

И. Н. Мадышев, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриев

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ БАРБОТАЖНО-ПЛЕНОЧНОГО АППАРАТА

Ключевые слова: давление, пленка, барботаж.

В статье предложен барботажно-пленочный аппарат и представлены результаты изменения давления жидкости от разных параметров. Показано, что барботирование обеспечивает высокую удельную поверхность контакта между газом и жидкостью, примерно постоянный размер газовых пузырьков, высокую скорость процесса тепло- и массопередачи.

Keywords: pressure, film, barbotage.

This paper proposes a bubble-film device and the results of changes of fluid pressure on various parameters. It is shown that bubble flow provides the high specific interphase between gas and liquid, approximately permanent gas-bubble size, and high heat and mass transfer rates.

Аппараты для осуществления химических реакций и межфазных взаимодействий в системе газ-жидкость широко используются в химической и нефтехимической отраслях промышленности. Для осуществления прямого контакта между газом и жидкостью, как правило, используются барботажные аппараты. К их недостаткам следует отнести сравнительно низкую интенсивность тепломассопереноса и постепенное возрастание аэродинамического сопротивления барботеров в результате засорения и зарастания мелких отверстий. Кроме того, для барботажных систем необходимы дорогие и достаточно сложные в обслуживании газовые или компрессорные машины [1].

Стоит отметить, что скорость движения газа без уноса барботируемой жидкости не может превышать 1-2 м/с, а также при движении пузырьков газа в жидкости происходит их быстрое слияние, что ведет к увеличению гидравлического сопротивления и снижению тепло- и массообмена. Высота современных барботажных аппаратов достаточно большая, а само оборудование весьма металлоемкое. Дальнейшее повышение производительности барботажных аппаратов требует принципиально нового подхода к организации контакта между газом и жидкостью [2]. Вопросам интенсификации процесса тепломассообмена и уменьшения капитальных затрат при разработке новых высокоэффективных контактных аппаратов посвящены работы [3-6].

Одним из перспективных методов, по мнению авторов статьи, является использование барботажно-пленочных аппаратов с регулируемым временем контакта фаз, которая позволяет сократить капельный унос жидкости при сохранении существующей скорости движения газа и интенсифицировать процессы переноса теплоты и массы.

Контактное устройство для тепломассообменных процессов с регулируемым временем контакта фаз (рис. 1) представляет собой прямоугольный корпус 1, который снабжен патрубками для подвода 6 и отвода 7 жидкости и патрубками для подвода 8 и отвода 9 газа. Внутри корпуса на горизонтальном валу 2 установлен цилиндрический вращающийся барабан 3 с торцевыми крышками 4, поверхность которых приводят во вращение с помощью внешнего привода, причем в

торцевых крышках выполнены трапецеидальные отверстия для прохода контактирующих фаз. Кроме того, на внутренней поверхности сплошного барабана установлены V-образные лопатки 5, длина которых равна длине образующей цилиндра. Схема экспериментальной установки представлена в работе [7].

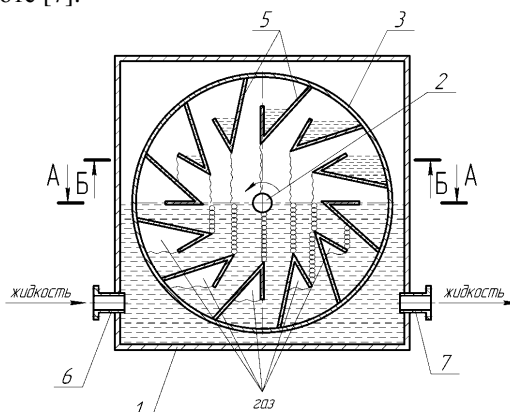


Рис. 1 – Контактное устройство для тепломассообменных процессов с регулируемым временем контакта фаз (вид сбоку): 1 – корпус; 2 – вал; 3 – цилиндрический барабан; 4 – торцевые крышки; 5 – лопатки; 6 – патрубок подвода жидкости; 7 – патрубок отвода жидкости; 8 – патрубок подвода газа; 9 – патрубок отвода газа.

Жидкость, поступающая в корпус, заполняет внутреннюю полость барабана, так, чтобы он был наполовину погружен в жидкость. Поток газа, поступающий в контактное устройство, заполняет верхнюю часть барабана. Установленные лопатки, вращаясь вместе с барабаном, захватывают газ определенного объема. Газ, находящийся внутри лопаток, которые ограничены торцевыми крышками, при дальнейшем вращении барабана погружается в слой жидкости, где происходит барботаж вытесненного объема газа через слой жидкости в виде пузырьков. При дальнейшем вращении барабана, объем газа в лопатках постепенно уменьшается до тех пор, пока объем газа не станет равным нулю. Затем лопатки захватывают определенный объем жидкости и при вращении барабана, объем жидкости, находящийся внутри лопаток также уменьшается, т.е. жидкость стекает в

виде пленки на поверхность раздела.

