

Арсеньев П.Ю.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ ПЕРЕКРЕСТНОМ ДВИЖЕНИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В КАНАЛАХ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА) представляют собой современное оборудование для теплопередачи и относятся к аппаратам компактного типа. Рабочие параметры сварных ПТА (СПТА) значительно шире по температуре и давлению в сравнении с разборными аппаратами. В рамках данного исследования была разработана модель СПТА, что позволило провести экспериментальные исследования теплопередачи и падения давления в этой модели. Потoki движутся поперечно в перпендикулярном направлении друг к другу, что соответствует одному проходу многоходового СПТА с общим противотоком. Показано, что для расчета эффективности теплопередачи может использоваться модель поперечного движения теплоносителей с одной жидкостью смешиваемой, и другой несмешиваемой. Приведены зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи и средней разности температур, которые могут быть использованы для усовершенствования методов расчета СПТА.

Введение. Эффективная рекуперация тепла имеет первостепенное значение для решения проблемы эффективного использования энергии и последующего сокращения потребления топлива и выбросов парниковых газов[1]. Пластинчатый теплообменный аппарат(ПТА) является одним из современных эффективных типов компактного оборудования с интенсификацией теплообмена. Принципы конструкции и дизайна для различных типов ПТА достаточно хорошо описаны в литературе [2]. Чтобы расширить диапазон применения ПТА были разработаны паяные (ППТА) и сварные (СПТА) типы пластинчатых теплообменных аппаратов. При изготовлении сварных ПТА, прокладки между пластинами устраняются, что позволяет значительно расширить диапазон их применения по температуре и давлению.

В рамках данной работы приводятся результаты экспериментальных исследований теплообмена и гидравлического сопротивления в каналах, образованных круглыми гофрированными пластинами специальной формы. СПТА состоит из пакета круглых пластин со специальной формой гофрировки. Изображение одной из пластин представлено на рис. 1. Пластины свариваются вместе, образуя ряд каналов для холодных и горячих потоков, участвующих в процессе теплопередачи. Сварные коллекторы специальной конструкции организуют многоходовое движение обоих потоков с общим противотоком. Движение двух потоков в одном ходе блока организовано в поперечном направлении. В процессе теплопередачи перекрестное движение потоков приводит к уменьшению средней разницы температур по сравнению с противотоком в одном ходе. Общий противоток в СПТА уменьшает эту потерю, но необходимо учитывать такую особенность перекрестного потока для отдельных ходов при проектировании СПТА. Так как уровень перемешивания жидкости по каналу ПТА неизвестен, то информация, доступная в литературных источниках, не может быть применена непосредственно.

Экспериментальная модель и испытательная установка. Теплообмен и падение давления в СПТА исследовались экспериментально, используя модель, состоящую из 15 пластин, представляющих блок пластин в одном ходе СПТА. Методика эксперимента и описание экспериментальной установки приведены в работе [4].

Результаты экспериментальных исследований. Результаты проведения экспериментов позволили рассчитать тепловую нагрузку тестовой модели. Тепловая нагрузка Q для дальнейших расчетов принималась как среднее значение между значениями, рассчитанными для горячего теплоносителя Q_1 и холодного Q_2 , Вт:

$$Q_1 = G \cdot c_{p1} \cdot (t_{11} - t_{12}); \quad Q_2 = G \cdot c_{p2} \cdot (t_{22} - t_{21}); \quad Q = (Q_1 + Q_2) / 2, \quad (1)$$

где G - массовый расход воды, кг/с; c_{p1} и c_{p2} -удельные теплоемкости горячей и холодной воды, Дж/(кг К).

