

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ САМООЧИСТКА ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ВЫЕМКАМИ

В.В. ТАКМОВЦЕВ, А.В. ИЛЬИНКОВ, А.В. ЩУКИН, И.Ш. ЗАРИПОВ

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ

Разработан и экспериментально обоснован способ непрерывной гидродинамической очистки пластинчатых теплообменников со сферическими выемками. Очистка проточной части теплообменника обеспечивается вдувом теплоносителя через каналы перепуска из зон повышенного давления в зоны пониженного давления смежных выемок.

Ключевые слова: *пластинчатый теплообменник, сферические выемки, гидродинамический способ очистки, вдув, канал перепуска, теплоотдача, коэффициент давления, экспериментальное исследование, визуализация, режим течения.*

Введение

Теплообменники различного типа находят широкое применение в теплоэнергетике, включая и теплообменники пластинчатого типа. В процессе эксплуатации на деталях проточной части таких теплообменников накапливаются различные отложения. Они способствуют увеличению гидродинамического сопротивления и уменьшению теплоотдачи. В результате значительно снижается КПД и увеличиваются энергозатраты. Так, наслоения толщиной 2–4 мм на внутренних поверхностях пластин снижают КПД теплообменника на 4–7% и повышают экономические затраты из-за включения в регламент технического обслуживания обязательных промывок теплообменника для его очистки. К тому же наличие накипи, образующейся на теплообменных поверхностях, ускоряет коррозионные процессы.

В настоящее время для очистки теплообменников от загрязнений и накипи используют различные способы: механический, химический и гидродинамический. Это наиболее распространенные способы очистки, однако, существуют еще электрогидроимпульсный и ультразвуковой методы, которые, ввиду высокой стоимости, применяются редко. В зависимости от того, насколько много загрязнений и какого они состава, а также какова конструкция теплообменника, состояние его теплообменных поверхностей, применяется один из трех основных способов очистки. Все перечисленные способы очистки при применении требуют либо полной остановки и разборки теплообменника, либо использования дорогого вспомогательного оборудования, например гидродинамической машины с давлением до 1500 бар, либо использования химических реагентов. В некоторых случаях применяется сочетание перечисленных операций.

Поэтому разработка простого и дешевого способа непрерывной очистки теплообменников является актуальной задачей.

Экспериментальная установка и объекты исследования

Известно, что использование сферических выемок (далее по тексту – выемки) позволяет повысить эффективность работы теплообменных аппаратов не только путем увеличения теплоотдачи теплообменных поверхностей пластин, но и за счет снижения интенсивности их загрязнения в результате турбулентности потока теплоносителя

[1, 2]. Появление турбулентности обусловлено действием вихревых структур, возникающих в выемках. Множество мелких частиц загрязнения попросту не остается на стенках оборудования, а смывается в процессе работы. Зато более крупные частицы накапливаются в донной части выемок и на исходно гладкой поверхности пластин между ними, образуя загрязнение и накипь на рабочих элементах в процессе длительной эксплуатации теплообменника.

Для изучения процесса образования загрязнения в выемках и влияния его на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление теплообменных поверхностей пластинчатых теплообменников в КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева на кафедре «Теплотехника и энергетическое машиностроение» была создана экспериментальная установка. Внешний вид и принципиальная схема этой установки показаны на рис. 1, а, б.