Важным этапом проектирования контактных устройств с регулируемым временем контакта фаз является определение оптимальных геометрических размеров аппарата для достижения максимальной эффективности работы контактного устройства [8]. Одним из факторов, определяющих эффективность работы барботажного контактного устройства, является необходимость преодоления газом гидростатического давления столба жидкости. Поэтому целью проводимых численных исследований является определение рабочей зоны барботажа.

Объем газа, захватываемый одной лопаткой можно определить из выражения:

$$V_1 = RH \left(\frac{\pi R}{n} - \frac{R_1}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{n} \right) \right) \quad (1)$$

где R – радиус барабана, м; H – ширина барабана, м; R_1 – расстояние от оси барабана до угла лопатки, м; n – количество лопаток.

Предельный угол поворота лопатки γ_{pr} можно определить по выражению:

$$\gamma_{pr} = \arctg \left(\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{n} \right)}{\cos \left(\frac{2\pi}{n} \right) - \frac{b + R_1}{R}} \right) \quad (2)$$

где b – вылет лопатки, м.

Если угол поворота лопатки γ меньше предельного, т.е. $\gamma < \gamma_{pr}$, то вытесненный объем газа можно определить по формуле:

$$V_2 = \frac{R^2 H}{2} \left(\alpha - \frac{R_1 + b}{R} \sin \alpha \right), \quad (3)$$

где $\alpha = \gamma - \arctg \left(\sqrt{\left(\frac{R}{x} \right)^2 - 1} \right);$

$$x = \sqrt{R^2 - (R_1 + b)^2 \sin^2 \gamma}, \text{ м.}$$

Если угол поворота лопатки γ больше или равен предельному, т.е. $\gamma \geq \gamma_{pr}$, то вытесненный объем газа можно определить по формуле:

$$V_2 = V_1 + \frac{b^2 H \sin \gamma \sin \beta}{2 \sin(\beta - \gamma)}, \quad (4)$$

где $\beta = \arctg \left(\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{n} \right)}{\cos \left(\frac{2\pi}{n} \right) - \frac{R_1}{R}} \right).$

Принимая, что изменение температуры газа при повороте лопатки на угол γ пренебрежимо мало, можно предположить, что объем газа, находящегося внутри лопаток изменяется обратно пропорционально его давлению. Исходя из этого, изменение давления в лопатках можно оценить из выражения:

$$\frac{P_2}{P_0} = \frac{V_1}{V_1 - V_2}, \quad (5)$$

где P_2 – давление в лопатке при его повороте на угол γ , Па; P_0 – давление газа внутри барабана, Па.

Принимая, что циркуляция жидкости, находящаяся внутри барабана незначительна, давление жидкости при погружении лопатки на угол γ можно

определить из выражения:

$$P_1 = P_0 + \rho g (R_1 + b) \sin \gamma, \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для удобства сравнения давлений P_1 и P_2 разделим выражение (6) на P_0 :

$$\frac{P_1}{P_0} = 1 + \frac{\rho g}{P_0} (R_1 + b) \sin \gamma. \quad (7)$$

Оценочные расчеты проводились для системы воздух – вода при температуре 20°C, при различных геометрических параметрах контактного устройства. Из выражений (5) и (7) можно сделать вывод, что на величину давлений P_1 и P_2 влияют не только физические свойства взаимодействующих фаз, но и особенности конструктивного исполнения контактного устройства.

При построении графиков размерные физические величины P_1 и P_2 были приведены к безразмерному виду с помощью давления газа внутри барабана P_0 .

Увеличение радиуса барабана при сохранении таких геометрических характеристик, как количество лопаток, расстояния от оси барабана до угла лопатки и вылета лопатки приводит к увеличению объема захватываемого газа. Поэтому при повороте лопатки давление газа, находящегося внутри лопатки P_2 для барабана радиусом 100 мм существенно меньше, чем для барабана с радиусом 300 и 500 мм соответственно, при этом давление жидкости P_1 не зависит от радиуса барабана.

При увеличении количества лопаток барабана происходит увеличение давления газа, находящегося внутри лопатки P_2 , при этом давление жидкости P_1 остается постоянным вне зависимости от количества лопаток (рис. 2).

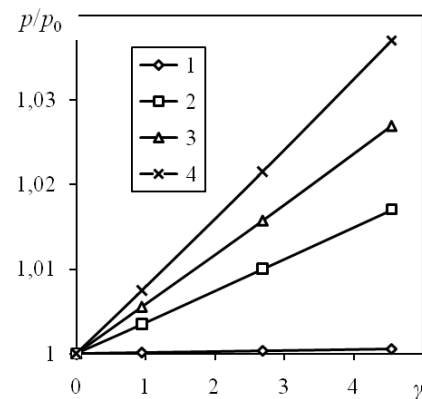


Рис. 2 – Изменение давлений жидкости P_1 и газа P_2 в зависимости от угла поворота лопатки γ при $R = 0,1$ м; $R_1 = 0,05$ м; $b = 0,02$ м: 1 – давление жидкости P_1 при $n = 8, 12, 16$; 2 – давление газа P_2 при $n = 8$; 3 – давление газа P_2 при $n = 12$; 4 – давление газа P_2 при $n = 16$

