

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

УДК 536.27

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ВЫСТУПАМИ

А.В. Щелчков, И.А. Попов, М.З. Яркаев, Д.В. Рыжков

lexa_kzn@mail.ru, popov-igor-alex@yandex.ru, marsel3000@yandex.ru, dv-r@ya.ru

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева - КАИ»

Ключевые слова: интенсификация, теплоотдача, гидравлическое сопротивление, сферические выступы

Аннотация

В работе представлен аналитический обзор экспериментальных исследований гидравлического сопротивления и теплоотдачи в каналах с интенсификаторами в виде систем сферических выступов в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров. Выработан единый подход к обобщению экспериментальных данных различных авторов с учетом различий в геометрии теплообменных поверхностей. Получены единые универсальные обобщающие зависимости для коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в каналах со сферическими выступами.

Введение

Для повышения эффективности теплообменного оборудования широко используются различные методы интенсификации теплообмена. Среди них выделяют поверхностные интенсификаторы теплоотдачи, основными механизмами интенсификации, при использовании которых являются – периодическое разрушение пограничного слоя (вязкостного подслоя турбулентного пограничного слоя или ламинарного пограничного слоя в зависимости от режима течения), перемешивание и турбулизация пристенных слоев потока жидкости или газа [1]. Данный вид интенсификаторов теплообмена отличается высокой теплогидравлической эффективностью $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0) \geq 1$, т.е. прирост теплоотдачи Nu/Nu_0 сопоставим и даже превышает прирост гидросопротивления ξ/ξ_0 [2,3,4]. В последние годы большой интерес представляют поверхностные интенсификаторы в виде систем сферических выемок. Обзор исследований в данной области представлен в [5]. При нанесении рельефов из сферических выемок методом холодной штамповки на плоские поверхности или накатки на трубы с

противоположной стороны формируются рельефы из сферических выступов. По данному виду интенсификаторов в научно-технической литературе существует ограниченное количество публикации об исследовании их теплогидравлических характеристик.

В настоящее время кожухотрубчатые теплообменники с интенсификаторами в виде систем сферических выступов/выемок в основном применяются в пищевой и нефтехимической промышленности, энергетике. В качестве примеров можно указать кожухотрубчатые теплообменники серии Dimpleflo с профилированными трубами со сферическими выступами компании Teralba Industries (Австралия), кожухотрубные теплообменники и теплообменники типа «труба в трубе» компания JBT FoodTech (США), теплообменные трубы корпорации HRS Group (Испания) и т.д. [5,6].

Обзор литературных источников и постановка задачи

В этом разделе представлен обзор различных экспериментальных исследований по гидросопротивлению и теплоотдаче каналов со сферическими выступами.

На рис.1 показана схема интенсифицированных труб, где h – высота выступов; t – шаг спиральной линии, по которой нанесены выступы (продольный шаг выступов); s – шаг выступов по спиральной линии (поперечный шаг выступов). Для описания шероховатости использовались два безразмерных параметра – относительная высота выступов h/D и плотность нанесения выступов $D^2/(t \cdot s)$.

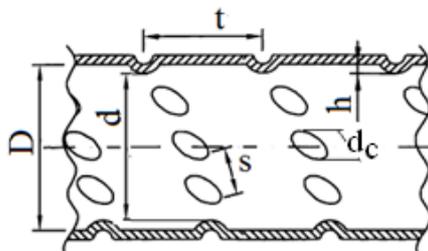


Рис. 1. Схема нанесения сферических выступов на теплообменные трубы

Гидравлический диаметр каналов некруглого сечения определялся по зависимости $D=4F/\Pi$ (F – площадь поперечного сечения канала по основанию выступов (без учета выступов), Π – периметр канала по основанию выступов (также без учета выступов). Диаметр d для каналов некруглого сечения определялся аналогично, но площадь и периметр поперечного сечения канала определялся по вершинам выступов.

Диаметр D , являющийся максимальным внутренним диаметром интенсифицированной трубы, выбран здесь в качестве определяющего размера при определении и расчете Re , Nu и ξ , как рекомендовано А.Берглсом и др. [7] Этот подход широко используется при описании теплогидравлических характеристик интенсифицированных каналов.

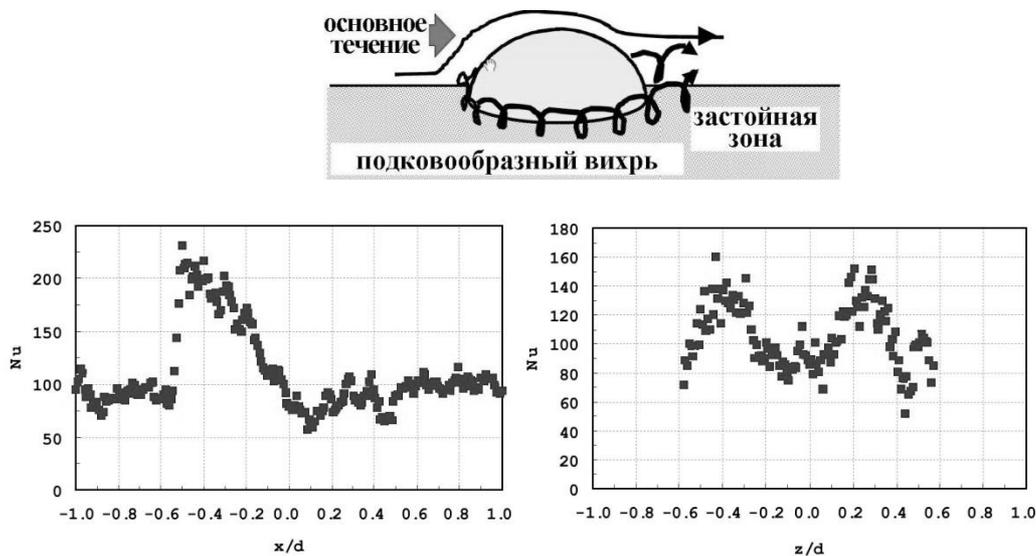


Рис. 2. Схема обтекания выступа и локальные коэффициенты теплоотдачи [8]

Исследования теплообмена и гидросопротивления плоского канала со сферическими выступами на противоположных стенках при течении воздуха ($Re=10000$) проведены в [8]. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи проводилось с использованием термического жидкокристаллического покрытия. Сферические выступы в исследовании располагались в шахматном порядке, в углах равнобедренного треугольника со сторонами 15 мм. Высота выступа составляла $h=3,75$ мм, диаметр выступа в основании $d_c=12,99$ мм (диаметр образующей сферы $d_c=15$ мм), высота канала составляла $H=15$ мм, что обеспечивало относительную высоту выступов $2h/d_c=0,5$ и относительную высоту канала $H/d_c=1,15$.

