

## АНАЛИЗ В И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ В КОНТАКТНЫХ АППАРАТАХ

Владислав Спинов

Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
Адрес: Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, г.Одесса,  
Украина, 65029

E-mail:valera2187@rambler.ru

**Аннотация.** Проведен анализ устройств для интенсификации тепломассообмена в контактных аппаратах. Усовершенствована математическая модель теплообмена для пенного аппарата с вихревой тарелкой. Определены коэффициенты теплоотдачи, и их сравнение с теплообменными характеристиками традиционной тарелки.

**Ключевые слова:** контактные аппараты, тепломассообмен, вихревые потоки, завихрители, энергоэффективность.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эффективной работы тепло- и массообменного оборудования (испарителей, парогенераторов, конденсаторов, деаэраторов, подогревателей, охладителей) тепловых и атомных электростанций, котельных, теплопунктов промышленных предприятий и жилищно-коммунального хозяйства, особенно входящего в состав систем водоподготовки, тепло- и водоснабжения и непосредственно влияющего на качество приготовляемой воды, остается важной задачей и сегодня. Актуальность ее решения возрастает в настоящий период, характеризующийся постоянным ростом стоимости энергоносителей, аппаратуры, а также повышенным вниманием к вопросам энерго- и ресурсосбережения. Существенное повышение эффективности оборудования, обеспечивающее значительное снижение металлоемкости и энергопотребления на производство продукции, возможно в первую очередь за счет интенсификации процессов теплообмена.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Для теплообменных аппаратов и мокрого пылеулавливания разработан ряд оригинальных устройств, которые позволяют интенсифицировать процессы теплообмена происходящие в этих аппаратах.

Так в [1], предложена конструкция контактной тарелки для тепломассообменного аппарата, конструкция которой позволяет увеличивать закручивание потока и обеспечить более полное использования рабочего объема аппарата за счет отверстий оснащенных лепестками, отогнутыми под углом к плоскости диска и образуют щелевые отверстия в форме креста с загнутыми под прямым углом концами.

В некоторых случаях увеличение эффективности теплообменных аппаратов за счет улучшения газонасыщенности барботажного слоя, увеличения высоты динамической пены на тарелке и уменьшения забиваемости отверстий, достигается путем выполнения тарелки из шаров жестко закрепленных по хордам окружности параллельными рядами вплотную один к другому [2].

В этом аппарате газ проходит снизу вверх в отверстия между шарами и образует на тарелке газожидкостный слой, в котором происходят процессы тепломассообмена или пылеочистки. Такая конструкция тарелки позволяет увеличить периметр слива, уменьшить гидравлическое сопротивление. Увеличить газонасыщенность слоя и уменьшить забиваемость отверстий.

Для снижения потерь кинетической энергии газа при прохождении его через щелевую тарелку, щели снабжают прикрепленной полосой, что повышает эффективность работы за счет увеличения турбулизации газо-жидкостного слоя [3]. Авторами разработки рекомендуется устанавливать полосы наклонно под углом 70-80° к горизонтальной плоскости. Такое техническое решение повышает эффективность массопередачи, как в жидкой так и в газовой фазе на 20%.

Одной из важных характеристик любого контактного аппарата является величина брызгоуноса из аппарата. Многими отечественными и зарубежными специалистами ведется поиск рационального решения с целью минимизации уноса жидкости в процессе тепломассообмена.

Для снижения брызгоуноса применяется изменение направления движения жидкости через тарелку путем применения закручивающих устройств.

Например, в конструкции тарелки предложенной в [4] для изменения направления движения применяются перегородки с треугольными лепестками, отогнутыми в противоположных направлениях. Работа тарелки осуществляется в режиме противотока, жидкость накапливается на тарелке, образуя взаимодействующий газожидкостный слой из которого выделяется значительное количество капель. Капли, ударяясь о лепестки тарелки, изменяют направление движения и движутся под углом к плоскости тарелки. Между перегородками создается направленная циркуляция жидкости, за счет которой снижается брызгоунос и а также расширяется диапазон устойчивой работы тарелки.

Для модернизации сетчатых барботажных тарелок, недостатком которых является неравномерность распределения фаз в рабочем

сечении тарелки, которая приводит к проскоку (неконтакту) газа, особенно в зазоре между периметром тарелки и царгой, применяют специальный завихритель установленный по периметру тарелки [5].