Массовые расходы для обоих теплоносителей в модели равны, а теплоемкость отличается не более чем на 0,3 %, поэтому средняя разность температур рассчитывается как:

$$\Delta t_m = [(t_{11} - t_{22}) + (t_{12} - t_{21})] / 2. \quad (2)$$

Экспериментальное значение общего коэффициента теплопередачи, Вт/(м²К):

$$K_{ex} = \frac{Q}{\Delta t_m \cdot F_a}. \quad (3)$$

Результаты экспериментов сравнивались с прогнозами по зависимостям, предложенным в работе [4]. При расчете коэффициентов теплоотдачи для горячих (1) и холодных (2) сторон использовалось следующее соотношение:

$$Nu_i = 0.065 \cdot Re_i^{6/7} \cdot \left(\psi_i \cdot \zeta_i / F_x \right)^{3/7} \cdot Pr_i^c \cdot \left(\mu_i / \mu_{wi} \right)^{0.14}, \quad (4)$$

где μ_i и μ_{wi} - динамические коэффициенты вязкости, взятые при температуре потока и стенки соответственно, Па с; $Nu = \frac{\alpha_i \cdot d_e}{\lambda_i}$ - число Нуссельта; λ_i - теплопроводность жидкости, Вт/(м·К); α_i - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); Pr_i - число Прандтля; ζ_i - коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий общие потери давления в канале, и рассчитанный согласно соотношения (2); ψ_i - доля потерь давления из-за трения на стенке при полной потере давления; F_x - коэффициент увеличения площади поверхности за счет гофрирования.

Коэффициент теплопередачи определяется согласно выражению:

$$K_{cl} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Сравнение представленных экспериментальных и расчетных значений показало, что расчетные значения несколько выше экспериментальных, но расхождения составляют не более +8 %. Помимо некоторой экспериментальной ошибки это можно объяснить уменьшением эффективности теплообмена за счет перекрестного потока. На рис. 1 представлена зависимость эффективности теплопередачи модели СПТА $\varepsilon = (t_{11} - t_{12}) / (t_{11} - t_{21})$ от числа единиц теплообмена (NTU), выраженная через расчетный общий коэффициент теплопередачи K_{cl} следующим соотношением:

$$NTU = \frac{F_a \cdot K_{cl}}{G \cdot c_{p1}}. \quad (6)$$

Экспериментальные значения ε -NTU расположены ниже значений ε -NTU, вычисленных согласно выражению для потока с противотоком, но могут быть приблизительно аппроксимированы отношением ε -NTU для поперечного потока с одной смешиваемой жидкостью, и другой несмешиваемой [5]:

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[\frac{-1 + \exp(-R \cdot NTU)}{R} \right], \quad (7)$$

где R - отношение массовых расходных теплоемкостей теплоносителей, $R = G_1 c_{p1} / (G_2 c_{p2})$. В нашем случае $R = 1$, но этот параметр можно аппроксимировать и для других случаев с $R < 1$. При использовании

соотношения(9), метод ε -NTU, предложенный в работе [6], можно применять для расчета многоходовых СПТА.

Выводы. Экспериментальное исследование теплообмена в модели СПТА подтвердило справедливость выражений, предложенных для каналов ПТА различной геометрии, для случая поперечного движения теплоносителей в аппарате. Также оценивается зависимость эффективности теплопередачи ПТА (ε) от числа единиц теплообмена (NTU) в одном ходе СПТА с поперечным движением теплоносителей. Предложенные выражения могут использоваться при расчете СПТА с поперечным движением теплоносителей внутри отдельных ходов.

Достоверность предложенных соотношений и разработанный метод расчета СПТА были подтверждены путем сравнения с экспериментальными данными, полученными при испытаниях пилотного СПТА, установленного в колонне синтеза аммиака. При этом СПТА был установлен вместо кожухотрубчатого теплообменного аппарата в кожух действующей колонны синтеза аммиака. Использование СПТА вместо кожухотрубчатого аппарата позволяет сократить объем, занимаемый теплообменником в колонне синтеза аммиака высокого давления, и использовать освободившееся пространство для увеличения объема катализатора. Это приводит к увеличению производства аммиака на 15 %.

