

Введение Одним из промышленно перспективных способов повышения эффективности теплообменного оборудования является использование дискретно шероховатых труб [1,2,14]. 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 интенсификаторов связан с необходимостью разрушения ламинарного пограничного слоя или вязкостного подслоя турбулентного пограничного слоя. При переходном режиме использование интенсификаторов с параметрами, оптимальными для ламинарного или турбулентного течения, может не привести к ожидаемому эффекту или резкому уменьшению теплогидравлической эффективности. Все это касается и интенсификаторов в виде различного типа 2D и 3D дискретной шероховатости (выступы поперечные, сферические и др.). В современной мировой литературе имеется ограниченное количество работ посвященных исследованиям интенсификации теплоотдачи при переходных режимах течения [7-13]. В них не дается конкретных рекомендаций по выбору оптимальных параметров интенсификаторов и возможностям их изменения при изменении скорости при переходном режиме течения. Результаты последних результатов исследований [3] позволяют утверждать, что поверхностные интенсификаторы могут обеспечить значительные показатели теплогидравлической эффективности при переходных режимах течения. При этом указывается, что 3D шероховатость может обеспечить значительную теплогидравлическую эффективность [4,5].

Основные результаты Условия экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования гидродинамики и теплоотдачи проводились при вынужденном течении воды в трубах длиной $L=1000$ мм, внутренним диаметром $D=7,6$ и $D=10,2$ мм, относительной длиной $L/d=100$. Характерные геометрические и безразмерные параметры труб с кольцевыми выступами (2D-шероховатость) и с полусферическими выступами и выемками (3D-шероховатость) представлены в табл.1 и 2. Таблица 1 - Геометрические характеристики теплообменных труб с 2D шероховатостью № h, мм D, мм L, мм t, мм d/D t/D t/h Обозн.

1	0,11	10	1000	2,5	0,98	0,25	22,7	2	0,5	10	1000	2,5	0,9	0,25	5
3	0,6	10	1000	2,5	0,88	0,25	4,2	4	0,5	10	1000	5	0,9	0,5	10
5	1	10	1000	5	0,9	0,5	10	5	1	10	1000	5	0,8	0,5	5
6	1	10	1000	4	0,74	0,5	4	7	0,15	10	1000	10	0,97	1	67
7	8	0,45	10	1000	10	0,91	1	22,2	9	0,5	10	1000	10	0,9	1
20	10	0,7	10	1000	10	0,86	1	14,3	11	1	10	1000	10	0,8	1
10	12	1	7,6	1000	7,5	0,74	1	7,5							

Таблица 2- Геометрические характеристики теплообменных труб с 3D шероховатостью № h, мм d_c , мм d/D h/ d_c S1, мм S2, мм f Обозн.

1с	1,3	4	0,76	0,33	9	6	0,27	2с	1,3	5	0,76	0,26	9	6	0,42	3с	0,5	2,6	0,9	0,2	6	5	0,2	4с	0,5	2,5	-
0,2	7	7	0,2	5с	0,1	1,8	0,98	0,05	10	6	0,05	6с	0,5	2,6	0,9	0,2	9	6	0,11								

Трубы 1с-3с, 5с и 6с со сферическими выступами внутри, 4с - со сферическими выемками внутри

трубы. В трубах осуществлялась вынужденная конвекция дистиллированной воды, подаваемой из накопительного бака с помощью насоса через систему гасителей пульсаций. Теплообменная труба нагревалась омическим способом (непосредственно пропусканием электрического тока по ней). Для стабилизации течения и исключения дополнительных возмущений потока устанавливались прямолинейные участки с внутренним диаметром 10,2 или 7,6 мм на входе с $L/d=200$ и на выходе $L/d=100$. В ходе эксперимента измерялись: расход воды через теплообменную трубку, полное и статическое давление на входе и перепад давлений на теплообменной трубке, температуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменной трубки, и температуры трубки по длине трубки в характерных точках, параметры электрического тока системы нагрева трубки. По измеряемым данным определялись потери давления и коэффициенты гидросопротивления, тепловые потоки, воспринимаемые теплоносителем и средние коэффициенты теплоотдачи на участках трубы и по всей трубе.