Уменьшение расстояния от оси барабана до угла лопатки при сохранении радиуса барабана, количества лопаток и вылета лопатки приводит к увеличению давления газа, находящегося внутри лопатки P_2 . Это объясняется тем, что при уменьшении расстояния от оси барабана до угла

лопатки увеличивается объем захватываемого газа, однако чрезмерное уменьшение расстояния от оси барабана до угла лопатки может привести к снижению эффективности процесса. При увеличении расстояния от оси барабана до угла лопатки происходит небольшое увеличение давления жидкости P_1 (рис. 3).

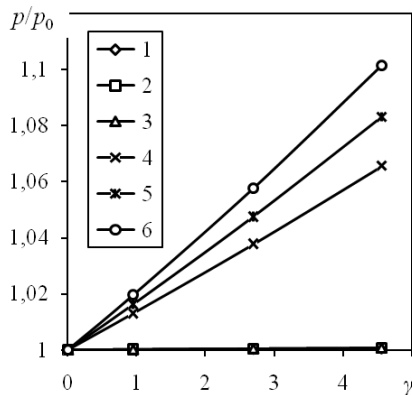


Рис. 3 – Изменение давлений жидкости P_1 и газа P_2 в зависимости от угла поворота лопатки γ при $R = 0,2$ м; $n = 12$; $b = 0,02$ м: 1 – давление жидкости P_1 при $R_1 = 0,04$ м; 2 – давление жидкости P_1 при $R_1 = 0,06$ м; 3 – давление жидкости P_1 при $R_1 = 0,08$ м; 4 – давление газа P_2 при $R_1 = 0,08$ м; 5 – давление газа P_2 при $R_1 = 0,06$ м; 6 – давление газа P_2 при $R_1 = 0,04$ м

Уменьшение вылета лопатки при сохранении радиуса барабана, количества лопаток и расстояния от оси барабана до угла лопатки приводит к увеличению давления газа, находящегося внутри лопатки P_2 . При увеличении вылета лопатки происходит небольшое увеличение давления жидкости P_1 (рис. 4).

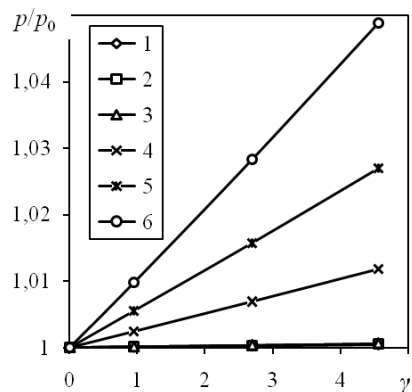


Рис. 4 – Изменение давлений жидкости P_1 и газа P_2 в зависимости от угла поворота лопатки γ при $R = 0,1$ м; $n = 12$; $R_1 = 0,05$ м: 1 – давление жидкости P_1 при $b = 0,01$ м; 2 – давление жидкости P_1 при $b = 0,02$ м; 3 – давление жидкости P_1 при $b = 0,03$ м; 4 – давление газа P_2 при $b = 0,03$ м; 5 – давление газа P_2 при $b = 0,02$ м; 6 – давление газа P_2 при $b = 0,01$ м.

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что при вращении барабана происходит увеличение давления газа, находящегося внутри лопатки, вследствие уменьшения объема, при этом давление газа, находящегося внутри лопатки P_2 при различных конструктивных исполнениях контактного устройства всегда больше давления жидкости P_1 . Следовательно, газ, находящийся внутри лопаток при малейшем погружении в жидкость начинает барботировать через слой жидкости в виде пузырьков.

Таким образом, контактное устройство для тепломассообменных процессов с регулируемым временем контакта фаз обладает максимальной рабочей зоной барботаж, что позволяет проводить тепломассообменные процессы с достаточно высокой эффективностью.

Литература

1. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 1. АНО НПО «Профессионал», Санкт-Петербург, 2004. 848 с.
2. И.И. Борисов, А.А. Халатов, *Доповіді Національної академії наук України*, 3, 84-89 (2008)
3. Deify Law, Francice Battaglia, Theodore J. Heindel, *Chemical Engineering Science*, 63, 18, 4605-4616 (2008)
4. Z.W. Gan, S.C.M. Yu, A.W.K. Law, *Chemical Engineering Science*, 66, 21, 5338-5356 (2011)
5. S.C.P. Cheung, L. Deju, G.H. Yeoh, J.Y. Tu, *Nuclear Engineering and Design*, 265, 120-136 (2013)
6. Rahman S. Abdulmohsin, Balasim A. Abid, Muthanna H. Al-Dahhan, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1, 78-84 (2011)
7. И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 23, 159-161 (2013)
8. О.С. Макушева, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев, *Вестник Казанского технологического университета*, 13, 10, 648-649 (2010)