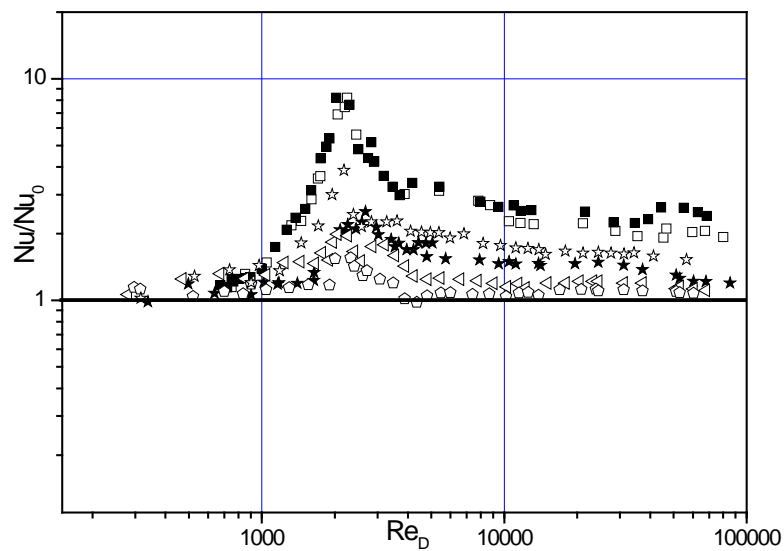


Рис.11. Данные по повышению коэффициентов теплоотдачи в трубах со сферическими выступами и выемками по сравнению с гладкими трубами. Обозначение табл.2.

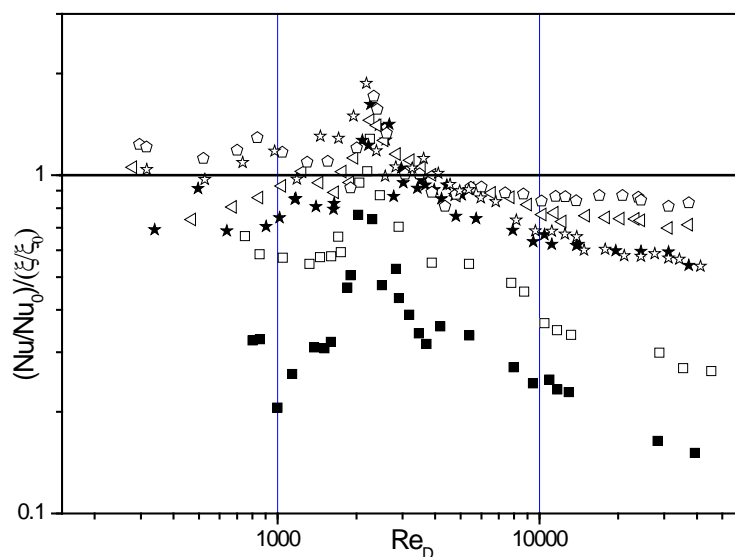


Рис.12. Данные по теплогидравлической эффективности в трубах со сферическими выступами и выемками по сравнению с гладкими трубами. Обозначение табл.2.

Теплогидравлическая эффективность труб с дискретной шероховатостью в виде сферических выступов (рис.12) в ламинарной области сопоставима с уровнем труб с кольцевыми выступами. Максимальная теплогидравлическая эффективность свойственна сферическим выступам с $d/D=0,9$, т.е. более высоким, по сравнению с кольцевыми выступами. При числах Рейнольдса от 1000 до 4000 теплогидравлическая эффективность также полностью сопоставима с уровнем эффективности кольцевых выступов. Максимальные значения эффективности свойственны сферическим выступам с $d/D=0,98$.

При турбулентных режимах течения теплогидравлическая эффективность ниже, чем у кольцевых выступов и даже чем в гладком канале. Это ранее было получено в [2]. Наибольшая теплогидравлическая эффективность свойственна трубам с $d/D=0,9$.

Полученные данные позволяют получить расчетные рекомендации по переходным числам Рейнольдса, коэффициентам теплоотдачи и гидросопротивления при ламинарном и переходном режимах течениях в дискретно-шероховатых трубах со сферическими выступами, а также обосновать выбор рациональных параметров интенсификаторов теплоотдачи для достижений максимальных значений теплогидравлической эффективности.

