

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПАДАЮЩИХ КАПЕЛЬ В СТРУЙНО-БАРБОТАЖНОМ КОНТАКТНОМ УСТРОЙСТВЕ

А.В. ДМИТРИЕВ*, И.Н. МАДЫШЕВ**

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

**Нижекамский химико-технологический институт (филиал) «КНИТУ»
г. Нижнекамск

Предложено струйно-барботажное контактное устройство для массообменных аппаратов. Отличительной особенностью струйно-барботажных контактных устройств является организация оригинального взаимодействия между газом и жидкостью, позволяющая интенсифицировать массообменные процессы при относительно простом аппаратном оформлении. Представлены результаты исследования по определению среднего значения числа Рейнольдса для падающих капель.

Ключевые слова: энергоэффективность, контактное устройство, массообмен.

Введение

В настоящее время проблема повышения энергоэффективности является одной из наиболее актуальных задач для обеспечения устойчивого инновационного развития экономики России. Согласно статистическим данным Международного экономического агентства (*International Energy Agency, IEA*), главным потребителем энергии в Российской экономике является промышленный сектор [1]. Сравнение России с другими странами по показателю энергоемкости предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) показывает огромные резервы повышения эффективности использования энергии. Энергоемкость химических, нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих производств существенно превосходит аналогичные показатели развитых стран (в основном на 20–60 % [2]). В связи с этим снижение энергоемкости промышленных установок предприятий ТЭК является актуальной задачей, решение которой позволит повысить степень энергетической безопасности страны, повысить конкурентоспособность отечественных предприятий и снизить негативное воздействие на окружающую среду [3].

Одним из наиболее эффективных способов энергосбережения является модернизация существующих массообменных аппаратов, которая заключается в использовании современных высокоэффективных контактных устройств. В настоящее время в колонных аппаратах с газо-(паро) жидкостными средами используются контактные устройства как зарубежных, так и отечественных фирм [4–6]. Однако многие конструкции малоэффективны с точки зрения достижения высокой интенсификации массообменных процессов при минимальных затратах энергии. В связи с этим необходима разработка новых устройств для контакта газа и жидкости, способных обеспечить наиболее эффективные и интенсивные гидродинамические режимы с минимальным гидравлическим сопротивлением.

Примером такой конструкции может быть струйно-барботажное контактное устройство для массообменных аппаратов [7], показанное на рис. 1. Предлагаемое контактное устройство состоит из сливных стаканов 1, имеющих вертикальные стенки, необходимые для поддержания уровня жидкости внутри них. Стаканы 1 в каждом ряду

соединены между собой с помощью стержней 2, открыты с верхнего своего конца, а нижний конец (днище) снабжен некоторым множеством отверстий 3, необходимых для слива жидкости на расположенный ниже сливной стакан 1. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в предлагаемом струйно-барботажном контактном устройстве показана на рис. 2.

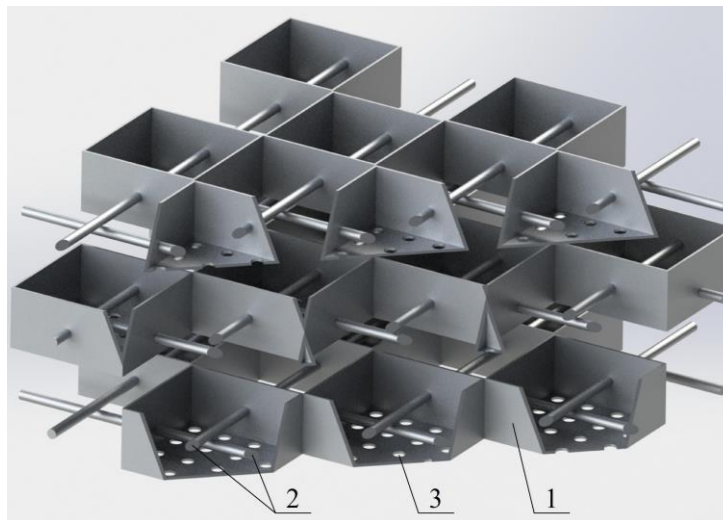


Рис. 1. Струйно-барботажное контактное устройство: 1 – сливной стакан; 2 – стержень; 3 – отверстия

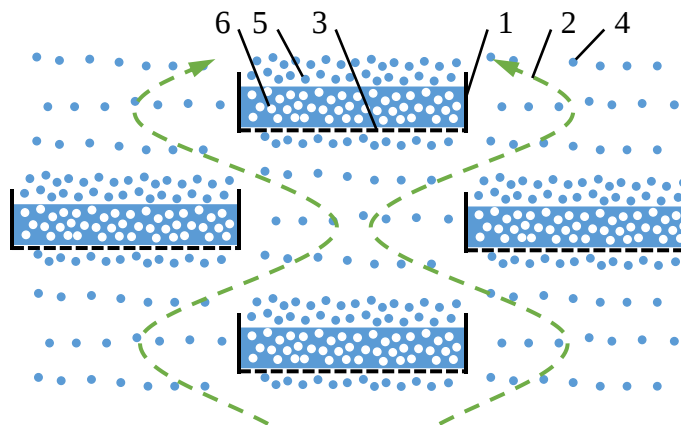


Рис. 2. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в струйно-барботажном контактном устройстве: 1 – сливной стакан; 2 – поток газа; 3 – перфорированное днище; 4 – капли, образованные перфорированным устройством; 5 – капли, вылетающие из жидкости; 6 – пузыри