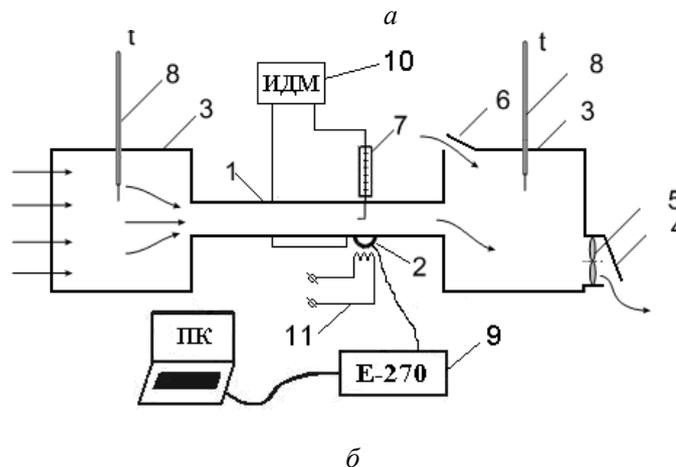


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – внешний вид; б – схема: 1 – рабочий участок; 2 – объект исследования; 3 – ресиверы; 4 – заслонка; 5 – воздуходувка; 6 – перепускное окно; 7 – приемник полного давления; 8 – термометр; 9 – система измерения температуры; 10 – измеритель давления; 11 – нагреватель

Экспериментальная установка представляла собой аэродинамическую трубу открытого типа. При анализе и обработке опытных данных в качестве критериев подобия использовались числа Нуссельта (критерий подобия для тепловых процессов) и Рейнольдса (характеризует режим течения). Таким образом, при выборе размера выемки и канала учитывалось подобие с теплообменным аппаратом.

Основным элементом установки являлся рабочий участок 1 (рис. 1, б) – прямолинейный канал с прямоугольным поперечным сечением 140 x 80 мм. Для уменьшения теплообмена с окружающей средой его стенки были выполнены из

© Проблемы энергетики. 2016. № 9-10

многослойной фанеры. В начале и конце рабочего участка *1* располагались входной и выходной ресиверы *3*, в каждом из которых устанавливался термометр *8*. К выходному ресиверу подсоединялась воздуходувка *5*, работающая на отсасывание. Изменяя число вентиляторов воздуходувки, положение перепускного окна *6* и заслонки *4*, можно было варьировать скорость потока в опытном участке *1* в диапазоне от 5 до 35 м/с.

На нижней стенке опытного участка *1* установлен объект исследования *2* – модель единичной сферической выемки. Расстояние от рабочего участка *1* до объекта исследования *2* равнялось десяти гидравлическим диаметрам канала, а от объекта исследования *2* до конца рабочего участка *1* – пяти гидравлическим диаметрам канала. Гидравлический диаметр прямоугольного канала рассчитывался по известной формуле: $D_r = 4S/P$, где *S* и *P* – площадь и периметр поперечного сечения канала.

На нижней стенке канала (рис. 1, б) вокруг объекта исследования *2* были расположены приемники статического давления. На верхней стенке канала над объектом исследования *2* было установлено координатное устройство с приемником полного давления *7*, имеющее возможность продольного и поперечного перемещения. Таким образом, имелась возможность измерять скорость потока в любой точке над выемкой.

Для установки в рабочий участок *1* объекта исследования *2* в нижней части канала предусмотрено отверстие, причем установка исследуемой выемки осуществлялась таким образом, чтобы ее верхняя грань была заподлицо с внутренней стенкой канала. Такой способ позволял устанавливать выемку практически без ограничения по высоте, а также подключать необходимое оборудование для измерения давления *10*, а в экспериментах по исследованию теплоотдачи – устанавливать подогрев выемки с помощью нагревателя *11* и проводить замер температуры на ее поверхности с помощью системы измерения *9*.

Для проведения экспериментов по гидродинамике была изготовлена модель выемки, показанная на рис. 2, а, б.

