

УДК 66.045.01

Арсеньев П.Ю.<sup>1</sup>, аспирант, ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л.<sup>1</sup>, д. техн.наук, профессор,  
Перевертайленко А.Ю.<sup>2</sup>, ст.научный сотрудник,  
Капустенко П.А.<sup>2</sup>, к.техн.наук, профессор, Арсеньева О.П.<sup>1</sup>, д. техн.наук, профессор

<sup>1</sup> *Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт", Харьков, Украина*  
<sup>2</sup> *АО "Содружество-Т", Харьков, Украина*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВАРНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ КОЛОННЫ СИНТЕЗА АММИАКА

**Ключевые слова:** теплообменник, колонна, аммиак, математическая модель.

Пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА) широко применяются в промышленности, и обладают компактной конструкцией. Однако использование стандартных ПТА разборной конструкции ограничено диапазонами их применения по давлению и температуре. Конструкция сварных ПТА (СПТА) позволяет существенно расширить диапазон их применения. В данной работе рассматривается СПТА уникальной конструкции, разработанный для использования при высоком давлении (до 32 МПа) и температуре (до 520 °С) в колонне синтеза аммиака. Исследуемый СПТА состоит из пакета круглых гофрированных пластин диаметром 6,26 м, сваренных вместе для формирования каналов для движения холодного и горячего теплоносителя. Многоходовость обоих потоков с организацией противоточного движения теплоносителей обеспечивается особой конструкцией коллекторов СПТА. В статье представлена математическая модель СПТА, которая позволяет выполнять тепловой и гидравлический расчет для определенных технологических условий, а также производить расчеты СПТА с определенными параметрами его конструкции. Применимость предложенных уравнений и разработанная математическая модель подтверждается сравнением с экспериментальными данными. Обсуждается возможность использования СПТА вместо кожухотрубчатого аппарата позволяет сократить объем, занимаемый теплообменником в колонне синтеза аммиака, и позволяет увеличить объем катализатора. Это приводит к увеличению производства аммиака на 15 %.

**Введение.** Эффективная рекуперация тепла позволяет повысить эффективность использования энергии, сократить потребление топлива и уменьшить выбросы парниковых газов [1]. Для повышения рекуперации необходима интенсификация процесса теплопередачи в теплообменных аппаратах [2]. Одним из видов компактного теплообменного оборудования с высокими коэффициентами теплопередачи являются пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА), принципы конструирования и дизайна которых рассматриваются в литературе, например в [3]. Традиционно ПТА были разработаны для пищевой промышленности, и впоследствии нашли широкое применение во многих других областях промышленности, демонстрируя более высокие показатели теплопередачи, чем для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов. Это подтверждается рядом исследований, например, в работе [4] при расчете пластинчатых теплообменников полученная стоимость ПТА была на 15 % и более ниже стоимости кожухотрубчатого аппарата при одинаковых условиях их эксплуатации. Однако при использовании раз-

борной конструкции ПТА, вследствие применения эластомерных прокладок, их использование возможно при давлениях до 25 бар и температурах до 180 °С, при этом рабочие жидкости должны быть не агрессивными к материалу прокладок. Чтобы расширить диапазон применения, были разработаны ПТА паяной и сварной конструкции. При этом эластомерные прокладки между пластинами отсутствуют, что позволяет значительно расширить диапазон применения ПТА при высоких температурах и давлениях.

В данной статье представлен сварной ПТА специальной конструкции, разработанный для применения в колонне синтеза аммиака. Особенности его использования являются высокая температура (до 520 °С) и давление (до 32 МПа). Рассматриваемый аппарат состоит из пакета круглых пластин со специальной формой гофрировки, представленной на рис. 1. При этом пластины сварены вместе и помещены в металлический кожух (рис. 2), образуя ряд каналов для движения холодного и горячего теплоносителей. Многоходовое движение обоих потоков с общим противотоком организовано благодаря специальной конструкции сварных коллекторов. Движение двух потоков в одном блоке осуществляется в поперечном направлении, что существенно отличается от организации движения теплоносителей в обычном ПТА. С гидравлической точки зрения поток поступает в канал через почти полное поперечное сечение, в то время как в каналах разборного аппарата он поступает из распределительного коллектора меньшего диаметра по сравнению с шириной канала. Усовершенствованное распределение потока вызывает значительно меньшее локальное гидравлическое сопротивление в портах сварного ПТА и обеспечивает равномерное распределение потока по ширине канала. Однако перекрестное течение потоков приводит к уменьшению средней разности температур в одном ходе сварного ПТА по сравнению с противотоком в разборном аппарате. При конструировании сварного ПТА необходимо учитывать перекрестное движение теплоносителей в одном ходе для определения теплопередачи во всем аппарате.

