

*А.И. Леонтьев¹, Ю.Ф. Гортышов², В.В. Олимпиев³,
Е.В. Дилевская¹, И.А. Попов², С.И. Каськов¹, А.В. Щелчков²*

Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, Россия (1)

Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева, Россия (2)

Казанский государственный энергетический университет, Россия (3)

РАЗРАБОТКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ ПРОТОТИПОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ТЕПЛООБМЕНА

АННОТАЦИЯ

В работе изложены результаты исследования интенсификации теплоотдачи с помощью сферических выемок и выступов и оценки теплогидравлической эффективности каналов со сферическими поверхностными интенсификаторами. Показаны перспективы создания теплообменных аппаратов с исследованными интенсификаторами теплообмена.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из самых дорогих энергетических ресурсов является тепловая энергия. Ее высокая стоимость вызвана как проблемами ее производства (низкие КПД теплогенерирующих установок, рост цен на топливо, значительные издержки при производстве), так и проблемами ее эффективной передачи и использования. Тепловая энергия от момента производства до пользователя несколько раз проходит преобразование в различных теплообменных аппаратах (ТА) и теплообменных элементах, коэффициенты тепловой эффективности которых часто не превышают 40-70%.

В энергетике и промышленности России в основном продолжают использоваться кожухотрубные ТА. При этом данные ТА - гладкотрубные, имеющие значительные габариты, высокую степень загрязняемости и малый срок службы трубного пучка. Кроме того, возрастающая мощность различного энергетического оборудования вызывает значительные термические и динамические нагрузки.

Проблемы снижения массогабаритных характеристик теплообменного оборудования и увеличения теплогидравлической эффективности могут успешно решаться при помощи использования в теплообменных аппаратах интенсификаторов теплоотдачи (ИТО). Наибольший интерес представляют интенсификаторы теплообмена, которые позволяют значительно увеличить теплосъем при умеренном или сопоставимом росте гидравлического сопротивления. К таким интенсификаторам относятся поверхностные интенсификаторы теплоотдачи. Они составляют значительный класс, и к ним относят спиральные и поперечные проволочные вставки и накатки различной конфигурации, микроребра, сферические, цилиндрические, конусообразные и иные выступы и выемки, шевронные штампованные поверхности и т.д. Основная отличительная особен-

ность данного вида интенсификаторов - воздействие на пограничный слой, вносящий наибольшее термическое сопротивление в теплоотдачу, и его разрушение с последующей турбулизацией потока в пристенном слое. Воздействие только на пристенный слой не вызывает существенного роста гидросопротивления. Увеличение теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования при течении жидких и газообразных теплоносителей составляет до 2.5 раз при сопоставимом росте гидросопротивления. Отличительной особенностью поверхностных интенсификаторов является также то, что за счет повышенной турбулентности и вихреобразования в пристенной зоне уменьшается загрязнение поверхности. Этот факт увеличивает привлекательность данного вида интенсификаторов.

2. ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ

В работах [1,2] приведены результаты сравнительной оценки эффективности промышленно перспективных ИТО. Для оценки эффективности каналов с интенсификаторами использовалась относительная форма универсального критерия М.В.Кирпичева $\bar{E}' = E'/E'_{2л}$, где $E' = Q/N\Delta t$; $E'_{2л}$ - энергетические коэффициенты интенсифицированного и обычного гладкостенного каналов; Q , N - теплосъем и мощность прокачивания теплоносителя в канале; Δt - температурный напор поток-стенка. Канал с интенсификаторами, обладающий наилучшим (из ряда вариантов) теплогидродинамическим качеством $\bar{E}' = \max$, и интенсификаторы, обеспечившие это качество, являются наиболее эффективными (оптимальными). Сравнение наилучших вариантов для различных типов интенсификаторов легко и наглядно реализуется с помощью графиков.

Проведенный сравнительный анализ показал, что одними из перспективных интенсификаторов теплоотдачи являются системы сферических выемок, нанесенные механическим способом (штамповка, фрезеровка) на теплообменную поверхность, и позволил сформулировать научно-технические рекомендации и определить оптимальные параметры интенсификаторов в виде сферических выемок (СВ).