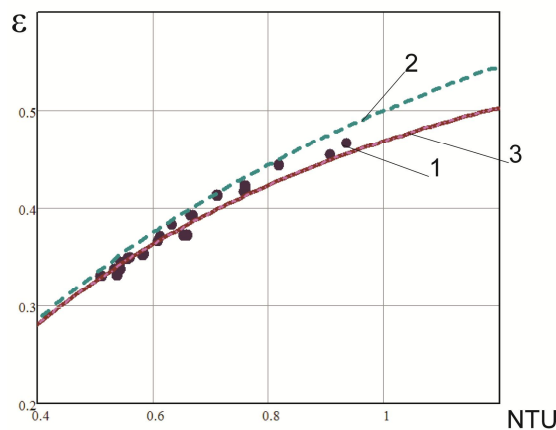


Рисунок 1 – Отношение ε -NTU для СПТА:

1 – эксперимент; 2 – противоток; 3 – перекрестный ток смешанный – несмешанный теплоносители

Литература

1. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б. (2004). Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. ООО Издательский дом «Вокруг цвета».
2. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. / Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L.: CRC Press, 2015. – 354 с.
3. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Y., Khavin G.L., Arsenyeva O.P., Arsenyev P.Y., 2016, Heat transfer and pressure drop in cross-flow welded plate heat exchanger for ammonia synthesis column, Chemical Engineering Transactions, 52, 553-558 DOI:10.3303/CET1652093.
4. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers //Theor. Found. Chem. Eng.- 2012. – Т. 46 № 6. – С. 634–641
5. Fundamentals of heat exchanger design / Shah R.K., Sekulic D.P.: John Wiley & Sons. New Jersey, USA, 2003. – 976.
6. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., 2016, Two Types of Welded Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Industry // Applied Thermal Engineering. 105, 763–773.

7. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., Khavin G. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions //Energy. –2013. – Т. 57. – С. 201–207.

УДК 66.045.01

Арсеньєв П.Ю.

**ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ ПЕРЕХРЕСНОМУ РУСІ ТЕПЛОНОСІЇВ У КАНАЛАХ
ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА**

Пластинчасті теплообмінні апарати (ПТА) представляють собою сучасне обладнання для теплопередачі і відносяться до апаратів компактного типу. При використанні ПТА можна значно підвищити рівень рекуперації тепла і ефективність використання енергії на промислових підприємствах України. Робочі параметри зварних ПТА (ЗПТА) значно ширше по температурі і тиску в порівнянні з розбірними апаратами. В рамках даного дослідження була розроблена модель ЗПТА з перехресним рухом теплоносіїв, що дозволило провести експериментальні дослідження теплопередачі в цій моделі. Показано, що для розрахунку ефективності теплопередачі може використовуватися модель поперечного руху теплоносіїв з однієї рідиною змішуємо, і іншою не змішуємою. Наведено залежності для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі, які можуть бути використані для удосконалення методів розрахунку ЗПТА. Достовірність поданих залежностей і розробленого методу розрахунку ЗПТА підтверджена даними експериментів, проведених на ЗПТА, встановленим в колоні синтезу аміаку з робочою температурою 520 °С і тиском 32 МПа.

Arsenyev P.

**HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP IN WELDED PLATE HEAT EXCHANGER FOR
AMMONIA SYNTHESIS COLUMN**

Plate Heat Exchanger is one of the modern types of compact heat transfer equipment, which can significantly enhance the heat recuperation and improve efficiency of energy usage of Ukrainian industry. The construction of welded PHE (WPHE) can significantly widen the range of its application on temperature and pressure. The results of experimental study of heat transfer in a model of WPHE with cross flow are presented. It is shown that for calculation of overall heat transfer effectiveness can be used the cross flow model with one fluid mixed, another unmixed. The equations for calculation of heat transfer coefficients are presented, which can be used in earlier developed method of WPHE design. The validity of the proposed equations and developed method of WPHE design is confirmed by the data of tests with WPHE installed in ammonia synthesis column at temperature up to 520 °C and pressure equal to 32 MPa.