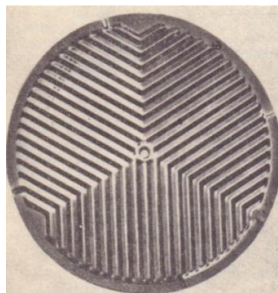


Рисунок 1 – Пластина сварного ПТА для колонны синтеза аммиака

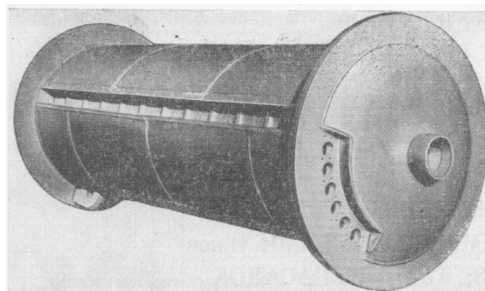


Рисунок 2 – Конструкция разработанного сварного ПТА

**Математическая модель СПТА.** Разработанный сварной ПТА для колонны синтеза аммиака изображен на рис. 2. Для движения теплоносителей конструкция аппарата предполагает различную геометрическую форму каналов по горячей и холодной стороне. Канал для движения холодного теплоносителя образован пластинами, одна из которых на площади 2/3 пластины имеет гофровку, направленную вдоль основного направления движения потока. При этом прилегающая пластина имеет гофрировку с углом наклона  $60^\circ$  к направлению движения основного потока. Средний угол гофрировки в этой области составляет  $30^\circ$ . На остальных 1/3 площади пластины угол гофрирования в направлении движения потока составляет  $60^\circ$  для двух соседних пластин. При этом средний угол наклона гофрировки в направлении потока равен  $\beta_1 = 40^\circ$ . Такая форма каналов необходима для облегчения сброса возможных загрязнений после катализатора, которые могут появиться при старении катализатора, в поток синтез-газа. Средний угол наклона гофрировки в канале для горячего потока равен  $\beta_2 = 50^\circ$ . Сварной ПТА имеет 8 проходов для горячего синтез-газа (каналы с  $\beta_1 = 40^\circ$ ) и 4 прохода для холодного газа. Схема распределения потоков приведена на рис. 3. Зависимости для расчета теплопередачи и падения давления в одном проходе сварного ПТА с каналами такого типа были представлены в работе [5].

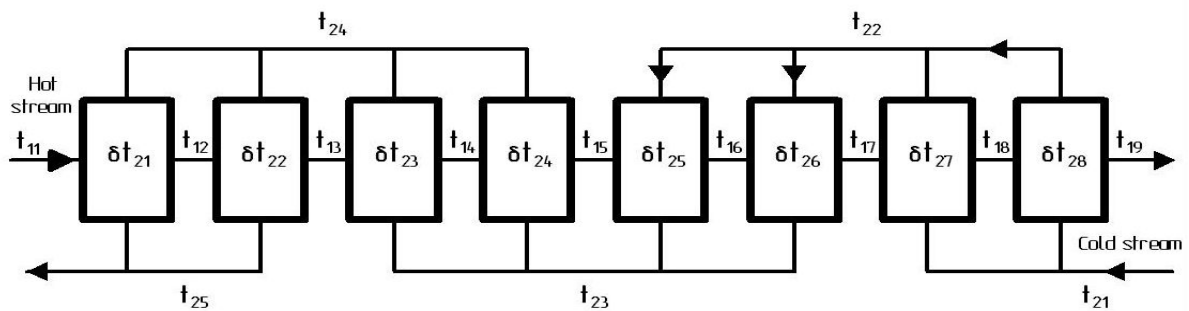


Рисунок 3 – Многоходовая схема движения теплоносителей в сварном ПТА

Распределение движения потоков по группам каналов, соответствующим ходам в ПТА, в значительной степени определяют значение коэффициента теплопередачи в сварном ПТА. В общем случае теплопередача в многоходовом аппарате может быть определена на основе системы алгебраических уравнений для каждого хода, предполагая равные условия движения теплоносителя во всех каналах в одном ходе и равномерное перемешивание жидкостей между ходами [6]. На рис. 3 представлена схема распределения потоков в теплообменном аппарате с четырьмя ходами и движением теплоносителей с общим противотоком. Эффективность передачи тепла такого теплообменного аппарата  $\varepsilon_T$  согласно [7], определяется следующим образом:

$$\varepsilon_T = - \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_x \cdot R}{1 - \varepsilon_x} \right)^4 - 1 \right] \cdot \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_x \cdot R}{1 - \varepsilon_x} \right)^4 - R \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $R = G_1 c_{p1} / (G_2 c_{p2})$  - отношение теплоемкостей горячих и холодных потоков в сварном ПТА;  $c_{p1}, c_{p2}$  - удельные теплоемкости горячего и холодного потока соответственно, Дж/(кг·°С);  $G_1, G_2$  - массовые расходы горячего и холодного теплоносителя соответственно, кг/с;  $\varepsilon_x$  - эффективность передачи тепла в одном ходе.

Один ход аппарата (рис. 3) состоит из двух блоков пластин, образующих один набор каналов для движения холодного потока, и два таких набора для горячего. Для первого хода слева (рис. 3) можно записать следующие зависимости изменения температуры горячего теплоносителя в первом  $\delta t_{11}$  и втором  $\delta t_{12}$  ходах:

$$\delta t_{11} = \Delta \cdot \varepsilon_0 \cdot R_0 ; \quad (2)$$

$$\delta t_{12} = (\Delta - \delta t_{11}) \cdot \varepsilon_0 \cdot R_0 , \quad (3)$$

где  $\Delta = t_{11} - t_{24}$  - разность температур теплоносителей на входе в рассматриваемый ход;  $R_0 = 0.5 \cdot R$  - отношение теплоемкостей горячего и холодного теплоносителей в каналах;  $\varepsilon_0$  - эффективность передачи тепла в одном блоке пластин, соответствующем одному ходу, что в конкретном случае составляет 1/8 от общего количества пластин.

Эффективность передачи тепла в одном ходе, состоящем из двух ходов:

$$\varepsilon_x = \frac{t_{25} - t_{24}}{\Delta} = \frac{\delta t_{11} + \delta t_{12}}{R \cdot \Delta} = \varepsilon_0 - \varepsilon_0^2 \cdot \frac{R}{4} . \quad (4)$$

Анализ экспериментальных данных по исследованию модели сварного ПТА, имеющего один ход [5], позволил установить соотношение для расчета эффективности передачи тепла в одном блоке. При этом в каналах с меньшим углом наклона гофрировки используется зависимость для движения теплоносителя при  $\beta_1 = 40^\circ$ , а для определения эффективности передачи тепла в каналах с большим углом наклона гофрировки зависимость при  $\beta_2 = 50^\circ$ . Для расчета эффективности в блоке пластин применяется соотношение:

$$\varepsilon_0 = 1 - \exp \left[ \frac{-1 + \exp(-R_0 \cdot NTU_0)}{R_0} \right] . \quad (5)$$

Число единиц теплопереноса в одном блоке пластин определяется при допущении о его равном распределении во всех ходах,  $NTU_0 = NTU/8$ . Общее количество единиц теплопереноса в сварном ПТА:

$$NTU = \frac{F_a \cdot U}{G_2 \cdot c_{p2}} . \quad (6)$$

Для расчета коэффициента теплопередачи  $U$  физические свойства жидкостей определяются для среднего значения температуры. Коэффициенты теплоотдачи по горячей  $h_1$  и холодной стороне  $h_2$  рассчитываются согласно зависимостям, представленным в работе [5].

$$U = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right)^{-1} , \quad (7)$$

где  $\delta_w$  - толщина стенки пластины, м;  $\lambda_w$  - теплопроводность металла пластины, Вт/(м·К).