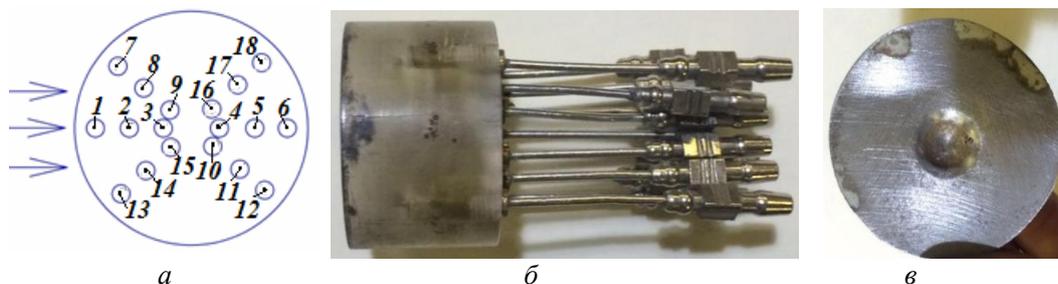


Рис. 2. Объекты исследования для гидродинамических испытаний: а – расположение приёмников давления на поверхности модели выемки; б – общий вид модели выемки с приёмниками давления; в – выемка с закругленными кромками, соответствующая используемым в реальных теплообменных аппаратах

Диаметр и глубина модели выемки составляли: $d = 50$ мм, $h = 25$ мм. Материал модели выемки – оргстекло. На поверхности модели выемки были просверлены 18 отверстий диаметром 0,4 мм – приемников статического давления, расположение которых показано на рис. 2, а. С помощью штуцеров и соединительных трубок давление от приемников передавалось к измерительным приборам.

Следует отметить, что в реальных теплообменных аппаратах выемки, используемые для интенсификации теплообмена, выполняются значительно меньшего размера: 5...10 мм. Кроме того, изготовить выемку с острыми кромками при

промышленном производстве затруднительно. Другими словами, при нанесении рельефа в виде сферических выемок на теплообменную поверхность промышленного теплообменника необходимо выполнить ряд конструктивных и технологических требований:

- диаметр выемок должен соответствовать диапазону 5 ...10 мм;
- необходимо обеспечить равенство радиуса скругления кромок на внешнем диаметре выемки и радиуса самой выемки;
- изготовление выемок должно осуществляться традиционным способом для массового производства, например штамповкой;
- обеспечение однородности материала выемок и теплообменных пластин.

С учетом этих условий, из листа стали 20 толщиной 1,5 мм была изготовлена выемка уменьшенного размера с закругленными кромками, показанная на рис. 2, в.

Размеры этой выемки составляли: $d = 4$ мм, $h = 4$ мм, $r = 4$ мм – радиус скругления кромок выемки. К двум точкам на выемке были припаяны штуцера для измерения статического давления. Выемка была отштампована на круглой пластинке, поэтому при проведении эксперимента имела возможность поворота ее вокруг своей оси для получения полного поля давления.

Для измерения теплоотдачи градиентным методом была изготовлена из легированной стали 12X18H10T модель выемки, изображенная на рис. 3, а, размеры которой аналогичны размерам модели выемки, представленной на рис. 2, а, б.

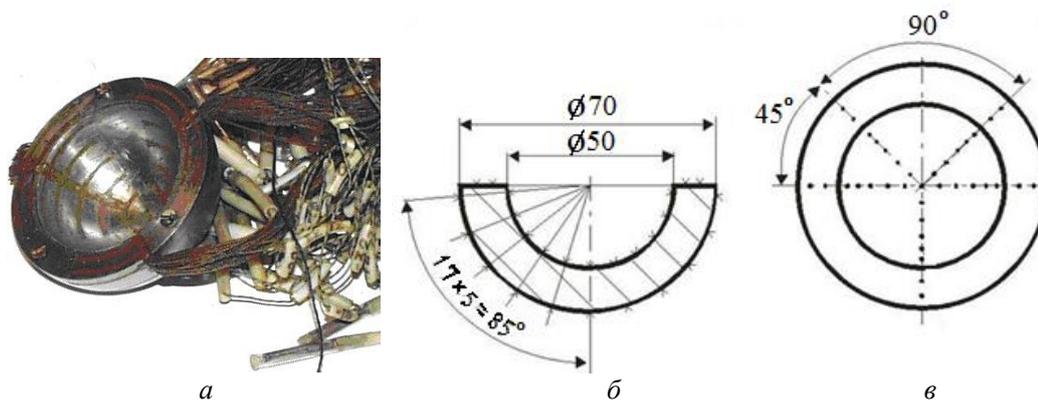


Рис. 3. Теплообменная модель выемки: а – общий вид модели выемки с заделанными термопарами; б – сечение модели выемки в меридиональной плоскости; в – вид сверху