Тарелка работает следующим образом. При поступлении жидкости и газа бароботажная тарелка работает в центральной части как обычная сетчатая тарелка, а по периметру, как тарелка с закрученным потоком фаз. Вращающаяся по периметру зона (круг) фаз делает невозможным проскок (неконтакт) фаз. Вращательное движение фаз у царги «подтормаживает» жидкость, стекающую вниз, вследствие чего, образуется градиент уровней на ее периферии и у центра тарелки. Поэтому жидкость от периферии перемещается равномерно по поверхности тарелки к центру и контактирует с газом проходящим через рабочие отверстия тарелки. Закрученный поток фаз по периметру уплотняет зазор и устраняет возможность проскока фаз между царгой и завихрителем.

Применение данной конструкции позволяет повысить эффективность теплообмена, за счет обеспечения равномерного распределения фаз на полотне тарелки.

Для улучшения условий сепарации и организации циркуляции жидкости применяются вихревые тарелки [6], в полотне которых установлены закручивающие устройства. Установка закручивающих устройств непосредственно в полотне тарелки позволяет расширить диапазон устойчивой работы теплообменного аппарата, снизить брызгонос, обеспечивает интенсивную рециркуляцию и дробление жидкости на полотне тарелки, снижает гидравлическое сопротивление аппарата.

Анализируя приведенные конструкции теплообменных аппаратов можно констатировать, что все технические приемы интенсификации процессов теплообмена можно условно подразделить на пассивные (не требующие непосредственной затраты энергии извне) и активные, которые требуют прямых затрат энергии от внешнего источника. Пассивные методы включают специальную физико-химическую обработку поверхностей, использование шероховатых и развитых поверхностей, устройств,

обеспечивающих перемешивание и закручивание потока, способы воздействия на поверхностное натяжение, добавление примесей в теплоноситель. Активные методы включают механические воздействия, вибрацию поверхностей теплообмена, пульсации потока жидкости, использование электростатических полей, вдув и отсос теплоносителя.

Для интенсификации процессов теплообмена нами предложена новая конструкция тарелки для контактных аппаратов [7], приведена на рис. 1. С помощью предложенной конструкции предусматривается снижение брызгоноса и повышение степени теплообмена в системе «газ-жидкость», путем использования «специально организованных» вихревых потоков.

Техническая реализация предложенного аппарата заключается в следующем: обеспечить эффективную закрутку потока газа в аксиально-лопаточном завихрителе с отбойником и создать равномерный пенный слой жидкости, обеспечивая эффективное протекание процесса теплообмена.

Для проведения расчетов эффективности теплообмена в вихревой тарелке разработана математическая модель. Построение модели для вихревой тарелки обусловлено трудностью одновременного математического описания взаимодействия закрученного потока и жидкости, поэтому при построении модели теплообмена в вихревой тарелке был принят ряд допущений:

- 1) температура парогазовой смеси принимается одинаковой во всем объеме и изменяется только во времени;
- 2) скорость парогазовой смеси вблизи внутренней поверхности пузыря  $V_s$  принимается пропорциональной скорости парогазового потока на выходе из завихрителя вихревой тарелки  $V_0$ :  $V_s = k_b V_0$ , где  $k_b$  – коэффициент приведения;
- 3) форма пузыря на выходе из вихревой тарелки полагается овально-цилиндрической;
- 4) при формировании пузыря за счет резкого торможения воздуха о его поверхность движение смеси должно рассматриваться как нестационарно-вихревое, причем с высокой циркуляцией, процессы теплообмена в этом случае должны определяться вынужденной конвекцией и протекать на вогнутой поверхности (рис. 1(a)).