При наличии сферического выступа на поверхности, основной поток натекает на переднюю кромку выступа и обтекает его с формированием подковообразного вихря (рис.2). С тыльной стороны выступа формируется застойная зона. Данная картина течения позволяет объяснить авторам [8] распределение локальных коэффициентов теплоотдачи на выступе и за ним. Максимум локальных коэффициентов теплоотдачи приходится на точку с координатами $x/D=-0,4$ и $y/D=0$ в зоне с минимальной толщиной погранслоя и центре формирования подковообразного вихря. В поперечном сечении высокие значения коэффициентов теплоотдачи приходятся на зоны с координатами $z/D= \pm 0,3$ вследствие воздействия на течение в этих зонах подковообразного вихря. Увеличение средней теплоотдачи в канале с выступами составляет приблизительно 3,7 раза по сравнению с гладким каналом. При этом коэффициент гидравлического сопротивления увеличивается в 20 раз.

Механизмы интенсификации теплоотдачи на основе визуализации жидкокристаллической термографии (TLC – thermochromic liquid crystals) при вынужденном течении воздуха в плоском канале с системами сферических выступов рассмотрены в [9]. Сферический выступ высотой 5 мм обтекался потоком горячей воды ($Re=570 \dots 10^3$) в канале высотой 10 мм и шириной 40 мм. Результаты

визуализации показали, что при $Re=550$ наблюдается ламинарное обтекание выступа, но выступ генерирует возмущения в следе за собой, что повышает в нем теплоотдачу. Повышенная теплоотдача наблюдается и в зоне формирования подковообразного вихря. При обтекании выступа при $Re=1025$ происходит отрыв турбулентного потока за выступом и образование значительной зоны рециркуляции длиной $(1\div 2)d_c$. При этом наблюдается неустойчивость зоны рециркуляции, что дополнительно вносит возмущения в поток за выступом, интенсифицируя процесс теплоотдачи в следе.

Объектами исследования в [10] служили пакеты из тонких (0,5 мм) пластин из стали 08 с отштампованными выступами сферической формы, шахматного и коридорного расположения. Две пластины, наложенные друг на друга и пропаянные по отбортованным кромкам, образуют пакет с фланцами для крепления во внутренней полости теплообменника. Пакеты имеют щелевой прямоугольный канал с выступами размером $2,5\times 145\times 475$ мм для пластин со сферическими выступами. Сферические выступы по форме совпадают с шаровым сегментом диаметром основания 6,5 мм. При изготовлении пакета выступы одной пластины опираются на плоские участки между впадинами другой. Увеличение интенсивности теплоотдачи за счет выступов, приводящих к резкому увеличению степени турбулентности потока, в каждой из трех областей происходит по-разному. Эта причина особенно резко проявляется при малых числах $Re=10^3\dots 2,3\cdot 10^3$, когда в гладких каналах (без выступов) течение ламинарное. Увеличение коэффициента теплоотдачи α здесь наиболее высокое и при равных условиях в 2,1 раза выше, чем в гладких каналах. В области развитого турбулентного течения ($Re>10^4$) увеличение коэффициента теплоотдачи здесь достигает величины порядка 1,65 раза, по сравнению с гладким каналом.

Сотрудники корпорации Hitachi (Япония), Х.Кувахара и др. [11], зарегистрировали патент США 4690211 (1987) по трубам, имеющим ряды прерывистых выступов, сформированных на внутренней поверхности по одной или более спиральных кривых. Исследования проведены на 7 трубах в диапазоне изменения геометрических параметров: высота выступов $h=0,45, 0,5$ и $0,6$ мм, продольный шаг $t=5, 6$ и 7 мм и шаг по окружности $s=2,5; 4$ и 5 мм, $0,028<h/D<0,038$; $0,32<t/D<0,64$ и $0,16<s/D<0,32$. Проведена оценка тепловых и гидравлических характеристик при течении воды в диапазоне чисел Рейнольдса $5\cdot 10^3<Re<10^5$ и числа Прандтля $Pr=5$. Увеличение коэффициентов теплоотдачи достигало 2,2 раз при росте гидросопротивления до 4 раз, по сравнению с гладкой трубой. Уменьшение шага выступов по окружности увеличивает гидросопротивление, но на теплоотдачу практически не влияет. С ростом продольного шага в исследованном диапазоне уменьшаются и прирост теплоотдачи, и прирост гидросопротивления.

Т.Дж.Рабас и др. [12] исследовали две трубы со спиральными выступами малой высоты, подобные трубам Tred-19F и Tred-26D производства компании Sumitomo (Япония). Высота выступов составляла $h/D=0,017$, шаг выступов $t/D=0,18$ и $0,09$. Режимные параметры изменялись в диапазон $6\cdot 10^3<Re<7\cdot 10^4$ и $Pr=5,7$. Зафиксирован рост гидросопротивления вследствие нанесения выемок до 2,3 раз при максимальном росте коэффициентов теплоотдачи до 1,6 раз по сравнению с гладкой трубой.

К.О.Олссон и Б.Сунден [13] исследовали тепловые и гидравлические характеристики пяти плоских труб с внешней стороны покрытых выемками, а с внутренней стороны, выступами различной формы. Три трубы имели сферическими выступы со следующими безразмерными параметрами: $d/D=0,7451$; $0,70784$; $0,67941$ и $t/D=1,27273$; $1,55899$; $1,706$. Основное внимание в работе было уделено определению коэффициентов трения и чисел Нуссельта труб малого диаметра при крупных (высоких) выступах. Исследования проведены при вынужденном течении воздуха в диапазоне чисел $Re=3000\div 10000$. Установлено, что увеличение коэффициентов трения достигало $2,58\div 4,13$ раз, при увеличении теплоотдачи в $1,46\div 1,74$ раза по сравнению с гладким каналом.

Экспериментальные исследования трехмерной шероховатости труб со сферическими выступами П.Г. Висенте, А. Гарсиа и А. Виедма [14,15] выполнены при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. Экспериментально были исследованы 10 спирально накатанных труб из нержавеющей стали 316L с различной геометрией нанесения выступов и одна гладкая труба. Все трубы имели внутренний диаметр $D=16$ мм при толщине стенки 1 мм для удобства накатки интенсификаторов. В экспериментах в качестве рабочих жидкостей использовались вода и этиленгликоль. Безразмерные геометрических параметры варьировался в диапазоне: $0,08 < h/D < 0,12$; $0,65 < t/D < 1,1$ и $s/D=0,55$. Режимные и теплофизические параметры изменялись в пределах $Re=2\cdot 10^3 \dots 10^4$, $Pr=35 \dots 100$ для этиленгликоля и $Re=8\cdot 10^3 \dots 10^5$, $Pr=2,9 \dots 4,5$ для воды. Показано, увеличение теплоотдачи Nu/Nu_0 в диапазоне $Re=8\cdot 10^3 \dots 10^5$ достигает 5 раз по сравнению с гладкой трубой, рассчитывается по уравнению $Nu/Nu_0=64,1(h/D)^{0,6}(D^2/(t\cdot s))^{0,12}(Re-1000)^{-0,21}$. Коэффициенты трения интенсифицированных труб в $2\div 4,5$ раза выше, чем для гладкой трубы. В области переходных чисел Рейнольдса $Re < 4000$, коэффициенты трения максимальны, затем уменьшаются.