Разработанное авторами настоящей статьи струйно-барботажное контактное устройство работает следующим образом. Жидкость через множество отверстий 3, выполненных в днище сливных стаканов 1, диспергируется в виде струй на расположенный ниже сливной стакан 1. При этом в указанных сливных стаканах 1 поддерживается уровень жидкости за счет наличия вертикальных стенок сливных стаканов. Сливные стаканы 1 располагаются горизонтально в шахматном порядке, образуя тарелку. Причем нижерасположенная тарелка имеет смещение стаканов, формируя шахматное их расположение по вертикали. По этой причине газ, поступающий снизу под тарелку, приобретает зигзагообразный характер движения (рис. 2).

При движении струй жидкости происходит их распад с образованием множества капель. Последние, ударяясь о поверхность жидкости, находящейся внутри стаканов 1, разлетаются в разные стороны брызгами. Таким образом создается развитая постоянно обновляющаяся поверхность контакта фаз, которая определяется наличием относительно небольших газовых пузырей в слое жидкости и вылетающих капель с поверхности. Кроме того, восходящий поток газа контактирует с падающими струями или каплями жидкости, при этом образуется вторая зона контакта газа и жидкости. Принимая расстояние между сливными стаканами на одном уровне, равным ширине сливного стакана, обеспечивается равнопроточность для прохода газа, что приводит к снижению гидравлического сопротивления предлагаемого струйно-барботажного контактного устройства. Для обеспечения максимальной эффективности массообменных процессов сливные стаканы в поперечном сечении имеют форму квадрата. Таким образом, организация оригинального взаимодействия между газом и жидкостью позволяет интенсифицировать массообменные процессы как в жидкой, так и в газовой фазах при относительно простом аппаратном оформлении.

Методика исследования

Расчет гидродинамики и массообмена в предложенной конструкции контактных устройств осложнен разнообразием форм контакта фаз, сложностью учета распада струй на капли и необходимостью учета интенсификации массообмена падением капель на поверхность жидкости. Капли, образующиеся при распаде струи, вовлекаются в нестационарное обтекание потоком газа, который меняет свое направление на протяжении всего полета капель. Кроме того, число Рейнольдса зависит от расположения отверстий в контактных элементах, формирующих струи. Поэтому для инженерных или оценочных расчетов необходимо определение среднего значения числа Рейнольдса для падающих капель. Для этого в программном комплексе *ANSYS Fluent* моделировалось взаимодействие потоков жидкости и газа на примере системы воздух–вода при температуре 20°C на контактных элементах разных размеров при различных скоростях газового потока, при этом диаметр капель изменялся от 1 до 3 мм.

Основные результаты

Результаты исследований показали, что среднее значение числа Рейнольдса для капель практически не зависит от ширины контактного элемента, а определяется только среднерасходной скоростью газового потока и диаметром капель.

Зависимость среднего значения числа Рейнольдса для капель можно описать линейной функцией:

$$Re_a = AW_{cp} + B,$$

где W_{cp} – среднерасходная скорость газа, м/с.

Коэффициенты A и B зависят от значений диаметров капель:

$$A = 30,49 \exp(0,4863a),$$

$$B = 111,45 \ln(a) + 37,506,$$

где a – диаметр капель, мм.

Среднеквадратичные отклонения значений A и B составили 0,98 и 1 соответственно.

Уравнение, позволяющее определить среднее значение числа Рейнольдса для капель, запишется в виде

$$A = 30,49 \exp(0,4863a)W_{cp} + 111,45 \ln(a) + 37,506. \quad (1)$$

Обсуждение результатов

На рис. 3 показаны зависимости изменения числа Рейнольдса для капель различных диаметров от среднерасходной скорости газа. Из этих рисунков видно, что с

увеличением среднерасходной скорости газа и диаметра капель средние значения чисел Рейнольдса также увеличиваются.