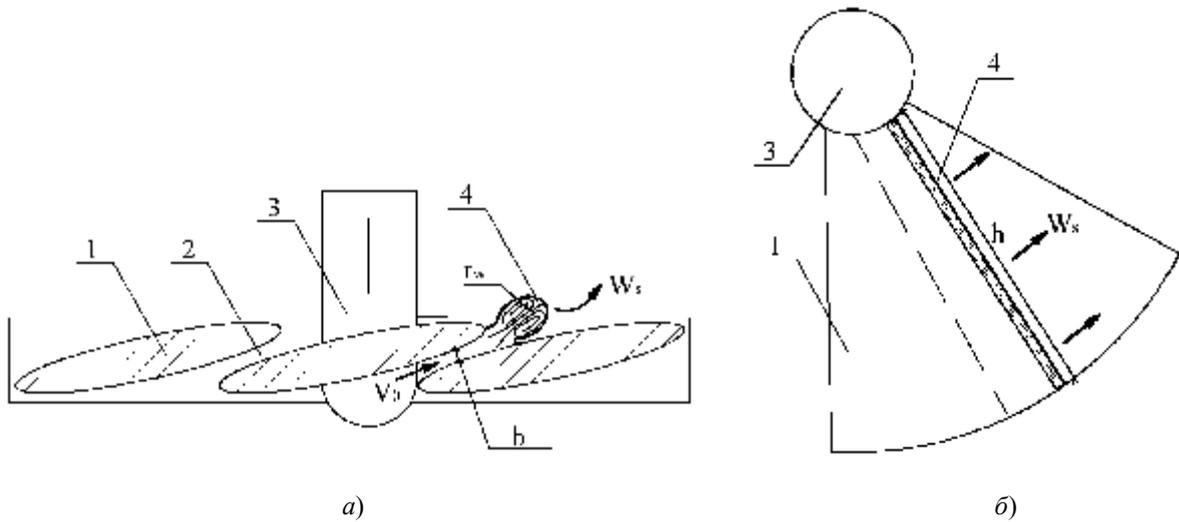


Рис. 1. Схема формирования парогазового пузыря в газожидкостном слое вихревой тарелки [7]: 1 – лопасть завихрителя; 2 – щелевое отверстие; 3 – сердечник завихрителя; 4 – овал-цилиндрический пузырь.

Fig. 1. Schematic of the formation of vapor-gas bubble in a gas-liquid vortex layer plates [7]: 1 - swirl vane 2 - slit opening 3 - core swirler 4 - oval-cylindrical bubble.

При вычислении коэффициентов тепло- и массообмена на поверхности пузыря радиусом  $r_w$  вводится поправка [8] на усиление тепломассообменных процессов потоках на вогнутых криволинейных поверхностях:

$$\alpha = k_{\alpha,\beta} Nu \frac{\lambda}{r_w}, \quad (1)$$

$$\beta = k_{\alpha,\beta} Nu \frac{D}{r_w}$$

5) при определении коэффициентов конвективного тепло- и массообмена принимается гипотеза квазистационарности и их расчет производится по формулам (1) в соответствии с известными в литературе критериальными зависимостями [9]:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,175} \cdot \theta^{*2}, \quad (2)$$

$$Nu = B \cdot Re^m \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \cdot \theta^{*2}$$

где  $Re = \frac{V_s \cdot r_w}{\nu_r}$  – число Рейнольдса;

$Pr = \frac{\nu_r}{a}$ ,  $Pr' = \frac{\nu_r}{D}$  – числа Прандтля;  $Gu = \frac{T_{i0} - T_{i0}}{T_{i0}}$  –

критерий Гухмана;  $\theta^* = \frac{T_{i0}}{T_w}$  – температура влажного

воздуха внутри пузыря, обезразмеренная по температуре поверхности раздела фаз;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности влажного газа внутри пузыря;  $D$  – коэффициент диффузии пара;  $\nu_r$  – кинематическая вязкость парогазовой смеси;  $T_w$ ,  $T_{i0}$  – температуры влажного газа внутри и на поверхности пузыря;  $T_{i0}$  – температура газа до поступления в аппарат, определяемая по «мокрому» термометру;  $a$  – температуропроводность влажного газа.

Процесс тепломассообмена в пузыре определяется системой, включающей в себя

уравнение баланса полного тепла, уравнение баланса массы паровой фазы и начальные условия:

$$(c_{сг} + c_{нап} \cdot d_e) \frac{dT_e}{d\tau} + c_{нап} \cdot T_e \cdot \frac{dd_e}{d\tau} \quad (3)$$

$$-G \frac{\alpha}{\rho_{сг}} (T_w - T_e) = 0;$$

$$\frac{dd_e}{d\tau} = G \frac{\beta(\rho_{iw} - \rho_{ia})}{\rho_{ia}}; \text{ при } \tau=0 \quad T_B = T_{B0}, d_B = d_{B0} \quad (4)$$

Здесь  $T_{B0}$  и  $d_{B0}$  – температура и влажосодержание газа перед отверстием газораспределительной решетки;  $d_B$  – влажосодержание газа в пузыре;  $c_{нап}$  – теплоемкость водяного пара;  $c_{сг}$ ,  $\rho_{сг}$  – теплоемкость и плотность сухого газа;  $\tau$  – время;  $\rho_{iw}$ ,  $\rho_{iw}$  – концентрация водяных паров у поверхности пузыря и внутри его соответственно;  $\beta$  – коэффициент массообмена;  $G$  – геометрический параметр для овал-цилиндрического пузыря;  $r_w$ ,  $h$  – радиус и длина овал-цилиндрического пузыря, формирующегося в вихревой тарелке.