Относительный рост трения в интенсифицированных трубах оценивается уравнением: $\xi/\xi_0=69,9(h/D)^{1,67}(D^2/(t\cdot s))^{0,26}Re^{0,06}$. Установлено, что использование сферических выступов приводит к более раннему ламинарно-турбулентному переходу [15]. В области ламинарных течений ($Re < 1400$) повышение коэффициентов гидравлического сопротивления составляет $10\div 30\%$, повышение коэффициентов теплоотдачи при этом также составляет не более 30% .

В [16] экспериментально исследовано турбулентное течение воздуха в квадратном канале с односторонним расположением полукруглых выступов. Цель эксперимента заключалась в исследовании влияния оребрения на коэффициенты сопротивления и теплоотдачи в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=2,3\cdot 10^4 \dots 1,5\cdot 10^5$, что характерно для теплообменных аппаратов, а также для внутреннего охлаждения лопаток турбин. Высота выступов и шаг расположения ребер выбирались из условия минимального возрастания коэффициента сопротивления при максимальном увеличении коэффициента теплоотдачи. В данном случае они составляли $h/D=0,0813$ и $t/h=12,5$, где $h=4$ мм – высота выступа. Исследование проводилось для относительно короткого канала $L/D=7,9$, длина канала составляет $L=300$ мм. В исследовании для пластины с оребрением наблюдалось падение, а затем резкое возрастание местного коэффициента теплоотдачи, приблизительно в середине промежутка между ребрами. Такое поведение можно объяснить

присоединение оторвавшегося на полукруглом ребре потока воздуха к стенке в промежутке между соседними ребрами. Оценка среднего коэффициента теплоотдачи показала, что он оставляет $70,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ для интенсифицированного канала, и $54,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ для гладкой пластины, что на 30% больше, чем для гладкой пластины.

В работе М.Х.Ибрагимова, В.И.Субботина и др. [17] представлены графические зависимости коэффициентов гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для шероховатых труб с шахматным и коридорным расположением, продольными шагами сферических выступов $8 \div 32$ мм высотой $7,87$ мм в диапазоне $Re=4 \cdot 10^3 \dots 1,5 \cdot 10^6$. Наибольший рост гидросопротивления наблюдается в трубах с шахматным расположением выступов и максимальной плотностью их расположения.

В работе К.Л. Муныбина [18] представлены экспериментальные исследования по исследованию гидросопротивления и теплоотдачи труб диаметром $D=50$ мм и длиной $L=2000$ мм со сферическими выступами в диапазоне чисел $Re=2,5 \cdot 10^3 \dots 3,3 \cdot 10^4$. Образцы изготавливались путем гидравлической выпрессовки углублений на исходно гладкой трубе. Выемки располагались в шахматном порядке. Отношение глубины выемки к ее диаметру было постоянным $h/D=0,2$. Высота выступов изменялась от 2 до 10 мм. Шаг выемок составлял $20 \div 40$ мм. Эффект от интенсификации теплоотдачи сферическими выступами составляет до $3 \div 3,5$ раз. Наибольшая интенсификация наблюдалась в трубах с самыми высокими выступами. Рост сопротивления в канале со сферическими выступами значительно выше, чем, например, в трубах со сферическими выемками. Рост гидросопротивления для самых высоких выступов составил до $6,5 \div 8$ раз. Очевидно, это объясняется различием в механизмах турбулизации потока, а также существенным сужением проходного сечения трубы из-за имеющихся в ней выступов.

М.А.Готовский, М.Я.Беленький и Б.С.Фокин [19] провели исследование теплогидравлических характеристик при течении воздуха в круглой обогреваемой трубе с регулярным рельефом на поверхности теплообмена. Изготовленные для проведения экспериментов трубы имели наружный диаметр 40 мм и толщину стенки 1,5 мм. При этом для проведения опытов использовались четыре участка трубы, каждый из которых имел длину 2 м. На трубы был нанесен рельеф, представлявший собой правильную систему сферических выступов диаметром около 4 мм и высотой $0,5 \div 0,6$ мм. Опыты были проведены в интервале чисел Рейнольдса $Re=1,5 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^4$. Увеличение коэффициентов теплоотдачи составляет в среднем 50% по сравнению с гладкой трубой. Коэффициент сопротивления для трубы с выступами превышает соответствующий коэффициент для гладкой трубы примерно на $15 \div 20\%$. Таким образом, в работе [19] исследована интенсификация теплообмена в виде рельефов из сферических выступов и установлено, что имеет место нарушение аналогии Рейнольдса в пользу теплоотдачи, что определяет их высокие показатели эффективности.

Экспериментальные исследования [1] проводились в каналах прямоугольного сечения шириной 96 мм при варьировании высоты канала H в диапазоне от 5 до 12 мм с шахматной системой сферических выемок высотой $h=1,5; 3$ и 5 мм и диаметром основания $d_c=7,14; 9,16$ и 10 мм ($h/d_c=0,21 \div 0,5; h/H=0,125 \div 0,5$;

$H/d_c=0,7\div 1,68$). Полученные результаты демонстрируют, что в диапазоне малых чисел $Re = 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$ увеличение коэффициента гидравлического сопротивления ξ канала достигает максимальных значений – до 20 раз, по сравнению с аналогичным гладким каналом, в то же время увеличение коэффициентов теплоотдачи достигает максимальных значений – до 8 раз, которая уменьшается при увеличении и уменьшении чисел Рейнольдса. В области турбулентных чисел $Re=4 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$ для относительно мелких сферических выступов $h/d_c = 0,21$ в стесненных каналах коэффициент гидравлического сопротивления ξ возрастает до $2\div 2,5$ раз, а для относительно высоких сферических выступов $h/d_c=0,5$ коэффициент гидравлического сопротивления ξ возрастает до 10 раз. Увеличение коэффициента теплоотдачи составляет до 2,5 раз с выступами $h/d_c=0,3$. Рост гидросопротивления опережает рост теплоотдачи. Значения теплогидравлической эффективности составляют $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)=0,1\div 1,2$ для различных геометрических и режимных параметров.

Экспериментальные исследования теплоотдачи и гидросопротивления труб с рельефами из сферических выступов при вынужденном течении воды в диапазоне $Re=200 \dots 4 \cdot 10^4$ представлены в [20]. Профилированные трубы длиной $L=1000$ мм, внутренним диаметром $D=10,2$ мм. Сферические выступы высотой $h=0,5$ и 1,3 мм, диаметром отпечатка $d_c=2,5-5$ мм, расположенных в шахматном порядке с шагами 5-9 мм, при течении воды. Показано, что при малых числах Рейнольдса $Re=200 \dots 10^3$ повышение коэффициентов гидравлического сопротивления в интенсифицированных трубах достигало 4 раз, при интенсификации теплоотдачи не более 1,5 раз. В области турбулентных течений ($Re=4 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^4$) повышение коэффициентов гидравлического сопротивления в интенсифицированных трубах достигало 10 раз, при интенсификации теплоотдачи не более 3 раз. Из-за более раннего ламинарно-турбулентного перехода в трубах с выступами по сравнению с гладкотрубным вариантом в области $Re=10^3 \dots 4 \cdot 10^3$ повышение коэффициентов теплоотдачи достигает 9 раз при росте коэффициентов теплоотдачи до 10,1 раз по сравнению с гладким каналом. Отмечено, что наиболее значительно на теплогидравлические характеристики оказывает влияние относительная высота выступов h/D .