Потеря давления в канале определяется как совокупность падения давлений на основном гофрированном поле и в зонах распределения потока на входе в канал и выходе из него. В работе [8] предложено использовать коэффициент локального гидравлического сопротивления  $\zeta_{Dzi}$ , и тогда падение давления в одном ходе можно вычислить согласно следующему соотношению:

$$\Delta p_i = \left( \zeta_i \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{\rho_i \cdot w_i^2}{2} + \zeta_{Dzi} \cdot \frac{\rho_i \cdot w_{enx.i}^2}{2} \right) \cdot X_i, \quad (8)$$

где  $w_{enx.i}$  - скорость на входе/выходе из канала, м/с;  $w_i$  - скорость теплоносителя в каналах, м/с;  $\rho_i$  - плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta_i$  - коэффициент трения в канале, рассчитанный согласно зависимости представленной в [3]. Коэффициенты локального гидравлического сопротивления в зонах распределения потока для рассматриваемых каналов сварного ПТА принимаются  $\zeta_{Dzi}=11$  и  $\zeta_{Dz2}=17$ .

Соотношения (1)–(8) совместно с зависимостями, предложенными в работе [5] для одного хода сварного ПТА, полученных на основе экспериментальных исследований, представляют собой математическую модель сварного ПТА, и позволяют рассчитывать тепло-гидравлические параметры аппарата. Адекватность модели была подтверждена на основе данных, полученных для испытательного образца сварного ПТА, установленного в колонке синтеза аммиака.

**Результаты испытаний сварного ПТА в промышленности.** Испытательный образец сварного ПТА был установлен в колонне синтеза аммиака, работающей на заводе по производству аммиака.

Конструкция колонны представлена на рис. 4. Кожух сварного ПТА (1) и реактор (3) расположены в корпусе высокого давления (4) с внутренним диаметром 800 мм. Рабочее давление составляет 32 МПа, температура - 520 °С. Подаваемый газ поступает из верхней части колонны и проходит вниз через пространство между корпусом и кожухом и поступает на вход в сварной ПТА с температурой  $t_{21}$ . В теплообменном аппарате он нагревается до температуры  $t_{25}$  газом, выходящем из реактора. После выхода из сварного ПТА газ смешивается с потоком байпасного газа с температурой  $t_{b2}$ . Байпасный газ подается с низа колонны с температурой  $t_{b1}$  и поступает в зону смешивания через две специальные трубы, расположенным по сторонам сварного ПТА. После смешивания газ направляется в центральную трубу (5), из которой в верхнее пространство блока катализатора (3), и в область трубок, внутреннюю (9) и внешнюю (7), где он нагревается и после направляется в катализатор (8). После зоны катализатора (6) и коллектора (2) газ с температурой  $t_{11}$  поступает в сварной ПТА, где он охлаждается до температуры  $t_{19}$  и выходит внизу колонны.

Для измерения температуры на входе и выходе теплообменного аппарата использовались термомпары хромель-алюмель, которые вводились в колонну через насадку специальной конструкции для работы при высоком давлении. Расход подаваемого газа и байпасного газа измерялся с помощью калиброванных расходомеров. Давление подаваемого и выходящего газов измерялось с помощью манометров высокого давления.

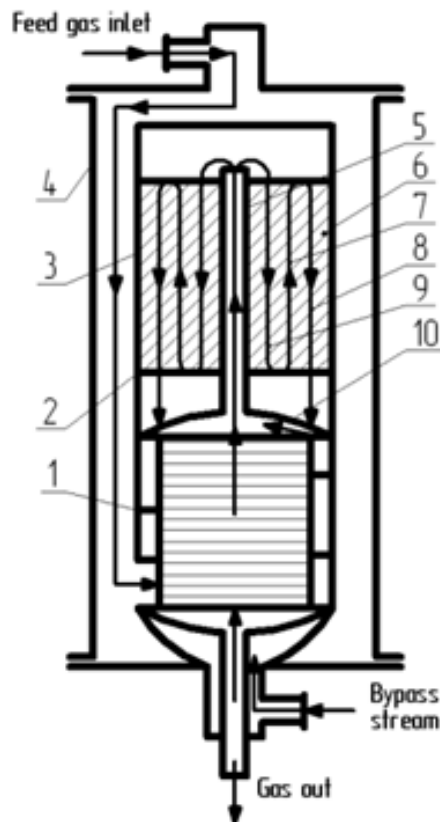


Рисунок 4 – Многоходовая схема движения теплоносителей в сварном ПТА

Основные геометрические параметры экспериментального образца сварного ПТА, гофрировки и межпластинных каналов представлены в таблице 1. Результаты трех испытаний (без байпасного потока) и расчетные значения теплопередачи в сварном ПТА представлены в таблице 2. Физические свойства смеси водород-азот с аммиаком приняты согласно данным работы [9]. Экспериментальное значение эффективности передачи тепла в аппарате рассчитывался согласно выражению:

$$\varepsilon_{TE} = \frac{t_{25} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}. \quad (9)$$