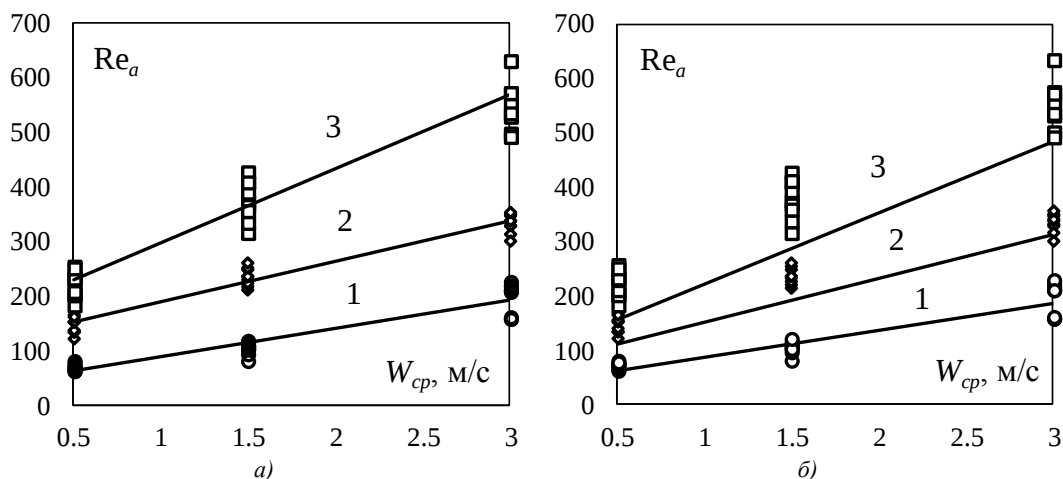


Рис. 3. Зависимость изменения числа Рейнольдса для капель от среднерасходной скорости газа при различных ее диаметрах a , мм: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3. а) экспериментальные значения и линии тренда; б) экспериментальные значения и расчетные значения по полученному уравнению (1)

На рис. 4 представлены погрешности значений числа Рейнольдса, рассчитанного по полученному уравнению (1). Анализируя представленный график, можно сделать вывод, что максимальные значения погрешностей расчета не превышают 40%, при этом большинство значений являются заниженными.

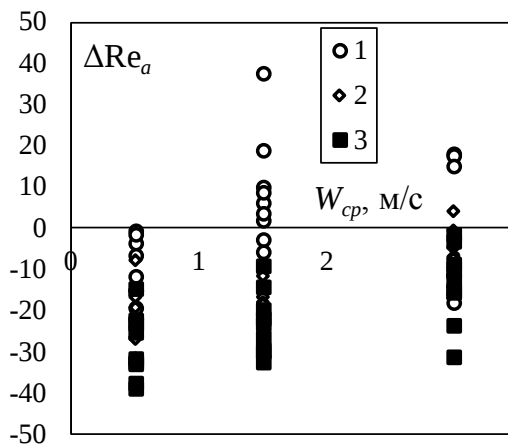


Рис. 4. Погрешности значений числа Рейнольдса, рассчитанного по полученному уравнению (1)

Выводы

1. Проведенные исследования гидродинамики падающих капель в струйно-барботажном контактном устройстве позволяют произвести оценку коэффициента массопередачи от капель жидкости к газовому потоку и определить соответствующий диффузионный поток.

2. Выполненные исследования показали, что использование струйно-барботажных контактных устройств позволит создавать энергосберегающие и энергоэффективные массообменные аппараты для проведения процессов ректификации

и абсорбции при сохранении соответствующего выхода и качества товарной продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8 (договор № 14.Z56.16.5215-МК от 14 марта 2016 г.).

Summary

Proposed is a jet-bubbling contact device for mass transfer apparatus. A distinctive feature of the jet-bubble contact devices is the original organization of interaction between the gas and the liquid, allows to intensify the mass transfer processes in a relatively simple hardware design. The results of the study to determine the average value of the Reynolds number for the falling drops.

Keywords: energy efficiency, contact device, mass transfer.

Литература

1. Яковлев А.С., Барышева Г.А. Энергоэффективность и энергосбережение в России на фоне опыта зарубежных стран // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 6. С. 25-30.
2. Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей. Казань: Издательство «ФЭН», 2004. 307 с.
3. Галеева А.Р., Газизова О.В. Энергоэффективность – основа устойчивого развития экономики страны // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 8. С. 372-376.
4. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
5. Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я. Влияние типа контактного устройства колонного оборудования на гидравлическое сопротивление насадочного слоя // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 3. С. 12-13.
6. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменников установок в нефтехимии. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 574 с.
7. Пат. № 156379 РФ, МПК В01Д 3/20. Струйно-барботажное контактное устройство для теплообменных процессов / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев, Г.С. Сагдеева, А.Н. Николаев; заявитель и патентообладатель И.Н. Мадышев, А.В. Дмитриев. № 2015119123/05; заявл. 30.04.2015; опубл. 10.11.2015 // Изобретения. Полезные модели. 2015. Бюл. № 31.

Поступила в редакцию

21 января 2016 г.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(904)6631696. E-mail: ieremiada@gmail.com.

Мадышев Ильнур Наилович – аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Нижнекамского химико-технологического института (филиала) Казанского национального исследовательского технологического университета. Тел.: 8(987)2686235. E-mail: ilnur_91@mail.ru.