Дж.Чен и др. [21] провели исследования интенсификации теплоотдачи в трубе при течении воды в диапазоне чисел $Re=7 \cdot 10^3 \dots 5,2 \cdot 10^4$. Для всех шести исследованных труб $D=16,6$ с коридорными рельефами из сферических выступов высотой $h=0,5\div 1,5$ мм, диаметром основания $d_c=2\div 5,5$ мм и продольным шагом $t=8\div 14$ мм ($d/D=0,639\div 0,94$ и $t/D=0,482\div 0,843$) получено повышение коэффициентов теплоотдачи на $25\div 137\%$ при увеличении мощности на прокачку теплоносителя на $15\div 84\%$ в сопоставимых условиях. Теплогидравлическая эффективность при этом составляет $(Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)=0,93\div 1,16$. Как и в работе [19], здесь имеет место нарушение аналогии Рейнольдса в пользу теплоотдачи.

Исследования теплоотдачи [22] проведены в плоских каналах шириной 400 мм и высотой от $H=35$ до 100 мм при одностороннем нанесении полусферических выступов высотой $h=35$ мм и диаметром основания $d_c=70$ мм с плотностью 0,058; 0,236; 0,485 и 0,88. Эксперименты проведены при условии $q=\text{const}$ и числа $Re=6,4 \cdot 10^3 \dots 84 \cdot 10^4$. В работе выявлено, что максимальные значения коэффициентов теплоотдачи в канале наблюдались при плотности нанесения

выступов 0,236 в исследованном диапазоне, при этом относительная высота выступов h/H не оказывала влияние на теплоотдачу. Увеличение теплоотдачи при нанесении выступов с указанной плотностью составило 17%. С увеличением до 0,88 или уменьшением плотности нанесения выемок до нуля теплоотдача снижалась до уровня гладкого канала. Подобные исследования проведены в [23].

Диапазоны исследованных геометрических параметров d/D и t/D в работах [1, 11-15, 17-18, 20, 21] представлены на рис.3.

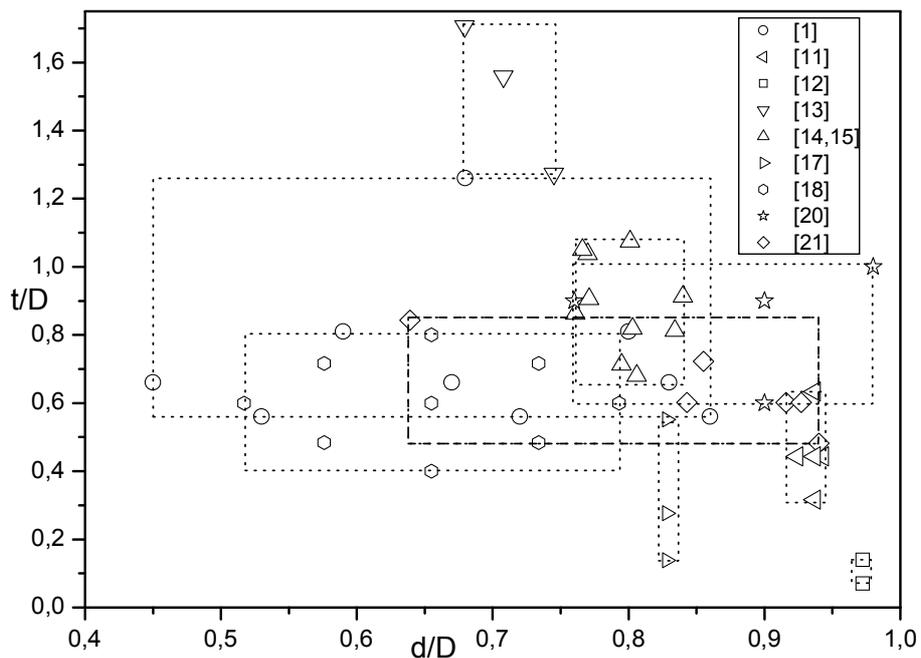


Рис. 3. Диапазоны исследованных геометрических параметров d/D и t/D

По результатам анализа имеющихся в литературных источниках [1,11,13-15,17,18,20,21] данных по гидросопротивлению и теплоотдаче труб и плоских каналов с двухсторонним расположением выступов было решено провести их совместное обобщение для получения единых универсальных зависимостей для расчета гидросопротивления и теплоотдачи каналов различного сечения с рельефами из сферических выступов. Для совместного анализа рельефов с шахматным и коридорным расположением выступов применен подход, описанный в работах [11-15], когда шахматное и коридорное расположение приводится к единой геометрии, различающейся плотностью расположения выемок по спиральной линии (шагом выступов по спирали s и углом наклона спиральной линии к направлению движения теплоносителя) (рис.4).

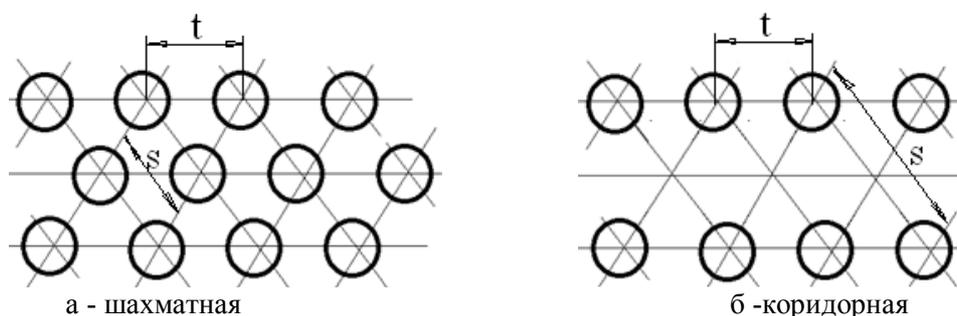


Рис. 4. Геометрия расположения выступов на теплообменной поверхности

Гидравлическое сопротивление каналов со сферическими выступами

Исследования гидросопротивления труб и плоских каналов с двухсторонним расположением сферических выступов проведены в [1,11,13-15,17,18,20,21]. Весь объем экспериментальных данных представлен на рис. 5, а в таблице, диапазон исследованных конструктивных параметров интенсификаторов. Данные охватывают ламинарный, переходный и турбулентный режим течения.