Значения эффективности передачи тепла, рассчитанные для экспериментальных данных по выражению (9), хорошо согласуются с результатами вычислений по зависимости (1). Это подтверждает точность предложенной математической модели и ее применимость для проектирования сварных ПТА специальной конструкции, рассматриваемой в данной работе.

Сварной ПТА специальной конструкции был установлен вместо кожухотрубчатого теплообменного аппарата с площадью поверхности теплопередачи 148 м<sup>2</sup> и длиной 3000 мм. Сварной ПТА имеет вес 1694 кг вместо 2992 кг кожухотрубчатого теплообменника и занимает 0,96 м<sup>3</sup>, что на 0,48 м<sup>3</sup> меньше. Свободное пространство можно использовать для увеличения загрузки катализатора в колонне, что ведет к 15 % увеличению производительности по аммиаку.

Таблица 1 – Параметры тестируемого сварного ПТА

|   |          |   |       |
|---|----------|---|-------|
| Общая площадь поверхности теплообмена, $F_a, \text{м}^2$            | 114,2    | Теплопроводность стенки, $\lambda_w, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | 16    |
| Количество пластин, $N_p$   | 359      | Высота гофры, $b, \text{м}$   | 0,004 |
| Площадь поверхности теплопередачи одной пластины, $F_p, \text{м}^2$ | 0,32     | Шаг гофры, $S, \text{м}$  | 0,018 |
| Высота сварного ПТА, $\text{м}$                                     | 1,82     | Средняя ширина канала, $W_{ch}, \text{м}$                               | 0,55  |
| Площадь поперечного сечения одного канала, $f_{ch}, \text{м}^2$     | 0,0022   | Эквивалентный диаметр канала, $d_e, \text{м}$                           | 0,008 |
| Наружный диаметр пластины, $D_o, \text{м}$                          | 0,626    | Угол наклона гофрировки для горячего потока, $\beta_1, \text{град}$     | 40    |
| Толщина пластины, $\delta_w, \text{м}$                              | 0,001    | Угол наклона гофрировки для холодного потока, $\beta_2, \text{град}$    | 50    |
| Материал пластины   | AISI 304 | Ширина входа (выхода) канала, $W_{enx}, \text{м}$                       | 0,4   |

Таблица 2 – Результаты испытаний сварного ПТА в промышленности

|   | Опыт №1 | Опыт №2 | Опыт №3 |
|---|---------|---------|---------|
| Расход газа, $\text{кг}/\text{с}$   | 5,55    | 5,54    | 4,39    |
| Температура входа горячего газа $t_{11}, \text{°C}$                             | 496     | 495     | 487     |
| Температура выхода горячего газа $t_{19}, \text{°C}$                            | 190     | 198     | 195     |
| Температура входа холодного газа $t_{21}, \text{°C}$                            | 78      | 75      | 82      |
| Температура выхода холодного газа $t_{25}, \text{°C}$                           | 373     | 380     | 389     |
| Давление при входе в колонну $P_{in}, \text{МПа}$                               | 30      | 29      | 30      |
| Давление на выходе колонны $P_{out}, \text{МПа}$                                | 28,5    | 27,5    | 28,5    |
| Концентрация аммиака в холодном подаваемом газе, $\% \text{mol}$                | 3,3     | 3,3     | 3,3     |
| Концентрация аммиака в горячем газе, $\% \text{моль}$                           | 17,2    | 17,2    | 17,2    |
| Расчетная температура выхода холодного газа $t_{25calc}, \text{°C}$             | 382,5   | 380,9   | 381,2   |
| Расчетный коэффициент теплопередачи $U, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$    | 1146    | 1145    | 970     |
| Число единиц теплопереноса NTU (расчетное)                                      | 6,46    | 6,45    | 6,91    |
| Эффективность передачи тепла $\varepsilon_T$ (расчетная)                        | 0,729   | 0,728   | 0,739   |
| Эффективность передачи тепла $\varepsilon_{TE}$ (экспериментальная)             | 0,706   | 0,726   | 0,758   |
| Расхождение, $\%$   | -3,2    | 0,32    | 2,5     |
| Эффективность теплопередачи с противоточным течением потока $\varepsilon_{Tcc}$ | 0,841   | 0,840   | 0,847   |
| Потери эффективности за счет перекрестного потока, $\%$                         | 13,2    | 13,2    | 12,8    |