Выбор материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda \approx 20$ Вт/(мК) предопределялся использованием градиентного метода измерения коэффициентов теплоотдачи. Согласно этому методу как наружная, так и внутренняя поверхности модели препарировались 62-мя хромель-алюмелевыми термопарами с разнесенным спаем. Диаметр проводов термопар составлял 0,2 мм. От места замера температур провода отводились по меридионально расположенным канавкам на торцевые поверхности модели выемки, а затем собирались в три жгута и выводились из экспериментального участка. После укладки термопроводов в канавки они заполнялись термоцементом, а затем все поверхности теплообменной модели выемки тщательно зачищались. Схема размещения термопар на поверхности теплообменной модели выемки показана на рис. 3, б, в.

В процессе проведения экспериментов замерялись: атмосферное давление, температура торможения во входном и выходном ресиверах, статическое и полное

давления в канале, расход отбора воздуха, а также поля давлений и температур на поверхности объекта исследования.

Для замера атмосферного давления использовался чашечный ртутный барометр с точностью ± 100 Па. Температура воздуха во входном и выходном ресиверах измерялась ртутными термометрами с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$. Замер статического давления осуществлялся с помощью четырех приемников, расположенных вокруг объекта исследования и измерителя давления ПРОМА ИДМ-0,6 ДД, имеющего класс точности 1,0. Полное давление измерялось трубкой полного напора с насадком и измерителем давления ПРОМА ИДМ-0,6 ДД. Отличительной особенностью такой трубки является нечувствительность к углам скоса потока примерно до $\pm 15^{\circ}$. Перемещение трубки полного напора производилось с помощью координатника с точностью отсчета до 0,1 мм. Температурное поле объекта исследования измерялось с помощью хромель-алюмелевых термопар. Термо-ЭДС измерялась модулем АЦП Е-270 класса точности 0,05.

Для проведения процесса визуализации из листа меди толщиной 0,5 мм была изготовлена выемка (см. рис. 4) тех же размеров, что и модель выемки из оргстекла.

Методика исследования и основные результаты

Экспериментальное исследование проводилось в четыре этапа.

Первый этап – визуализация процесса загрязнения выемки. Для этого применялась цифровая видеокамера, позволяющая выполнять покадровый просмотр с временной фиксацией. В качестве загрязнителя использовалась кварцевая пыль. Визуализация проводилась на режиме при $Re_d = 110000$; $W = 35$ м/с. Результаты визуализации показаны на рис. 4.