Испытание теплообменного аппарата с интенсификацией теплоотдачи

Для проверки полученных результатов исследован кожухотрубчатый теплообменный аппарат с интенсифицированными и гладкотрубными трубными пучками (рис.13). Результаты исследования теплообменного аппарата подтвердили высокую эффективность использования дискретной шероховатости в виде сферических выемок/выступов.

Ниже приведены результаты испытаний кожухотрубного теплообменника при использовании в качестве теплоносителя горячей воды внутри труб с полусферическими выступами и холодной воды в межтрубном пространстве с полусферическими выемками (рис.14). Диапазон изменения параметров: горячая вода – расход $G_r=0,022\div 0,28$ кг/с, температура на входе в теплообменник 75-83 °С, расход холодной воды принимался постоянным – $G_x=0,69$ кг/с, температура на входе 20-22 °С.



Рис.13. Внешний вид интенсифицированного и гладкотрубного кожухотрубного теплообменного аппарата

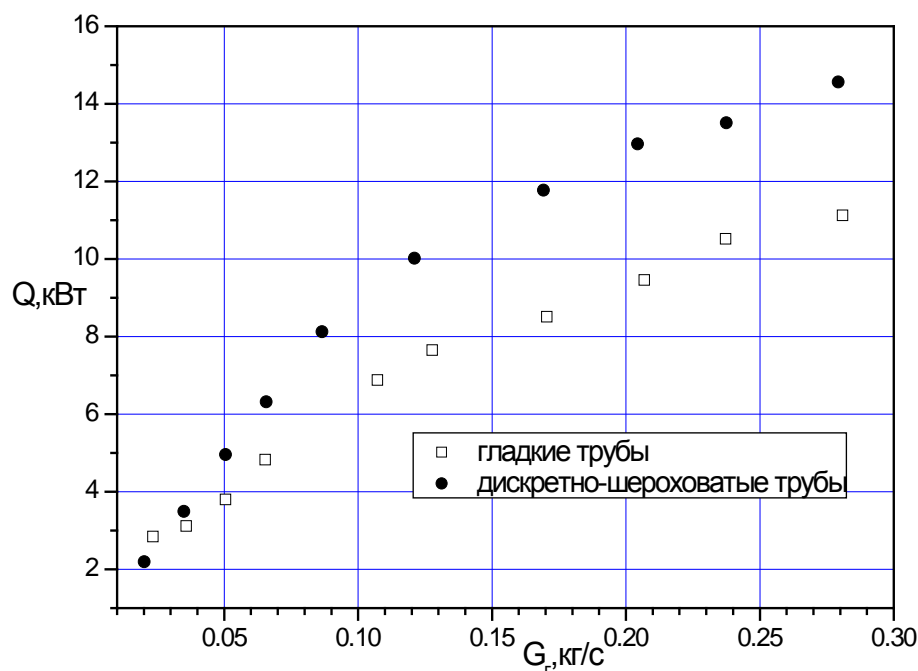


Рис.14. Результаты тепловых испытаний интенсифицированного и гладкотрубного кожухотрубного теплообменного аппарата

Как видно, из рисунка 14 при малых расходах теплоносителя $G_r=0,02$ кг/с тепловые мощности одинаковы для гладкого и интенсифицированного теплообменного аппарата, это объясняется тем, что при данном расходе теплоносителя в трубах реализуется ламинарное безотрывное обтекание поверхности. При увеличении расхода горячей теплоносителя G_r до значения 0,035 кг/с происходит увеличение теплового потока на 18% снимаемого с интенсифицированного теплообменного аппарата, по сравнению с гладкотрубным. При увеличении расхода горячей теплоносителя до $G_r=0,1$ кг/с прирост теплового потока интенсифицированного теплообменного аппарата по сравнению с гладкотрубным составляет

уже 30%. При дальнейшем увеличении расхода горячего теплоносителя G_r до 0,17 кг/с уменьшается темп роста теплового потока и увеличение теплового потока в интенсифицированном теплообменнике по сравнению с гладкотрубным составляет 28%, а при $G_r=0,30$ кг/с – 26%.