Прогноз, сделанный в [3], относительно перспектив применения СВ для интенсификации теплоотдачи ламинарных потоков подтвердился в ходе экспериментальных исследований. СВ обеспечили в диапазоне $Re = 1000 - 2000$ опережающий рост интенсивности теплоотдачи (достигающий $Nu/Nu_{zl} \leq 3$) по сравнению с увеличением сопротивления (которое составило $\xi/\xi_{zl} \leq 1,8$). Соответственно достигнута повышенная эффективность канала с выемками $\bar{E} \approx 1,7$ относительно гладкой трубы. Следовательно, сферические выемки вполне рационально использовать для интенсификации ламинарной теплоотдачи, выигрыш от уменьшения массы, габаритов и стоимости теплообменников очевиден. Оптимальные поперечные размеры выемок составляют $h_l/d_l = 0,21$ (h_l - глубина выемок, d_l - диаметр СВ) и равны наименьшему значению этого размера в области исследованных величин h_l/d_l . Оптимальные относительные размеры выемки к высоте канала $h_l/H_k = 0,3$. В исследованном диапазоне величин h_l/H_k значение $h_l/H_k = 0,3$ примерно совпадает со средней величиной исследованного интервала данного параметра. Можно предполагать, что в рассматриваемых результатах анализа эффективности выемок проявляется следующая логика теплогидравлических процессов. Теплоотдача каналов с выемками значительно повышается в случае стесненных каналов, сопротивление канала почти не зависит от размера d_l/H_k [3,4], поэтому наиболее выгодным оказался минимальный (из исследованных) размер канала $d_l/H_k = 0,71$. При этом выемка, углубленная в стенку канала, может быть достаточно глубокой: $h_l/H_k = 0,3$ для достижения повышенных значений Nu/Nu_{zl} .

Для турбулентного режима течения в нестесненных каналах лишь в очень узком интервале чисел Re качество мелких СВ оказывается выше, чем у других интенсификаторов, и в особенности у поперечных выступов. Мелкие СВ характеризуются примерно одинаковым увеличением теплоотдачи и сопротивления канала: $Nu/Nu_{zl} \approx \xi/\xi_{zl}$.

Очевидно, что глубокие СВ позволяют получить в канале несколько более высокий уровень теплоотдачи, чем мелкие СВ, однако сопротивление каналов с глубокими СВ велико, поэтому эффективность глубоких СВ ниже, чем у мелких СВ. Крупные СВ заметно больше наращивают сопротивление канала по сравнению с теплоотдачей.

Рекомендуемые в работах [1,2,4] оптимальные для интенсификации ламинарной и турбулентной теплоотдачи размеры выемок: для целесообразной интенсификации необходимо использовать относительно мелкие выемки.

Высокая эффективность СВ вызвала необходимость проведения новых опытных исследований эффективности сферических выемок и выступов в широком интервале чисел $Re = 4000 - 30000$ и размеров таких интенсификаторов. В настоящее время экспериментальные зависимости для гидродинамики и теплоотдачи в каналах с СВ (КСВ) получены

для турбулентного режима. Необходимо выделить расчетные и экспериментальные работы Леонтьева А.И., Кикнадзе Г.И., Рабиновича М.И., Терехова В.И., Беленького М.Я., Кесарева В.С., Козлова А.П., Щукина А.В., Исаева С.А., Снидекера, Дональдсона, Лиграни Ф., Халатова А.А., Гортышова Ю.Ф. и др.

В работе [5] представлена картина обтекания поверхностей с СВ для широкого диапазона чисел Рейнольдса, выявлены границы режимов течения, исследованы гидросопротивление и теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения. Результаты исследования интенсивности теплоотдачи в КСВ приведены на рис.1.

В литературе имеются данные по влиянию толщины пограничного слоя набегающего потока [6], внешней турбулентности [7], степени скругления кромок СВ [6,8], степени стесненности КСВ [5,6].

При выполнении пластин или труб с СВ методом штамповки на обратной стороне возникают сферические выступы (СВП). На рис.2 показаны полученные авторами результаты по интенсивности теплоотдачи в каналах с СВП.