Внешний вид дискретной шероховатости в виде полусферических выступов и выемок (3D-шероховатость) и кольцевых выступов (2D-шероховатость) представлен на рисунке 1. 3D дискретная шероховатость труб достигалась штамповкой, а 2D - накаткой. Рис. 1 - Фотографии профилей сечения труб с полусферическими выступами (3D-шероховатость) и с кольцевой накаткой (2D-шероховатость)

Результаты тестовых опытов по гидросопротивлению и теплоотдаче прямой трубы удовлетворительны - с отклонениями не более $\pm 5, \pm 10\%$ (показано далее на рис.2) - согласуются с известными зависимостями: для ламинарного режима - $\chi = 64/ReD$ (1) для турбулентного режима - $\chi = 0,3164/ ReD^{0.25}$ (2) (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; $n=0,43; k=0; p=0,25$; режима. (по данным табл.3)

Таблица 3 - Зависимость величины K_0 от критерия Re

ReD	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		

Гидросопротивление и теплоотдача в каналах с кольцевой накаткой Гидросопротивление и теплоотдача труб с кольцевой накаткой при турбулентном режиме течения теплоносителя хорошо изучены [6]. Сегодня данный способ интенсификации теплообмена один из самых используемых в технических приложениях. Однако для ламинарной области течений и переходных режимов для данного вида интенсификаторов теплообмена имеется ограниченное количество данных, что не позволяет выбрать оптимальные размеры интенсификаторов для максимальной интенсификации теплоотдачи или достижения максимальной теплогидравлической эффективности теплообменных труб с данным видом интенсификаторов теплоотдачи. На рис.2 показаны данные по коэффициентам гидросопротивления и средним коэффициентам теплоотдачи в каналах с кольцевой накаткой. Рис. 2 - Экспериментальные данные по гидросопротивлению и теплоотдаче в каналах с кольцевой накаткой.

Обозначение в табл.1. Линии – расчет по (1,2) и (3) Данные для турбулентного режима сравнивались с данными [6], отмечено удовлетворительное согласование данных с отклонениями до 15%. Из анализа рис.2 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 из изменения с данными [6]. Анализ данных по повышению коэффициентов теплоотдачи и гидросопротивления при различных режимах течения в трубах с кольцевой накаткой показывают, что с увеличением высоты выступов возрастает уровень повышения теплоотдачи, однако сопоставимо растет и уровень гидросопротивлений в подобных трубах. Увеличение шага между выступами чаще приводит к росту 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]. При $Re=1000-4000$ наблюдается резкое увеличение повышения уровней теплоотдачи и гидросопротивлений 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-шерховатых при этих же числах Рейнольдса уже развивается турбулентное и переходное течение. Полученные данные позволяют получить расчетные рекомендации по переходным числам Рейнольдса, коэффициентам теплоотдачи и гидросопротивления при ламинарном и переходном режимах течения в дискретно-шерховатых трубах с кольцевой накаткой, а также обосновать выбор рациональных параметров интенсификаторов теплоотдачи для достижений максимальных значений тепловой или теплогидравлической эффективности. Гидросопротивление и теплоотдача в каналах с трехмерной шероховатостью В последнее время в литературе появляются утверждения, что использование трехмерной шероховатости может привести к более высокой теплогидравлической эффективности теплообменных каналов, по сравнению с двухмерной [4,5]. Поэтому в данной работе были проведены исследования теплогидравлической эффективности труб с системами сферических выемок и выступов на внутренней поверхности. На рис.3 показаны данные по коэффициентам гидросопротивления и средним коэффициентам теплоотдачи в каналах с трехмерной шероховатостью в виде системы сферических выемок и выступов. Также как и для двухмерной шероховатости, с ростом высоты выступов наблюдается более ранний ламинарно-турбулентный переход по сравнению с гладкой трубой. При увеличении высоты выступов значительно возрастает уровень гидросопротивления, чем при двухмерной шероховатости. Это связано с дополнительной диссипацией энергии на образование продольных вихрей за трехмерными выступами данной формы. 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 тепловой или теплогидравлической эффективности. Рис. 3 - Экспериментальные данные по гидросопротивлению и по средним коэффициентам теплоотдачи в каналах с трехмерной шероховатостью. Обозначение в табл.2. Линии - расчет по (1) и (2) Заключение В работе представлены первичные результаты по исследованию гидросопротивления и теплоотдачи в каналах с кольцевой накаткой и системами сферических выступов/выемок. Уделено особое внимание переходному режиму течения. 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, программы Минобразования РФ №2.1.2.5495 и ФЦП «Кадры» №14.740.11.0524, 14.740.11.0320. 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 D ; S_1, S_2 - продольный и поперечный шаг выступов, t - температура, °C. Индексы: 0, гл - данные для гладкого канала, e - эквивалентный, f - жидкость, w - стенка.