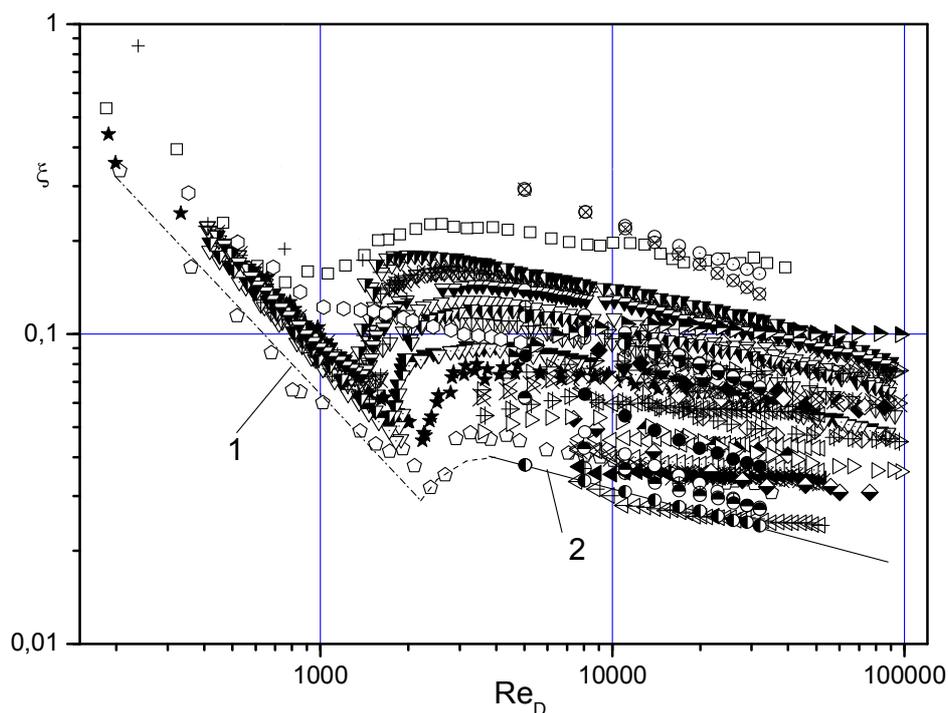


Рис. 5. Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению труб и плоских каналов с двухсторонним расположением выступов. Обозначения см. табл. 1 (1 – расчет по $\xi=64/Re$, 2 – расчет по $\xi=0,3164/Re^{0,25}$)

Наличие сферических выступов обеспечивает более ранний ламинарно-турбулентный переход (рис. 5). При этом с увеличением высоты выступов переход наступает при значительно меньших числах Рейнольдса. Следует отметить, что данные для ламинарного и переходного режима течения приведены только в [15,20]. Ограниченность данных для ламинарного и переходного режимов течения не позволяет провести их обобщение и получить универсальную зависимость для расчета гидравлического сопротивления труб и каналов со сферическими выступами. Поэтому совместный анализ и обобщение экспериментальных данных проведены только для турбулентного режима течения.

Таблица 1. Конструктивные параметры труб и каналов с двухсторонним расположением выступов, отобранные для совместного анализа

№	$h \cdot 10^3, \text{м}$	$D \cdot 10^3, \text{м}$	$t \cdot 10^3, \text{м}$	$s \cdot 10^3, \text{м}$	d/D	t/D	s/D	f	Обозн.
[18]	1,3	10	9	4	0,74	0,9	0,6	1,17	
	1,3	10	9	4	0,74	0,9	0,6	1,17	
	0,5	10	6	4	0,9	0,6	0,5	1,038	
	0,5	10	7	7	-	0,7	0,7	1,019	
	0,1	10	10	6	0,98	1	0,6	1,001	
	0,5	10	9	6	0,9	0,9	0,6	1,017	
[12, 13]	1,33	16	13	8,85	0,834	0,813	0,553	1,056	
	1,58	16	13,1	8,99	0,803	0,819	0,562	1,077	
	1,91	16	13,8	8,89	0,761	0,863	0,556	1,108	
	1,28	16	14,6	8,91	0,840	0,913	0,557	1,046	
	1,83	16	14,5	9,02	0,771	0,906	0,564	1,093	
	1,59	16	17,2	9,02	0,801	1,075	0,564	1,059	
	1,84	16	16,6	9,06	0,770	1,038	0,566	1,082	
	1,87	16	16,8	8,9	0,766	1,050	0,556	1,085	
	1,55	16	10,9	8,9	0,806	0,681	0,556	1,090	
1,64	16	11,4	8,76	0,795	0,713	0,548	1,098		
[19]	1,2	16,6	12	17,37	0,855	0,723	1,046	1,025	
	1,5	16,6	14	13,03	0,819	0,843	0,785	1,045	
	0,5	16,6	8	8,69	0,94	0,482	0,523	1,013	
	1,3	16,6	10	8,69	0,843	0,602	0,523	1,071	
	0,7	16,6	10	8,69	0,916	0,602	0,523	1,020	
	0,6	16,6	10	17,37	0,928	0,602	1,046	1,008	
[9]	0,45	16,6	7	2,5	0,943	0,443	0,158	1,042	
	0,45	16,6	7	4	0,943	0,443	0,253	1,026	
	0,45	16,6	7	5	0,943	0,443	0,316	1,021	
	0,5	16,6	5	4	0,937	0,316	0,253	1,045	

№	$h \cdot 10^3, \text{м}$	$D \cdot 10^3, \text{м}$	$t \cdot 10^3, \text{м}$	$s \cdot 10^3, \text{м}$	d/D	t/D	s/D	f	Обозн.
[9]	0,5	16,6	7	4	0,937	0,443	0,253	1,032	
	0,5	16,6	10	4	0,937	0,633	0,253	1,023	
	0,6	16,6	7	4	0,924	0,443	0,253	1,047	
[11]	0,45	3,08	4,8	4,1	0,708	1,558	1,33	1,037	
[1]	1,5	9,5	12	14	0,68	1,26	1,47	1,049	
[15]	5	58	32	44	0,828	0,552	0,759	1,056	
	5	58	32	35,4	0,828	0,552	0,610	1,08	
	5	58	16	23,02	0,828	0,276	0,397	1,213	
	5	58	16	17,7	0,828	0,276	0,305	1,32	
	5	58	8	8,28	0,828	0,138	0,143	2,186	
	5	58	8	9	0,828	0,138	0,155	2,26	
[16]	3,7	50	24,2	31,2	0,852	0,484	0,624	1,066	
	8,3	50	24,2	43,12	0,668	0,484	0,862	1,239	
	3,7	50	35,8	53,1	0,852	0,716	1,062	1,026	
	8,3	50	35,8	40,83	0,668	0,716	0,817	1,171	
	2	50	30	41,22	0,92	0,600	0,824	1,012	
	10	50	30	41,22	0,6	0,600	0,824	1,293	
	6	50	20	33	0,76	0,400	0,660	1,198	
	6	50	40	47,8	0,76	0,800	0,956	1,068	
	6	50	30	84,1	0,76	0,600	1,682	1,052	
	6	50	30	33,86	0,76	0,600	0,677	1,129	
6	50	30	39,81	0,76	0,600	0,796	1,109		

Согласно подхода, описанного в [11-15], произведено совместное обобщение экспериментальных данных для «коридорной» и «шахматной» геометрии расположения сферических выступов на поверхности.

В ходе совместного анализа установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления в диапазоне чисел $Re=5 \cdot 10^3 \dots 10^5$ пропорционален Re в степени $n=0,2 \div 0,3$, причем не отмечено влияния n от геометрических и режимных параметров. При дальнейшем обобщении использована зависимость $\xi \sim Re^{-0,25}$, характерная для турбулентного течения в гладких трубах.

В качестве безразмерных геометрических параметров сферических выступов использовались: относительная высота выступов d/D , относительный продольный шаг по спиральной линии t/D , относительный поперечный шаг по спиральной линии s/D , относительная плотность расположения f , выраженная как увеличение площади поверхности теплоотдачи за счет нанесения сферических выступов.