Накопленный опыт позволяет рассчитывать и проектировать теплообменные аппараты с оптимальными конфигурациями и размерами интенсификаторов в виде СВ для различных режимных параметров. В связи с вышесказанным целью работы было исследование возможности создания высокоэффективного теплообменного аппарата с поверхностной интенсификацией теплообмена в виде системы СВ.

Таблица 1. Характеристики КСВ

$h_l, \text{ м}$	$d_l, \text{ м}$	$H_k, \text{ м}$	h_l/d_l	H_k/d_l	h_l/H_k	№ обозначения
0.00071	0.00514	0.012	0.138	2.334	0.059	1
0.0015	0.00714	0.012	0.210	1.681	0.125	3
0.003	0.00916	0.012	0.327	1.310	0.25	6
0.005	0.01	0.012	0.5	1.2	0.417	7
0.00071	0.00514	0.010	0.138	1.945	0.071	2
0.0015	0.00714	0.010	0.210	1.400	0.15	5
0.003	0.00916	0.010	0.327	1.092	0.3	9
0.005	0.01	0.010	0.5	1	0.5	10
0.00071	0.00514	0.008	0.138	1.556	0.089	4
0.0015	0.00714	0.008	0.210	1.120	0.187	8
0.003	0.00916	0.008	0.327	0.873	0.375	12
0.005	0.01	0.008	0.5	0.8	0.625	13
0.00071	0.00514	0.005	0.138	0.972	0.142	11
0.0015	0.00714	0.005	0.210	0.7	0.3	14
0.003	0.00916	0.005	0.327	0.546	0.6	15
0.005	0.01	0.005	0.5	0.5	1	16
0.00071	0.00514	0.002	0.138	0.389	0.355	17
0.0015	0.00714	0.002	0.210	0.280	0.75	18
0.003	0.00916	0.002	0.327	0.218	1.5	19
0.005	0.01	0.002	0.5	0.2	2,5	20

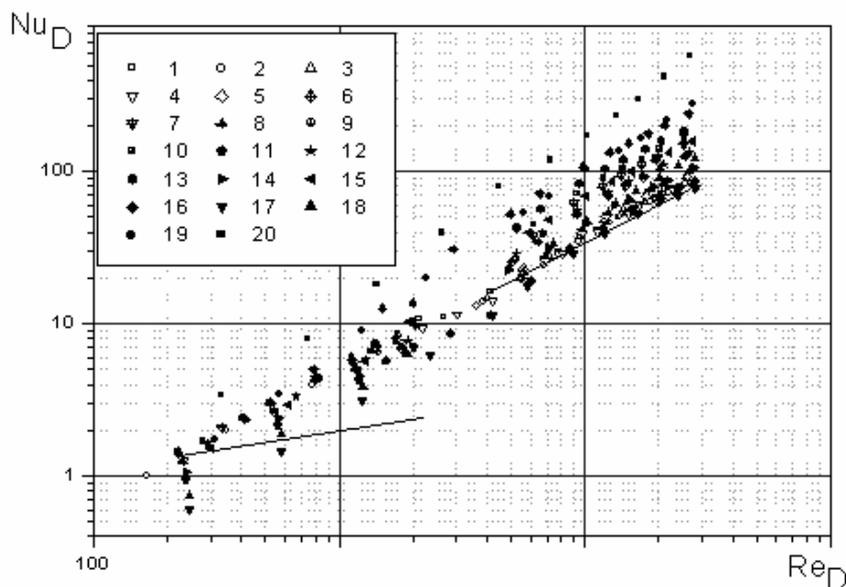


Рис. 1. Теплоотдача в каналах с СВ. Линии – расчет для ГК, точки – эксперимент для КСВ. Обозначения см. табл. 1