Концентрация пара или газа определялись из уравнения [10] состояния для соответствующей компоненты парогазовой смеси. Для определения радиуса пузыря использовано уравнение расхода парогазовой смеси, учитывающее эффект конденсации водяного пара на поверхность. В поле вращающегося газожидкостного слоя в вихревом элементе частота отрыва пузыря принималась с учетом центробежного ускорения,  $g^* = w_s^2/R$ , где  $R$  – радиус завихрителя,  $w_s$  – скорость вращения газожидкостного слоя [11].

Система уравнений (3) и (4) в безразмерном виде решалась для диапазона температур воздуха 50-100 °С, подаваемого через вихревые элементы решетки диаметром  $d_0 = 50$  мм с шириной щели

между лопастями завихрителей  $b = 3$  мм. Средняя скорость газа перед вихревой тарелкой варьировалась в пределах 1,5-3 м/с, влагосодержание варьировалось в диапазоне 0,01-0,5 кг/кг с.в. параметр  $k_b$  для расчета скорости у поверхности пузыря принимался равным 0,003.

Проведенный анализ параметров теплообмена вихревой тарелки ( $\alpha_{вт}$ ) и их сопоставление с экспериментальными и расчетными зависимостями для традиционной (дырчатой) тарелки ( $\alpha_{дт}$ ) [12] показывает превышение коэффициента теплоотдачи вихревой тарелки на 5% при скорости газа 1,5 м/с и  $d_{в0} = 0,2$  кг/кг с.в., и 9% при  $d_{в0} = 0,5$  кг/кг с.в., а при скорости 3м/с – 5,7% и 13% соответственно.

Температура жидкости  $T_{ж}$  по которой определяется температура жидкости на поверхности пузыря  $T_w$  в (3), является переменной величиной. Для ее определения записано уравнение теплового баланса в контрольном объеме газожидкостной смеси. Изменение теплосодержания жидкости за единицу времени можно определить из соотношения [9]:

$$\int_V c_{жс} \rho_{жс} (1 - \varphi) \frac{\partial T_{жс}}{\partial \tau} dv = - \int_{S_v} c_{жс} \rho_{жс} (T_{жс} - T_{жс0}) v_{нф}^n ds = \int_V \left( \alpha s_n (T_B - T_W) - \varphi \cdot \rho_{сг} \cdot c_{сг} \cdot T_B \frac{\partial d_B}{\partial \tau} \right) dv \quad (5)$$

где:  $T_{ж0}$  – температура охлаждающей жидкости поступающей в камеру аппарата;  $v_{нф}^n$  – нормальная составляющая скорости охлаждающей жидкости, поступающей в контрольный объем;  $S_v$  – площадь поверхности ограничивающая контрольный объем;  $s_n = 4\pi r_w^2 / V$  – удельная теплоотводящая поверхность пузыря;  $d_s$  – ориентированный по нормали элемент площади поверхности  $S_v$ .

Уравнение теплового баланса для жидкости в контактном аппарате с вихревой тарелкой (5) может быть представлено в интегрально-дифференциальном виде:

$$c_{жс} \rho_{жс} (1 - \varphi) \frac{\partial T_{жс}}{\partial \tau} = -c_{жс} \rho_{жс} (T_{жс} - T_{жс0}) q V_0 + 4 \frac{S_0}{h_0} f \int_0^{1/f} \alpha \cdot \tilde{r}_w (T_B - T_W) \partial \tau - \frac{\varphi}{1 - \varphi} \cdot \rho_{сг} \cdot c_{сг} \cdot f \int_0^{1/f} T_B \frac{dd_B}{\partial \tau} \partial \tau; \quad \text{при } 0 \quad T_B = T_{в0}, d_B = d_{в0} \quad (6)$$

Здесь  $\tilde{r}_w = r_w / r_0$ , где  $r_0$  – радиус отверстия;  $h_0$  – высота светлого столба жидкости над решеткой;  $S_0$  – относительная площадь живого сечения решетки;  $\varphi$  – газосодержание в пенном слое;  $q$  – коэффициент орошения;  $f$  – частота отрыва пузырей (для воды  $f = 20$  1/с)

Расчеты изменения температуры жидкости в пенном слое при подаче воздуха с невысоким

начальным влагосодержанием ( $d_{в0} = 0,4$  кг/кг), позволили показать, что количество теплоты, поступающее из газа в жидкость оказывается недостаточным для преодоления потерь тепла на испарение.