В то же время перекрестное движение теплоносителей в одном ходе сварного ПТА является определяющим для расчета теплопередачи в аппарате. Для определения эффективности передачи тепла использовали следующую зависимость из работы [10] для полного противотока:

$$\varepsilon_{Tcc} = \frac{1 - \exp[-NTU \cdot (1 - R)]}{1 - R \cdot \exp[-NTU \cdot (1 - R)]}. \quad (10)$$

Сравнение общей эффективности передачи тепла  $\varepsilon_T$  со значением для чистого противотока на 13 % меньше. Анализ зависимости (4) указывает на то, что некоторое снижение эффективности передачи тепла за один проход объясняется наличием двух ходов с несимметричным распределением теплоносителей (2 хода для горячего потока

и 1 ход для холодного потока). Из этого можно сделать вывод, что симметричное распределение потоков с одинаковым количеством ходов для обоих теплоносителей более предпочтительно, даже при перекрестном движении сред в отдельных каналах. Однако из-за конструктивных особенностей, или условий работы (в нашем случае, необходимость в удалении отложений катализатора вместе с горячим газом), необходимо выбирать конструкцию с неодинаковым количеством ходов. В этом случае требуется оптимизация распределения ходов с использованием обобщенных зависимостей, представленных в работе [6] и определение теплопередачи в одном ходе согласно приведенным данным.

**Выводы.** В работе представлена математическая модель сварного ПТА специальной конструкции для колонны синтеза аммиака, которая описывает особенности процесса теплопередачи в сварном ПТА и учитывает перекрестное движение теплоносителей в каналах и особенности распределения потоков с общим противотоком. Исходя из результатов промышленных испытаний можно заключить, что предложенная модель позволяет:

– Рассчитать коэффициенты теплопередачи для перекрестного движения теплоносителей в каналах ПТА с различной геометрической формой гофровки.

– Определить эффективность передачи тепла в одном ходе сварного ПТА с поперечным движением теплоносителей, при смешении одного перемешанного потока с другим несмешанным.

– Применять предложенные зависимости при проектировании оптимальной конструкции сварных ПТА с общим противотоком и перекрестным движением теплоносителей внутри отдельных ходов.

Промышленные испытания подтвердили преимущества использования сварного ПТА в колонне синтеза аммиака, в сравнении с традиционным кожухотрубчатый аппаратом. Установка сварного ПТА позволяет сократить объем, занимаемый теплообменным аппаратом в колонне и использовать его для катализатора. Это позволит увеличить производство аммиака на 15 %. Надежность и высокая производительность сварного ПТА подтверждается стабильной работой аппарата в течении трех лет при высокой температуре (до 520 °C) и давлении (до 32 МПа).

### Литература

1. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Тovaжнiянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б., (2004). Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. ООО Издательский дом «Вокруг цвета», Харьков, Украина.

2. Тovaжнiянский Л.Л., Анипко О.Б., Маляренко В.А., Абрамов Ю.А., Кривцова В.И., Капустенко П.А., (2002). Основы энерготехнологии промышленности. НТУ «ХПИ», Харьков, Украина.

3. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., (2015). Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

4. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G. (2009). The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. Journal of Cleaner Production, 17(10), 951–958.



5. Tovazhnyanskyy 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.
6. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., (2015). Two Types of Welded Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Industry, *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.
7. Kays, W.M., London, A.L., (1984). *Compact Heat Exchangers*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
8. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., Khavin G., (2013). The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions. *Energy*, 57, 201–207.
9. Мельников Е. (1987). *Справочник азотчика*. М.: Химия.
10. Shah R. K., Sekulic D. P., (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons. New Jersey, USA.