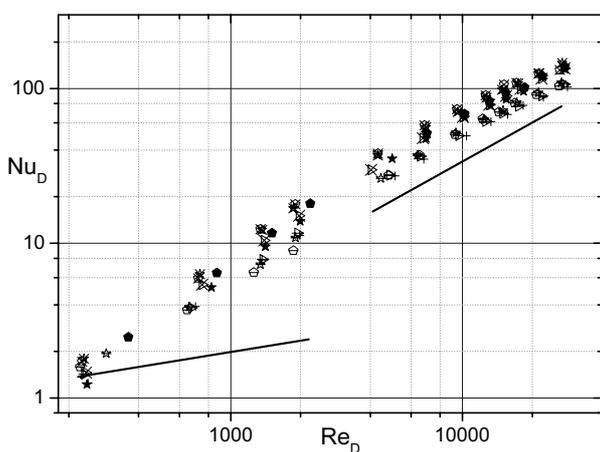


Рис. 2. Теплоотдача в каналах с СВП: линии - расчет для гладкого канала, точки - эксперименты для интенсифицированного канала, обозначения см. табл. 2

Таблица 2. Относительные геометрические параметры каналов и выступов, условные обозначения

$h_{сф}, м$	$d_{сф}, м$	$H_{к}, м$	$h_{сф}/d_{сф}$	$h_{сф}/H_{к}$	Обозн.
0,0015	0,00714	0,012	0,210084	0,125	⬠
0,003	0,00916	0,012	0,327511	0,25	⊗
0,005	0,01	0,012	0,5	0,416667	⬢
0,0015	0,00714	0,010	0,210084	0,15	☆
0,003	0,00916	0,010	0,327511	0,3	⊗
0,005	0,01	0,010	0,5	0,5	★
0,0015	0,00714	0,008	0,210084	0,1875	▷
0,003	0,00916	0,008	0,327511	0,375	⊗
0,0015	0,00714	0,005	0,210084	0,3	+

3. СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА С ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ В ВИДЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для проверки полученных данных по интенсификации теплоотдачи с помощью СВ и СВП и оценки возможности создания высокоэффективных теплообменных аппаратов был спроектирован и создан прототип ТА с данными интенсификаторами. Фотографии ТА представлены на рис.3. При создании ТА было изготовлено 12 пластин из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм с рельефом в виде СВ/СВП с глубиной/высотой $h = 0,3 d_{ш}$. Пластины крепились друг к другу сторонами с СВП на некотором расстоянии через проставки и перегородки с помощью сварки. Наличие перегородок в таком канале с СВП создало сложное течение теплоносителя и увеличило длину пути теплоносителя, его скорость (рис.3). В канале для другого теплоносителя оставались только СВ. За счет того, что все основные теплообменные элементы крепятся на крышке, в одном корпусе за счет смены крышек с различными теплообменными элементами возможно производить сравнительные испытания. Так была создана и гладкостенная теплообменная матрица.

В снятом состоянии крышка с теплообменной матрицей составляет самостоятельный теплообменный элемент, который может использоваться, например, при реализации свободноконвективных течений в каналах и емкостях.

Прототип ТА создан для сравнительных испытаний на различных теплоносителях. При создании ТА заложена его малая тепловая эффективность для более четкой фиксации преимуществ интенсификации. Результаты расчета ТА показали, что при использовании пары теплоносителей газ-газ эффективность гладкостенного ТА в рассматриваемом

интервале режимных параметров должна составлять 20-25%, а в интенсифицированном ТА – 30-50%, для ТА жидкость-жидкость – 30-40% и 65-70% соответственно. В расчетах показано, что даже на данной неоптимизированной конструкции возможно получение тепловой эффективности до 92%.

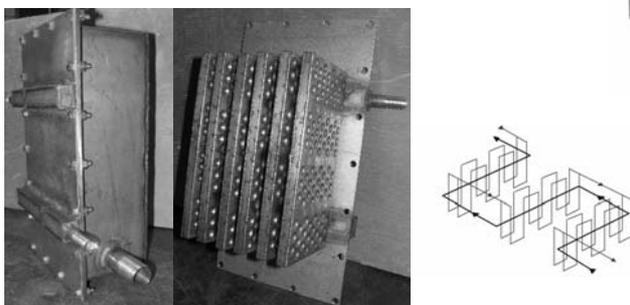


Рис. 3. Прототип ТА с СВ, крышка ТА с теплообменной матрицей, схема течения теплоносителей

Для подтверждения полученных данных по повышению эффективности ТА необходимо проведение испытаний. Первые тестовые опыты на интенсифицированном ТА показали возможность достижения тепловой эффективности интенсифицированного ТА до 70-90% на паре теплоносителей газ-газ.