Поэтому с течением времени происходит незначительное уменьшение температуры жидкости в слое, которое не превышает 2 % от первоначального значения. Однако массообменные процессы, протекающие при повышенном влагосодержании, оказывают существенное влияние на теплопередачу. Это подтверждает быстрый рост температуры, с которой жидкость поступает в камеру аппарата ( $d_{в0} = 0,5$  кг/кг).

## ВЫВОДЫ.

Анализ результатов расчета теплообмена в вихревой тарелке также показывает, что определяющая роль принадлежит процессам конденсации реализующимся на внутренней поверхности формирующихся пузырей.

На эффективность теплопередачи оказывают существенное влияние массообменные процессы, протекающие при повышенном влагосодержании, при этом определяющая роль принадлежит процессам конденсации, которые происходят на внутренней поверхности формирующихся пузырей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 556819 (СССР). Контактная тарелка для массообменного аппарата. / Дронин В.Н., Соловьев Н.А., Богданов М.Х., Замалиева Р.Г.. Оpubл. в Б.И. , 1977, №17.
2. А.с. 1018664 (СССР). Провальная тарелка для массообменных колон. / Левш И.П., Левш В.И., Умаров С.С., Убайдуллаев А.К., Умаров С.У. Оpubл. в Б.И. , 1983, №19.
3. А.с. 559713 (СССР). Щелевая тарелка. / Беспалов А.В., Кулешов О.Г., Терехов Н.И. Оpubл. в Б.И. , 1977, №20.
4. А.с. 1247033 (СССР). Тарелка для теплообменных аппаратов. / Лахтанов С.А., Протасов С.К., Шишло Б.М., Турунцева Г.В., Шибутвич М.И. Оpubл. в Б.И. , 1986, №28.
5. А.с. 921588 (СССР). Теплообменная тарелка. / Вайтехович П.Е., Левданский Э.И., Плехов И.М., Бабкин В.В., Киреев Н.И. Оpubл. в Б.И. , 1982, №15.

## АНАЛИЗ В И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ В КОНТАКТНЫХ

6. А.с. 175921 (СССР). Вихревая ректификационная тарелка. / Мановян А.К. Опул. в Б.И., 1965, №21.
7. Пат. 3615 Україна, МПК 7 В01D3/22. Вихрова тарілка для тепломасообмінних апаратів / Афтанюк В.В., Спинов В.М.; заявл. 30.12. 2003; опубл. 15.12.2004, Бюл. №12.
8. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. -М.: Мир, 1971. - 536с.
9. Оран Э, Борис Д., 1990. Численное моделирование реагирующих потоков. - М.: Мир. - 660.
10. Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н., 2012. Тепломассообменный аппарат с комбинированной схемой взаимодействия потоков газа и жидкости в системах обратного водоснабжения / Вестник Казанского технологического университета. - т.15, 146-149.
11. Щукин В.К., Халатов А.А., 1982. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. - М.: Машиностроение. - 200.
12. Романков П.Г., Рашковская Н.Б., Фролов В.Ф., 1975. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия. – 333.
13. Saliev E., Nikolenko I., 2012. The feasibility report on maintainability of the water and sewage system// MOTROL – Vol.14, №5, 119 – 124.
14. Шибанин В. С., Богза В.Г., Богданов С.И., 2012. Расчет вероятности отказов конструктивного элемента сборно-разборных легких металлических конструкций // MOTROL. - Vol. 14, №2, 164 - 167.

### ANALYSIS AND SIMULATION OF HEAT EXCHANGE DEVICES IN THE CONTACT DEVICES.

**Summary.** The analysis of the devices for the intensification of heat and mass transfer in contact devices. Improved mathematical model for the conditions of heat and mass transfer in a foam apparatus with vortex plate. Calculated heat transfer coefficients, and compares them with the heat transfer characteristics of the traditional plate.

**Key words:** contactors, heat and mass transfer, eddy currents, tabulators, energy efficiency.