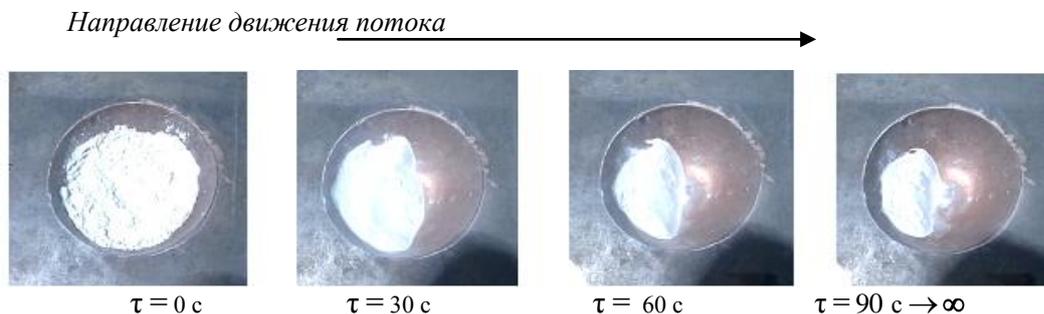


Рис. 4. Процесс самоочистки единичной сферической выемки

Анализ результатов визуализации показал следующее. В начальный момент времени ($\tau = 0$ с) выемка заполняется кварцевой пылью. Далее включается в работу воздуходувка, создающая поток воздуха, подаваемого в канал с единичной сферической выемкой. На протяжении $\tau = 90$ с выемка самоочищается от загрязнений под действием крупномасштабных самоорганизующихся вихревых структур, генерируемых в выемке основным потоком. При этом полного очищения выемки не происходит, поскольку загрязнение концентрируется в донной части выемки в виде пятна, размер которого практически не меняется при дальнейшем увеличении времени визуализации $\tau \rightarrow \infty$.

Было сделано предположение о том, что пятно загрязнения образуется в зоне пониженного давления на поверхности выемки.

Второй этап – измерение полей давления на поверхности модели выемки (см. рис. 2, а, б) с целью определения областей с максимальным перепадом давления. Для этого в рабочий участок монтировалась модель выемки с приемниками статического давления на поверхности. С помощью регулирующей заслонки в канале

устанавливалась требуемая скорость внешнего потока. Измерение скорости производилось трубкой Пито-Прандтля. При достижении установившегося режима выполнялось измерение полей давления на поверхности модели выемки. Расположение и нумерация приемников давления показано на рис. 2, а. Для получения большего количества измерительных точек выемку последовательно поворачивали на определенный угол.

Эксперименты, проведенные в диапазоне чисел Рейнольдса от 10^4 до $2 \cdot 10^4$, показали, что давление по поверхности выемки в процессе работы неравномерно. Выбор скоростного режима течения обусловлен соответствием рабочему процессу в пластинчатых теплообменниках. Число Рейнольдса определялось, как $Re = \frac{W_\infty \cdot d}{\nu}$, где W_∞ , ν – скорость и коэффициент кинематической вязкости основного потока, а d – диаметр выемки.

Результаты второго этапа экспериментального исследования показаны на рис. 5 в виде эпюры распределения коэффициента давления $C_p = \frac{2(P_i - P_\infty)}{\rho_\infty \cdot W_\infty^2}$ в плоскости меридионального сечения выемки, где P_i – статическое давление на стенках и в донной области выемки в точках замера; P_∞, ρ_∞ – статическое давление и плотность основного потока теплоносителя соответственно; x – продольная координата в плоскости меридионального сечения выемки. Выбор плоскости меридионального сечения выемки обусловлен наличием в нем максимального перепада давления между точками 2 и 6 замера статического давления на обтекаемой потоком поверхности выемки (см. рис. 2, а).

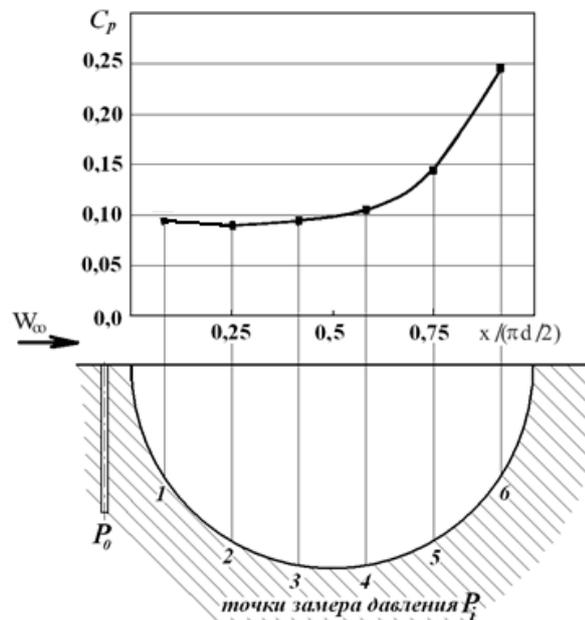


Рис. 5. Эпюра распределения коэффициента статического давления в меридиональной плоскости выемки

Было установлено, что зона повышенного давления находится в точке замера 6 на стенке выемки, примыкающей к ее выходной кромке, где $C_p = 0,25$. Соответственно,

зона пониженного давления ($C_p = 0,09$) находилась в точке замера 2 в донной части выемки со стороны стенки, примыкающей к входной кромке выемки. Отношение этих значений давлений составляет 2,78, что предопределяет существование перепада давлений между боковыми стенками и донной областью выемки.