Обнаружено, что коэффициент гидравлического сопротивления ξ существенно зависит от относительной высоты выступов d/D . С ростом высоты выступов, с уменьшением d/D , гидравлическое сопротивление труб и каналов со сферическими выступами возрастает пропорционально $(d/D)^{-8}$.

Установлено, что с ростом частоты расположения выступов по линии накатки, с уменьшением относительного шага s/D , увеличивается коэффициент гидросопротивления в рассматриваемом диапазоне s/D . При дальнейшем обобщении принята зависимость $\xi \sim (s/D)^{-1,3}$.

Влияние относительного продольного шага выступов t/D на коэффициент гидросопротивления ξ не существенно. В тоже время гидравлическое сопротивление ξ зависит от плотности расположения выступов как $\xi \sim f^{-2,5}$. Следует отметить, что параметр f частично учитывает особенности формы выступа и радиус сопряжения выступа r и основной поверхности.

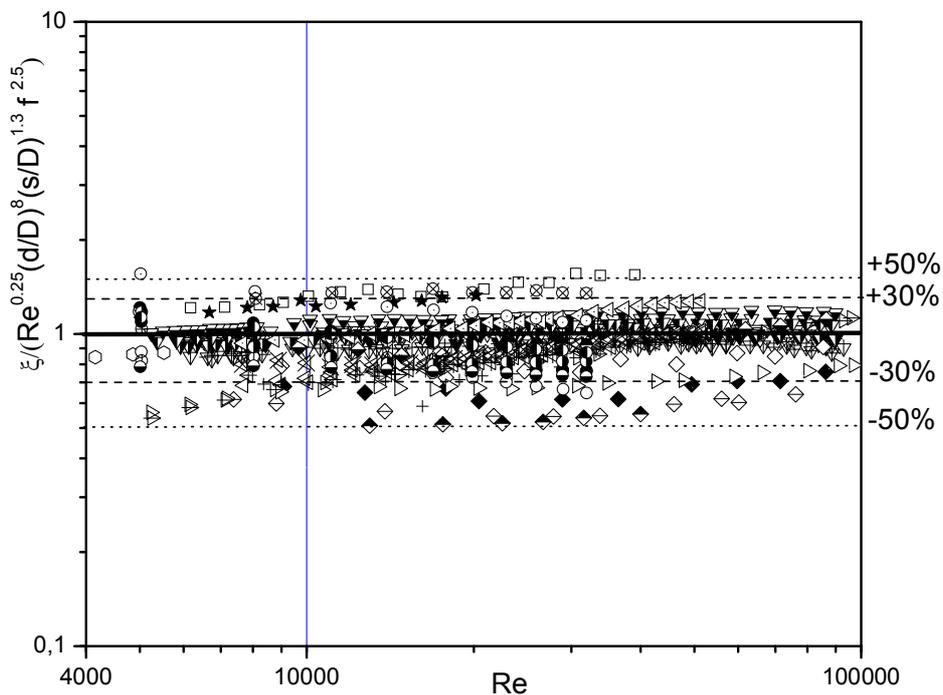


Рис. 6. Результаты обобщения экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению труб и плоских каналов с двухсторонним расположением выступов при турбулентном режиме течения (табл. 1)

Представленные экспериментальные данные [1,11,13-15,18,20,21] для турбулентного режима течения теплоносителей в диапазонах чисел $Re=5 \cdot 10^3 \dots 10^5$ и $Pr=0,7 \dots 92$, относительных безразмерных параметров сферических выступов $d/D=0,6 \dots 0,98$, $t/D=0,276 \dots 1,558$, $s/D=0,155 \dots 1,682$; $f=1,001 \dots 2,26$ описываются единой универсальной зависимостью (рис.6):

$$\xi = 1 / [Re^{0,25} (d/D)^8 (s/D)^{1,3} f^{2,5}]. \quad (1)$$

Зависимость (1) описывает экспериментальные данные (около 1900 точек) с максимальным отклонением $\pm 50\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Уменьшение доверительной вероятности до 0,85 позволяет описать уже экспериментальные данные с отклонением $\pm 30\%$. Заметные отклонения экспериментальных точек по гидравлическому сопротивлению можно отнести к различиям в профилях выступов и формах каналов, первоначальной различной точности экспериментального определения коэффициентов гидросопротивления в [1,11,13-15,17,18,20,21].

Теплоотдача каналов со сферическими выступами

Исследования коэффициентов теплоотдачи труб и плоских каналов с двухсторонним расположением сферических выступов для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения (рис. 7) проведены в [1,11,13-15,20,21]. Ограниченность информации, в основном, взятой из [15,20], по теплоотдаче при ламинарном и переходном режимах течения не позволяет провести их обобщение. В связи с этим, совместный анализ и обобщение экспериментальных данных проведен только для турбулентного режима течения.

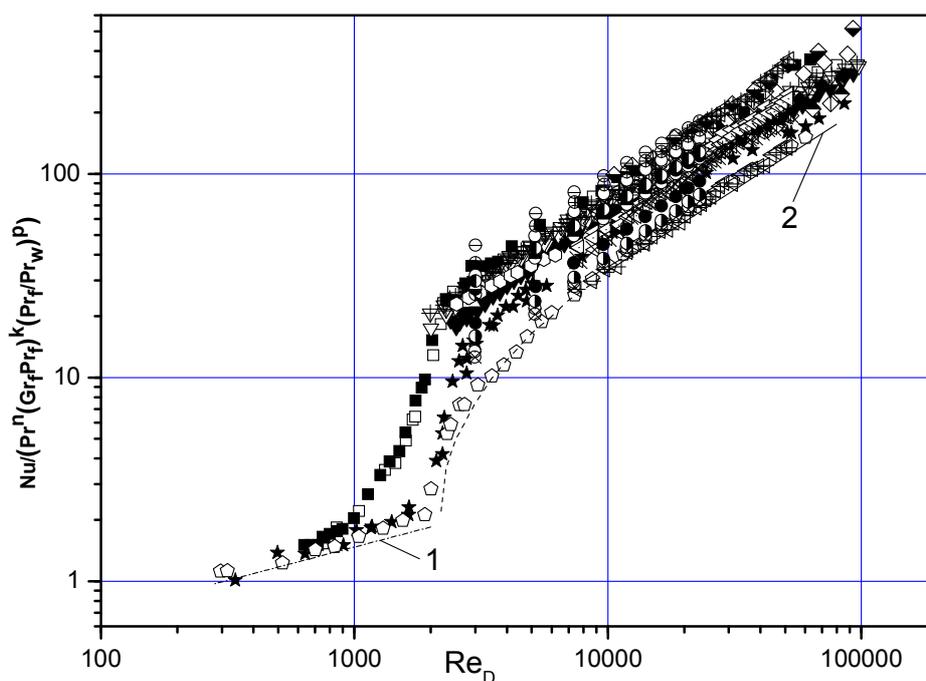


Рис. 7. Экспериментальные данные по средним коэффициентам теплоотдачи труб и плоских каналов с двухсторонним расположением выступов (табл. 1)

1 – расчет по $Nu=0,15Re^{0,33}Pr^{0,43}Gr^{0,1}(Pr/Pr_w)^{0,25}$, 2 – расчет по $Nu=0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}(Pr/Pr_w)^{0,25}$; $n=0,33$, $k=0,1$ для ламинарного течения, $n=0,43$, $k=0$ – для турбулентного режима, $p=0,25$

В ходе совместного анализа установлено, что коэффициент теплоотдачи в диапазоне чисел $Re=5 \cdot 10^3 \dots 10^5$ пропорционален Re в степени $n=0,78 \dots 0,853$,

причем не отмечено влияния n от геометрических и режимных параметров. При дальнейшем обобщении использована зависимость $Nu \sim Re^{0,8}$, характерная для турбулентного течения в гладких трубах. Влияние физических свойств и неизотермичности пристенного слоя на теплоотдачу выражено через классические зависимости для турбулентного режима $Nu \sim Pr^{0,43} (Pr/Pr_w)^{0,25}$.