Заключение

В работе представлены результаты по исследованию гидросопротивления и теплоотдачи в каналах с кольцевыми и сферическими выступами. Проведено сравнение их теплогидравлической эффективности. Уделено особое внимание переходному режиму течения. Показано, что использование 2D шероховатости позволяет достигать более высокой теплогидравлической эффективности в области турбулентных течений и практически сопоставимых данных в переходной и ламинарной области, по сравнению с 3D шероховатостью. Полученные данные позволяют обосновать оптимальные условия использования данных интенсификаторов и механизмы интенсификации теплообмена.

Работа подготовлена по результатам грантов РФФИ №09-08-00024-а, 10-08-00110-а, 11-08-00355-а, 12-08-33032 программы Минобразования РФ №2.1.2.5495 и ФЦП «Кадры» №14.740.11.0524, 14.740.11.0320, «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы № 14.132.21.1746.

Список обозначений

d – диаметр канала по выступам, м; D – диаметр канала, м; f – плотность расположения выступов/выемок; Gr – Число Грасгофа, h – глубина выемки или высота выступа, м; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; L – длина канала, м; Nu_D – число Нуссельта, рассчитанное по D ; η – коэффициент теплогидравлической эффективности, Pr – число Прандтля, Re_D – число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру канала D ; S_1, S_2 – продольный и поперечный шаг выступов, t – температура, °С. Индексы: $0, gl$ – данные для гладкого канала, f – жидкость, w – стенка.

Библиографический список

1. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
2. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиаев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.

3. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Потенциал энергосбережения различных способов закрутки потока и дискретно шероховатых каналов // Известия РАН. Энергетика. 2010. №1. с.13-49.
4. Patent USA 4690211. Heat transfer tube for single phase flow. Date of Patent - Sep.1, 1987.
5. Vicente P.G., Garcia A., Viedma A. Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes. Int. J.of Heat and Mass Transfer. 2002. V.45. P. 543 – 553.
6. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
7. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 143 с.
8. Готовский М.А. Некоторые особенности теплоотдачи и сопротивления потока высоковязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью при переходных режимах течения // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. с.54-57.
9. Надир С.М., Жаргалхуу Л., Рыжков А.Ф. Теплогидравлическая эффективность промышленных турболизаторов в переходных режимах течения теплоносителя // Промышленная энергетика. 2006. № 4. С.44-50.
10. Garcia A, Vicente P.G., Viedma A. Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers. Int. J. of Heat and Mass Transfer.2005. V.48. P.4640–4651.
11. Vicente P.G., Garcia A., Viedma A. Mixed convection heat transfer and isothermal pressure drop in corrugated tubes for laminar and transition flow. Int. Comm. Heat Mass Transfer. 2004. V. 31. P.651–662.
12. Vicente P.G., Garcia A., Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2004. V.47. P.671–681.
13. Vicente P.G., Garcia A., Viedma A. Experimental study of mixed convection and pressure drop in helically dimpled tubes for laminar and transitional flow. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2002. V.45. 2002. P.5091–5105.
14. Молочников В.М., Паерелий А.А., Душина О.А., Кирилин А.К. Ламинарно-турбулентный переход в дискретно шероховатых каналах // Тепловые процессы в технике, 2011, №5. с.194-198.

Сведения об авторах

Щелчков Алексей Валентинович, доцент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), к.т.н.

Ул. Карла Маркса, 10; г. Казань, Республика Татарстан, 420111
тел.: +7(951)068-01-97, e-mail: lexa_kzn@mail

Попов Игорь Александрович, профессор Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), д.т.н.

Ул. Карла Маркса, 10; г. Казань, Республика Татарстан, 420111

Яркаев Марсель Зуфарович, аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ)

Ул. Карла Маркса, 10; г. Казань, Республика Татарстан, 420111
тел.: +7(927)245-99-91, e-mail: marselyarkaev@gmail.com

Русев Алексей Константинович, студент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ).

Ул. Карла Маркса, 10; г. Казань, Республика Татарстан, 420111
тел.: +7(960)040-52-75, e-mail: msshadowsm@gmail.com