УДК 62-94

Теоретическое описание величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже

Кисс В.В. vvkiss@yandex.ru
Университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В настоящее время аппараты барботажного типа находят достаточно широкое применение для проведения тепло- и массообменных процессов в различных отраслях промышленности, в частности пищевой. Одним из представителей аппаратов данного типа является циклонно-пенный аппарат (ЦПА), в котором реализуется режим, так называемой, динамической пены. Для проведения расчетов этих аппаратов необходимо знание величины поверхности контакта фаз. В работе приведено теоретическое описание величины поверхности контакта фаз, образующейся в режиме динамической пены.

Ключевые слова: контакт фаз, поверхность, барботаж, пена.

Theoretical description of the value to surfaces of the contact of the phases under intensive mixing

Kiss V.V. vvkiss@yandex.ru
University ITMO
Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

At present, the devices mixing type find it is enough broad using for undertaking heat- and weight processes in different branch of industry, in particular food. One of the representatives device given type is Cyclone -foamy device (CPA), in which is realized mode, so named, dynamic spume. For undertaking calculation these device necessary knowledge values to surfaces of the contact of the phases. In work is brought theoretical description of the value to surfaces of the contact of the phases, forming in mode dynamic spume.

The Keywords: contact of the phases, surface, mixing, spume.

Анализ фотографий слоя динамической пены в циклонно-пенном аппарате и визуальные наблюдения показали, что при скоростях газа до 6 м/с газ распределен в жидкости и инверсии фаз не наступает. Пенный слой, в основном, образуется газовыми пузырями с небольшой дисперсией по размерам, количество крупных газовых включений (каверн) не велико. Это говорит о высокой однородности газо-жидкостного слоя, что позволяет сделать следующее допущение: поверхность контакта фаз в циклонно-пенном аппарате образована газовыми пузырями, характеризуемыми средним поверхностно-объемным диаметром d. В виду отсутствия на входе газа в жидкость раздающей решетки, в аппарате процесс формирования и разрушения газовых пузырей и структура пенного слоя целиком определяются закономерностями турбулентного движения среды в рабочей зоне аппарата.

При скоростях газа, реализуемых в циклонно-пенном аппа-

рате, турбулентность потока быстро становится изотропной, т.е. энергия потока равномерно распределяется по объему жидкости и плотность ее распределения (диссипация энергии) равна ε Вт/кг.

Разрушение газовых пузырей в потоке может происходить лишь под действием турбулентных пульсаций, имеющих масштаб λ порядка диаметра пузыря или менее.

Поскольку наибольшей энергией из этих пульсаций обладают пульсации порядка d , то можно считать, что именно они определяют процесс дробления в условиях относительно низкого газосодержания φ (малой стесненности движения пузырей).

Крупномасштабные пульсации (с масштабом порядка размера зоны смешения) не могут дробить пузыри в потоке, перенося их как единое целое.

Необходимо заметить, что граница раздела фаз препятствует развитию турбулентных пульсаций подобно твердой стенке и при достижении газосодержанием некоторого граничного значения $\varphi_г = \varphi_{гр}$, стесненность потока становится столь высокой, что пульсации размером порядка диаметра пузыря уже не могут развиваться и разрушение пузырей будет происходить только под действием более мелких, а значит и обладающих меньшей энергией пульсаций.

С этого момента масштаб турбулентных пульсаций зависит
от средней толщины слоя жидкости, окружающей пузырь.

Предположим, что каждый пузырь окружен сферическим слоем жидкости. Число газовых пузырей в единице объема:

$$n = \frac{6\varphi_г}{\pi\, \mathrm{d}^3} \tag{1.1}$$

Отсюда объем потока, приходящийся на I пузырь вместе с окружающей его жидкостью:

$$\Omega = \frac{1}{n} = \frac{\pi d^3}{6\varphi_Г} \tag{1.2}$$

Диаметр сферы, заключающей в себе газовый пузырь и жидкость:

$$D = \frac{d}{\sqrt[3]{\varphi_Г}} \tag{1.3}$$

Таким образом, толщина слоя жидкости, окружающей пузырь:

$$\delta = \frac{1}{2} d\left(\frac{1}{\sqrt[3]{\varphi_Г}} - 1\right) \tag{1.4}$$

При газосодержании слоя меньше граничного ($\varphi_г < \varphi_{г\,р}$) принимаем, что λ_1=d. При $\varphi_г > \varphi_{гр}$ масштаб турбулентных пульсаций определится выражением:

$$\lambda_2 = k_1 d\left(\frac{1}{\sqrt[3]{\varphi_Г}} - 1\right) \tag{1.5}$$

где k_1 - коэффициент пропорциональности.