Оптимизация конструкции прототипа теплообменного аппарата – задача для дальнейших исследований на основе полученных на данном прототипе опытных данных по теплогидравлическим характеристикам.

Представленный прототип ТА представляет интерес как подогреватель воды горячего водоснабжения, водоподогреватель сетевой воды, котел-утилизатор теплоты уходящих дымовых газов, промышленный подогреватель рабочих газообразных и жидких теплоносителей, особенно загрязненных, элемент-подогреватель в гальванических ваннах и прочих технологических сосудах.

Необходимо отметить, что до настоящего времени СВ использовались лишь в традиционных трубчатых теплообменниках. Однако глубокое исследование поверхностных интенсификаторов в виде систем СВ позволяют создать новый класс теплообменных элементов и ТА (рис.4).

Универсальность теплообменных элементов на основе штампованных поверхностей позволяет создавать на их базе целый спектр теплообменных аппаратов - теплообменник с разборным кожухом и сварной теплообменной матрицей, сварные и паяные ламельные теплообменники свободных сборок в сильнозагрязненных потоках, гибридные теплообменники.

Среди фирм-производителей подобных теплообменных элементов и аппаратов необходимо выделить фирмы ViEX (Канада), Tranter (США), Alfa Laval (Швеция), Mueller (США), Vuko (Германия), Hisaka (Япония), Superplate (Нидерланды) и др. К сожалению, среди фирм-производителей нет российских, хотя использование СВ предложено и исследовано в основном российскими учеными.



Рис. 4. Теплообменные элементы и ТА с СВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения работ по исследованию течения и теплоотдачи в КСВ и созданию теплообменных аппаратов с поверхностными интенсификаторами теплообмена в виде СВ и СВП получены следующие основные результаты:

- показана энергетическая эффективность использования СВ и СВП в турбулентной и ламинарной областях течения. На основе сравнительного анализа получены параметры течения и интенсификаторов, при которых достигается наибольший теплогидравлический эффект;
- проведена систематизация накопленных сведений по течению и теплоотдаче в КСВ при вынужденной конвекции; разработаны основы режимной карты течения в каналах с СВ;
- показано, что теплообменники с штампованно-сварными теплообменными элементами со сферическими интенсификаторами имеют ряд преимуществ перед другими теплообменниками и перспективны для широкого промышленного использования;
- разработан и создан прототип полуразборного теплообменного аппарата для проведения комплексных теплогидравлических испытаний на различных теплоносителях.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 04-02-08250 офи_а «Разработка фундаментальных основ создания прототипов энергоэффективных охладителей и теплообменников с вихревой интенсификацией теплообмена для электронных устройств и энергетических установок»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Известия РАН. Энергетика. 2002. №3.
2. Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия РАН. Энергетика. 2005. №1.
3. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В., Дилевская Е.В., Исачев С.А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками // Изв. РАН. Энергетика. 2002. №2. С.117–135.
4. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Байгалиев Б.Е. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. Казань: КГТУ им.А.Н.Туполева, 2004. 432 с.

5. **Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олишпиев В.В., Щелчков А.В.** Течение и теплоотдача в каналах со сферическими интенсификаторами при вынужденной конвекции газа // II Росс. конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Секция 1. Теплообмен и гидродинамика для поверхностей с луночным рельефом. Докл. №4. CD-ROV №0320500321. М., 2005. С. 21-22
6. **Гортышов Ю.Ф., Амирханов Р.Д., Попов И.А.** Гидродинамика и теплообмен в щелевидных каналах со сферическими интенсификаторами // Тр. второй Рос. нац. конф. по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 68-71.
7. **Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Жданов Р.Ф.** Воздействие внешней турбулентности на теплообмен в отрывном течении за обратным наклонным уступом // Тр. Второй Рос. нац. конф. по теплообмену. В 8-т. Т.6. Интенсификация теплообмена. М.: Изд-во МЭИ. 1998. С. 207-210.
8. **Терехов В.И., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М.** Поле давлений и сопротивление одиночной лунки с острыми и скругленными кромками // ЖПМТФ. 1993, №3. С. 40-50.