Bibliography (transliterated)

1. Kapustenko P.A., Kuzin A.K., Makarovskiy E.L., Tovazhnyanskyy L.L., Ulev L.M., Chernaya E.B., (2004). *Alternativnaya energetika i energosberezhenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy*. ООО Izdatelskiy dom «Vokrug tsveta», Harkov, Ukraina.
2. Tovazhnyanskyy L.L., Anipko O.B., Malyarenko V.A., Abramov Yu.A., Krivtsova V.I., Kapustenko P.A., (2002). *Osnovyi energotekhnologii promyishlennosti*. NTU «HPI», Harkov, Ukraina.
3. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., (2015). *Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
4. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G. (2009). The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 951–958.
5. Tovazhnyanskyy 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.
6. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., (2015). Two Types of Welded Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Industry, *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.
7. Kays, W.M., London, A.L., (1984). *Compact Heat Exchangers*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
8. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., Khavin G., (2013). The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions. *Energy*, 57, 201–207.
9. Melnikov E. (1987). *Spravochnik azotchika*. М.: Himiya.
10. Shah R. K., Sekulic D. P., (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons. New Jersey, USA.

УДК 66.045.01

Арсеньєв П.Ю., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО О.Ю., КАПУСТЕНКО П.О.,  
Арсеньєва О.П.,

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗВАРНОГО ПЛАСТИНЧАСТОГО  
ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ ДЛЯ КОЛОНИ СИНТЕЗУ АМІАКУ**

Пластинчасті теплообмінні апарати (ПТА) широко застосовуються в промисловості, і мають компакту конструкцію. Однак використання стандартних ПТА розбірної конструкції обмежується діапазоном їх застосування по тиску і температурі. Конструкція зварних ПТА (ЗПТА) дозволяє істотно розширювати діапазон їх застосування. В даній роботі розглядається ЗПТА унікальної конструкції, розробленої для використання при високому тиску (до 32 МПа) і температурі (до 520 °С) в колонці синтезу аміаку. Дослідний ЗПТА складається з пакету круглих гофрованих пластин діаметром 626 мм, зварених разом для формування каналів для руху холодного та гарячого теплоносія. Багато ходовість обох потоків з організацією проти-руху теплоносіїв забезпечується особливою конструкцією колекторів ЗПТА. В статті представлена математична модель ЗПТА, яка дозволяє виконувати теплове та гідравлічне розрахунки для певних технологічних умов, а також здійснювати розрахунки ЗПТА з певними параметрами його конструкції. Застосовність запропонованих даних та розробленої математичної моделі підтверджується порівнянням з експериментальними даними. Обговорюється можливість використання ЗПТА замість кожухотрубчастого апарату дозволяє скоротити об'єм, зайнятий теплообмінником у колоні синтезу аміаку, і дозволяє збільшити кількість каталізатора. Це призводить до збільшення виробництва аміаку на 15 %.

Arsenyev P., Tovazhnyansky L., Perevertaylenko O., Kapustenko P., Arsenyeva O.

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE WELDED PLATE HEAT EXCHANGER  
FOR AMMONIA SYNTHESIS COLUMN**

Plate heat exchangers (PHEs) are widely used in industry, and can be regarded to the compact heat exchange equipment. But the application of PHEs of standard plate-and-frame type is limited by temperature and pressure operating conditions. The design of welded PHEs allows widening the application range. In the present work the specially designed welded PHE is presented, which can be used for high pressures (up to 32 MPa) and temperatures (520 °C) in the ammonia synthesis column. It consists of the stack of round corrugated plates with diameter 626 mm, which are welded together to form a number of channels for cold and hot streams exchanging heat. The mathematical model of considered welded PHE is developed, which enables to perform the thermal and hydraulic design for specified process conditions and also rating calculations of the unit with determined parameters of its construction. The validity of the proposed relations and developed mathematical model is confirmed by comparison with the data of tests on welded PHE installed in ammonia synthesis column at industrial enterprise of ammonia production instead shell-and-tube heat exchanger. The use of welded PHE instead shell-and-tube unit enable to cut down the volume occupied by heat exchanger in high pressure shell of ammonia synthesis column and allows increase of the volume of catalyst. It leads to 15 % rise of ammonia output.