Полученные нами данные, подтверждающие результаты исследований [3, 4], являются научным обоснованием для организации каналов перепуска между смежными выемками теплообменной поверхности, что позволит осуществить вдув рабочего тела из зон с большим давлением в зоны меньшего давления этих выемок.

В результате возникающего дополнительного струйного течения, обусловленного действием основного потока теплоносителя, будет происходить удаление загрязнений, концентрирующихся в донной области выемок.

Третий этап – измерение поля давлений на поверхности выемки уменьшенного диаметра с закругленными кромками (см. рис. 2, в). Порядок проведения эксперимента в основном такой же, как и на втором этапе. Поскольку уменьшенная выемка имела только два приемника давления, то более полноценное поле давлений было получено с помощью ее дискретного поворота.

Экспериментальные результаты, полученные на этом этапе исследования, подтвердили качественную картину течения, полученную на втором этапе, где был обнаружен максимальный перепад давления в меридиональной плоскости выемки по направлению течения основного потока.

Четвертый этап – проведение измерения теплоотдачи на поверхности выемки при отборе воздуха из выемки. Для этого в рабочий участок монтировалась теплообменная модель выемки (см. рис. 3, а). С помощью заслонки в канале устанавливалась требуемая скорость потока. Измерение скорости производилось трубкой Пито-Прандтля. С помощью вакуумного насоса из выемки осуществлялся отбор воздуха. Расход отбираемого воздуха измерялся ротаметром РМА 0,063 Г. При достижении установившегося режима производилось измерение температур на поверхности выемки. Далее переходили к следующему режиму по скорости основного потока и расходу отбираемого воздуха. Полученные значения изменения местной теплоотдачи в плоскости меридионального сечения показаны на рис. 6.

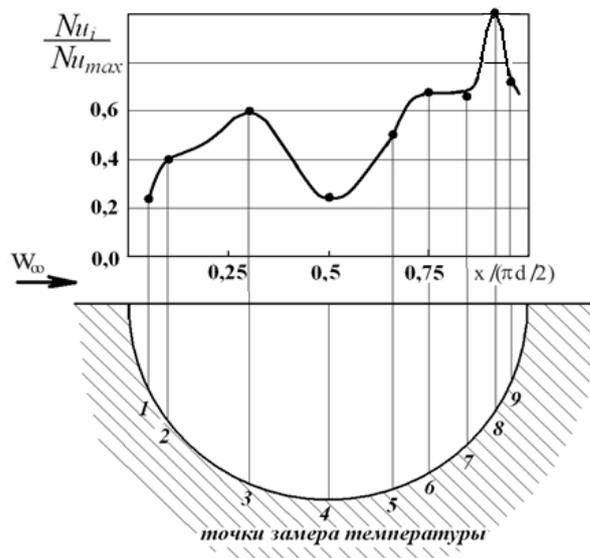


Рис. 6. Изменение теплоотдачи в плоскости меридионального сечения выемки:

— — без каналов перепуска; ● — с каналами перепуска

Анализировалось изменение местной теплоотдачи $\frac{Nu_i}{Nu_{max}}$ в плоскости меридионального сечения сферической выемки по ходу движения основного потока. Здесь $Nu_i = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ – число Нуссельта, определенное по температуре в точках замера, где: α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности среды; d – диаметр выемки. Кроме этого: Nu_{max} – число Нуссельта, определенное в точке на внутренней поверхности выемки, где была зафиксирована ее максимальная теплоотдача. Экспериментально установлено, что отбор воздуха с поверхности выемки из зоны повышенного давления с целью подачи его через канал перепуска в смежную выемку не приведет к заметному изменению теплогидравлических характеристик выемок.