Обнаружено, что коэффициент теплоотдачи существенно зависит от относительной высоты выступов d/D . С ростом высоты выступов, уменьшением относительного диаметра d/D , теплоотдача каналов со сферическими выступами возрастает пропорционально $Nu \sim (d/D)^{-0,8}$.

С ростом частоты расположения выступов по линии накатки (спирали), уменьшением относительного шага s/D , увеличивается коэффициент теплоотдачи. При обобщении принята зависимость $Nu \sim (s/D)^{-0,2}$. Установлено влияние на теплоотдачу относительного продольного шага выступов (t/D) в виде $Nu \sim (t/D)^{-0,2}$. Установлено также влияние на теплоотдачу параметра в виде $Nu \sim f^2$.

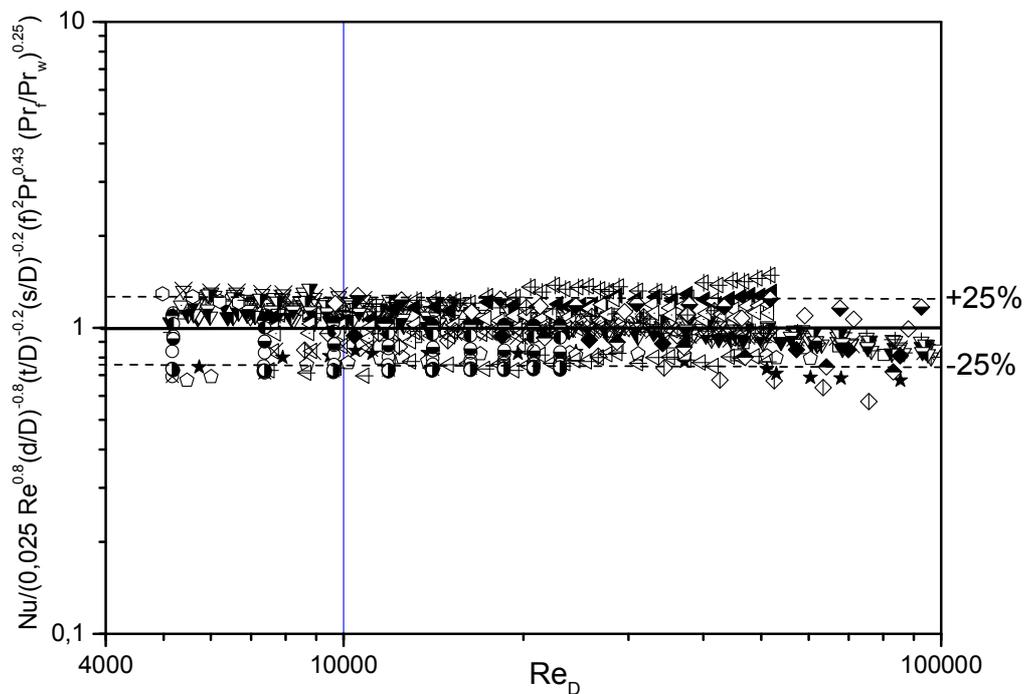


Рис. 8. Результаты обобщения экспериментальных данных по средним коэффициентам теплоотдачи в трубах и плоских каналах с двухсторонним расположением выступов при турбулентном режиме течения (табл. 1)

Представленные экспериментальные данные [1,11,13-15,17,18,20,21] при турбулентном режиме течения теплоносителей в диапазоне чисел $Re=5 \cdot 10^3 \dots 10^5$ и $Pr=0,7 \dots 92$, относительных геометрических параметров сферических выступов $d/D=0,6 \dots 0,98$, $t/D=0,276 \dots 1,558$, $s/D=0,155 \dots 1,682$; $f=1,001 \dots 2,26$ описываются единой универсальной зависимостью (рис. 8):

$$Nu=0,025Re^{0,8}(d/D)^{-0,8}(s/D)^{-0,2}(t/D)^{-0,2}f^2Pr^{0,43}(Pr/Pr_w)^{0,25}. \quad (2)$$

Зависимость (2) описывает экспериментальные данные (около 1000 точек) с максимальным отклонением $\pm 25\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Выявленное влияние большего количества геометрических параметров позволило обобщить экспериментальные данные с меньшими максимальными отклонениями.

Теплообменные аппараты

На основе полученных в работе данных по гидравлическому сопротивлению и теплоотдаче в трубах с системами сферических выступов разработана методика инженерных расчетов интенсифицированных кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, на которые приходится 80-90% всего мирового рынка теплообменного оборудования и которые сегодня используются с интенсификаторами теплообмена [22].

В работе [24] представлены результаты исследования теплогидравлических характеристик теплообменных аппаратов с различными типами интенсификаторов (рис.9), в том числе систем сферических выступов внутри труб.

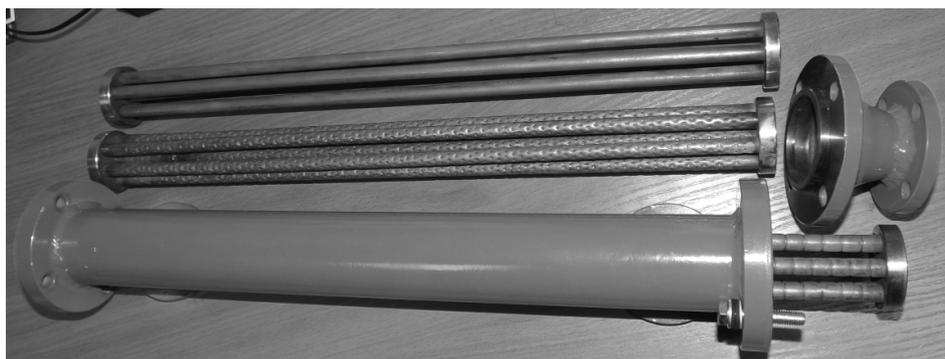


Рис.9. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат с различными типами интенсифицированных пучков труб, в том числе с системами сферических выступов

Исследования проведены при течении в трубах воздуха, воды, масла, что обеспечивало проведение экспериментов при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. Установлено, что использование интенсификаторов значительно повышают тепловую мощность (до 1,3-2,1 раз в зависимости от режима течения) и тепловую эффективность теплообменника во всем диапазоне режимных параметров.