По результатам экспериментального исследования авторами работы был предложен простой и дешевый способ непрерывной гидродинамической очистки разборных и неразборных пластинчатых теплообменников.

Суть способа заключается в следующем. Пластинчатый теплообменник, показанный на рис. 7, выполнен в виде секций, имеющих внутренние силовые связи.

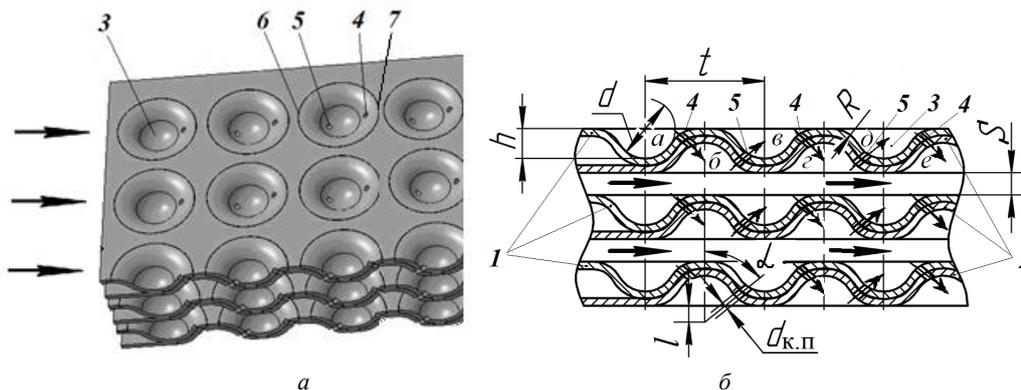


Рис. 7. Пластинчатый теплообменник с непрерывной гидродинамической очисткой: *а* – внутренние сечения теплообменника; *б* – сечение теплообменника в меридиональной плоскости

Каждая секция теплообменника состоит из двух соединенных между собой точечной сваркой верхней 1 и нижней 2 пластин. На рабочей поверхности каждой пластины во всех секциях выполнены сферические выемки 3, причем выемки верхней пластины 1 входят внутрь выемок нижней пластины 2, а сами выемки на всех пластинах имеют коридорное расположение.

На рис. 7 использованы также следующие обозначения: d , h , R , t – диаметр, глубина, радиус скругления кромок и шаг выемок, которые одинаковы для всех пластин; S – расстояние между секциями – постоянная величина; a , b , d – выемки в верхней пластине 1; b , z , e – выемки в нижней пластине 2, смежные с выемками в верхней пластине; 4 – канал перепуска входной в каждой выемке; 5 – канал перепуска выходной в каждую смежную выемку; b и 7 – входная и выходная кромки выемки; $d_{к.п}$ – диаметр каналов перепуска между смежными выемками; α – угол наклона оси канала перепуска относительно оси выемки; l – геометрический размер, определяющий расположение канала перепуска в выемке.

Экспериментально установленный перепад давления в выемках реализуется в пластинчатом теплообменнике, где осуществляется предлагаемый способ

гидродинамической очистки путем создания дополнительного струйного байпасного течения. С этой целью в зонах повышенного и пониженного давления на стенках смежных выемок 3, выполненных в верхней 1 и нижней 2 пластинах секции в их меридиональной плоскости, имеются входные каналы перепуска 4 в каждой выемке и выходные каналы перепуска 5 в смежные выемки. Под действием перепада давления часть основного потока теплоносителя (показан большими стрелками на рис. 7) образует дополнительное байпасное течение, траектория движения которого показана малыми стрелками на рис. 7, б и имеет следующий вид: из внутренней полости «а» выемки верхней пластины 1 через входной канал перепуска 4 струя байпасного течения попадает в зону пониженного давления во внутренней полости «б» смежной выемки нижней пластины 2 одноименной секции пластинчатого теплообменника. Затем из этой выемки струя байпасного течения через выходной канал перепуска 5 попадает в зону пониженного давления во внутренней полости «в» смежной выемки верхней пластины 1. В последующих смежных выемках происходит аналогичный процесс последовательного движения струй байпасного течения во внутренние полости выемок: «в» – «г», «г» – «д», «д» – «е».

В результате комплексного воздействия единичных самоорганизующихся пульсирующих вихревых структур и струйного байпасного течения, возникающих в сферических выемках под действием основного потока теплоносителя, происходит разрушение крупных фракций загрязнений, оседающих в донной части выемок, и дальнейшее их удаление из выемок и с рабочих поверхностей пластин. Гидродинамическая очистка пластинчатого теплообменника по предлагаемому способу от загрязнений и защита пластин от возникновения накипи происходит непрерывно. При этом, как было показано выше, не происходит заметного изменения теплогидравлических характеристик в исследованном диапазоне параметров.

Выводы

В результате использования предлагаемого способа непрерывной гидродинамической очистки обеспечивается заданная техническими условиями эксплуатации тепловая, гидравлическая и механическая эффективность пластинчатых теплообменников с более длительным сроком их службы при меньших финансовых затратах. В работе [5] приведены рекомендуемые соотношения геометрических параметров теплообменных пластин (d , h , t , R , S), оптимальные размеры и места расположения каналов перепуска ($d_{к.п}$, α , l) в сферических выемках обеих пластин для всех секций пластинчатого теплообменника.

Работа выполнена в рамках выполнения договора № 14.Z50.31.0003 (ведущий ученый С.А. Исаев) и в рамках базовой части госзадания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности по проекту № 3475, номер государственной регистрации 115020430033.

Summary

Method of continuous hydrodynamic cleaning of plate heat exchangers with spherical dimples by a working medium blown through bypass ducts from high-pressure zones to low-pressure zones of adjacent dimples has been developed and experimentally validated. Complex effect on dirt caused by an additional bypass jet flow and vortices generated by the main flow allows improving the quality of heat-exchange surface cleaning and prolongs the lifetime of heat exchangers.

Keywords: plate heat exchanger, spherical dimples, hydrodynamic method of cleaning, blowing, bypass duct, heat transfer, pressure coefficient, experimental research, visualization, flow mode.

Литература

1. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т/2. Пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.
2. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Щелчков А.В., Рыжков Д.В. Теплогидравлические характеристики теплообменных аппаратов с поверхностной интенсификацией теплообмена в виде сферических выемок и выступов // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1, № 3. С. 102–108.
3. Кесарев В.С., Козлов А.П. Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1993. №1. С.106–115.
4. 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.
5. Заявка 2016117480 Российская Федерация, МПК⁷ F 28 G 7/00. Способ гидродинамической очистки пластинчатых теплообменников и пластинчатый теплообменник для осуществления способа / В.В. Такмовцев, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, И.Ш. Зарипов; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ); пат. поверенный Домрачева Л.П. рег. № 539; приоритет 04.05.2016; вх. № 027528. – 2 с.: ил.

Поступила в редакцию
2016 г.

14 октября

Такмовцев Владимир Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» (ТиЭМ) Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел.: 8(917)8860890. E-mail: vvt379@yandex.ru.

Ильинков Андрей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» (ТиЭМ) Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел.: 8(903)3075319. E-mail: ailinkov@mail.ru.

Щукин Андрей Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» (ТиЭМ) Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел.: 89053173724. E-mail: a.v.shchukin@rambler.ru.

Зарипов Ильнар Шавкатович – аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» (ТиЭМ) Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ). Тел.: 89178898828. E-mail: ilnar_z@bk.ru.