Заключение

1. Описаны и экспериментально обоснованы механизмы интенсификации теплоотдачи в каналах со сферическими выступами за счет периодического

разрушения пограничного слоя и развития пульсаций в пристенном слое потока теплоносителя за счет генерации продольных вихревых структур и нестабильных отрывных зон за выступами.

2. Проведен анализ научной литературы по исследованию гидросопротивления и теплоотдачи в трубах и каналах при использовании в качестве интенсификаторов теплоотдачи систем сферических выступов. Выявлен уровень интенсификации теплоотдачи при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения. Установлено изменение коэффициентов гидравлического сопротивления труб и каналов со сферическими выемками. Показано, что имеются работы, в которых имеет место нарушение аналогии Рейнольдса в пользу теплоотдачи.

3. Выявлено и описано влияние основных геометрических и режимных параметров на гидравлическое сопротивление и теплоотдачу труб и каналов со сферическими выступами в области турбулентного режима течения ($Re=5 \cdot 10^3 \dots 10^5$) различных теплоносителей ($Pr=0,7 \dots 92$). Получены обобщающие зависимости для расчета гидросопротивления и теплоотдачи в виде уравнений (1) и (2) в диапазоне $d/D=0,6 \dots 0,98$, $t/D=0,276 \dots 1,558$, $s/D=0,155 \dots 1,682$; $f=1,001 \dots 2,26$.

Работа выполнена по Договору № 14.Z50.31.0003, заключенного в рамках реализации Постановления Правительства РФ №220 от 9 апреля 2010 года по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации (ведущий ученый С.А.Исаев), грантам РФФИ №14-08-00049 и 14-08-31305 мол а.

Поступила 12.11.2014г.

Литература

1. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Сер. Интенсификация теплообмена, под общ. ред. Ю.Ф.Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
2. Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2005. № 1. С. 75-91.
3. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2002. № 3. С. 102-110.
4. Попов И.А., Щелчков А.В., Рыжков Д.В., Ульянова Р.А. Вихреобразование в отрывных потоках на поверхностях с углублениями различной формы // Труды Академэнерго. 2010. № 3. С. 7-14.
5. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Сер.

- Интенсификация теплообмена, под общ. ред. Ю.Ф.Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
6. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиаев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена - современное состояние проблемы (обзор) // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3-11.
 7. Bergles A.E., Blumenkrantz A.R., Taborek J. Performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces. Heat Transfer. Vol. 2. 1974. Pp.239-243.
 8. Hwang S.D., Cho H.H. Heat transfer enhancement of internal passage using dimple/protrusion. Paper THE-24 in 13th International heat transfer conference. 2006. Sydney, Australia. 8 p.
 9. Alshroof O., Doig G, Barber T.J., Neely A.J., Timchenko V. The use of thermochromic liquid crystals to investigate heat transfer enhancement in a channel with a protrusion. 17th Australian Fluid mechanics conference. Auckland, New Zealand, 5-9 December 2010. 6p.
 10. Федоров И.Г., Шукин В.К., Мухачев Г.А., Идиатуллин Н.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление каналов со сферическими выштамповками // Известия ВУЗов: Авиационная техника, № 4, 1961. С. 120-127.
 11. Patent USA 4690211. Heat transfer tube for single phase flow. Date of Patent - Sep.1, 1987. 21 p.
 12. Rabas T.J., Webb R.L., Thors P., Kim N.K. Influence of roughness shape and spacing on the performance of three-dimensional helically dimpled tubes // Journal Enhanced Heat Transfer, №1, 1993. Pp.53-64.
 13. Olsson C.O., Sunden B. Heat transfer and pressure drop characteristics of 10 radiator tubes // International Journal Heat Mass Transfer, №15, vol.39, 1996, pp.3211-3220.
 14. Vicente P.G., Garcia A., Viedma A. Heat transfer and pressure drop for low Reynolds turbulent flow in helically dimpled tubes// International Journal Heat and Mass Transfer, vol.45, 2002, pp.543-553.
 15. Vicente P.G., Garcia A., Viedma A. Experimental study of mixed convection and pressure drop in helically dimpled tubes for laminar and transition flow // International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.45, 2002, pp.5091-5105.
 16. Миронов О.Н. Теплообмен и трение в канале квадратного сечения с одной оребренной полукруглыми выступами стенкой // Минский международный форум ММФ-92. Т.1. Ч.1. Минск: ИТМО им.А.В.Лькова. 1992. С.146–148.
 17. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. – М.: Атомиздат, 1978, 296 с.
 18. Муныбин К.Л. Эффективность интенсификации теплообмена углублениями и выступами сферической формы // Теплофизика и аэромеханика, 2003, т.10, №2, с.235–247
 19. Готовский М.А., Беленький М.Я., Фокин Б.С. Теплоотдача и сопротивление при течении в круглой трубе с интенсификацией регулярной системой сферических выемок и сферических выступов // Труды ЦКТИ. Вып.293. СПб, 2004. С.36-48.
 20. Попов И.А., Щелчков А.В., Яркаев М.З. Теплогидравлические характеристики дискретно-шероховатых труб на переходных режимах

- течения // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2013. № 1. С.61-65.
21. Chen J., Müller-Steinhagen H., Duffy G.G. Heat transfer enhancement in dimpled tubes. *Applied Thermal Engineering*, vol.21, 2001, pp.535-547.
 22. П'инков А.В., П'инкова В.Г., Шчукин А.В. Heat Transfer on Hemispherical Protrusions at Their Different Arrangement Density on the Channel Wall. *Russian Aeronautics*, 2011, Vol. 54, No. 2, pp. 179-184.
 23. Легкий В.М., Бабенко Ю.А., Дикий В.А. Исследование теплообмена и аэродинамического сопротивления пластинчатых теплообменных поверхностей с турбулизаторами в виде полусферических выступов // *Изв. вузов: Энергетика*. 1977, №12. с.81-89.
 24. Попов И.А., Щелчков А.В., Яркаев М.З., Аль-Джанаби А.Х.А., Скрыпник А.Н. Теплообменные аппараты с интенсификацией теплоотдачи // *Энергетика Татарстана*. 2014. № 1. С.10-16.

A.V. Shchelchkov, I.A. Popov, M.Z. Yarkaev, D.V. Ryzhkov

THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF CHANNELS WITH SPHERICAL PROTRUSIONS // *Transactions of Academenergo*. -2015. -N 1. – P.P. 7-24.

e-mail: lexa_kzn@mail.ru, popov-igor-alex@yandex.ru, marsel3000@yandex.ru, dv-r@ya.ru

Kazan National Research Technical University by A.N.Tupolev - KAI

Key words: enhancement, heat transfer, flow resistance, spherical protrusions.

Abstract

In this work is presented an analytical review of experimental studies of hydraulic resistance and heat transfer in channels with intensifiers in the form of systems of spherical protrusions in a wide range of operating and design parameters. A common approach to the generalization of the experimental data of various authors is elaborated taking into account differences in the geometry of the heat transfer surfaces. Cross functional generalized characteristics for coefficients of hydraulic resistance and heat transfer in channels with spherical protrusions are obtained.