Таким образом, при достижении некоторого граничного значения газосодержания $\varphi_{гр}$, происходит смена масштабов турбулентных пульсаций, обуславливающих разрушение пузырей и, начиная с этого момента, средний размер пузыря оказывается зависящим от газосодержания.

В общем виде можно записать:

$$\lambda = d \qquad \text{при } \varphi_г < \varphi_{гр} \qquad (1.6)$$

$$\lambda = k_1 d\left(\frac{1}{\sqrt[3]{\varphi_Г}} - 1\right) \qquad \text{при } \varphi_г > \varphi_{гр} \qquad (1.7)$$

При переходе пульсаций от большего масштаба к меньшему должен наблюдаться рост среднего диаметра пузыря и снижение удельной поверхности контакта фаз. Можно допустить, что значение $\varphi_{гр}$ должно соответствовать режиму наиболее плотной упаковки газожидкостного слоя.

Теоретический анализ, проведенный Аксельродом и Дильманом при исследовании барботажа через группу отверстий, показал, что наиболее плотное заполнение барботажного слоя сферическими пузырями (максимальная поверхность контакта фаз) наблюдается при значении газосодержания $\varphi_{гр} = 0{,}74$.

Используя этот результат и учитывая, что в момент смены масштабов $\lambda_1=\lambda_2$ можно определить коэффициент пропорциональности k_1:

$$k_1 = \frac{1}{\varphi_{ГР}^{-1/3} - 1} = \frac{1}{0{,}105} \qquad (1.8)$$

При этом выражения 1.6 и 1.7 можно представить в виде:

$$\lambda = xd \qquad (1.9)$$

где:

$$x = 1 \qquad \text{при } \varphi_г < \varphi_{гр} \qquad (1.10)$$

$$x = \frac{\varphi_Г^{-1/3} - 1}{0{,}105} \qquad \text{при } \varphi_г > \varphi_{гр} \qquad (1.11)$$

Скорость турбулентных пульсаций в потоке зависит только от энергии, диссипированной в среде и масштаба пульсаций /123/:

$$w_n \sim (\varepsilon\lambda)^{1/3} \qquad (1.12)$$

Если турбулентная пульсация имеет масштаб А , то масса жидкости, вовлеченная ею в движение, пропорциональна λ^3 :

$$m \sim \lambda^3 \rho_ж \qquad (1.13)$$

Ускорение, с которым движется турбулентный вихрь, согласно теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова:

$$a \sim \varepsilon^{2/3} \lambda^{-1/3} \qquad (1.14)$$

Отсюда сила, с которой турбулентные пульсации действуют на пузырь, пропорциональна величине F:

$$F \sim \varepsilon^{2/3} \lambda^{8/3} \rho_ж \qquad (1.15)$$

В рабочей зоне циклонно-пенного аппарата процессы дробления и слияния газовых пузырей обусловлены только действием турбулентных пульсаций и сил поверхностного натяжения. Очевидно, при этих условиях средний диаметр пузыря может быть найден из равновесия сил поверхностного натяжения на границе раздела фаз и касательных сил, обусловленных турбулентными пульсациями.

Будем полагать, что касательные силы, возникающие на поверхности пузыря от действия турбулентных пульсаций, пропорциональны силам, выражаемым соотношением 1.15. Для наибольшего диаметра пузыря, не подверженного разрушению, эти силы должны быть уравновешены силами поверхностного натяжения:

$$\pi d\sigma \sim \varepsilon^{2/3}\lambda^{8/3}\rho_{ж} \qquad (1.16)$$

Подставляя соотношения 1.9 – 1.11 в 1.16 и вводя коэффициент пропорциональности С , имеем:

$$d = c\left(\frac{\sigma}{\rho_{ж}}\right)^{0,6}\varepsilon^{-0,4}x^{-1.6} \qquad (1.17)$$

Диссипация энергии ε может быть определена на основе следующих положений.

Работа, совершаемая в единицу времени при прохождении газа через слой динамической пены, равна:

$$N = \Delta P \cdot V_{Г} \qquad (1.18)$$

где Vг - расход газа, $м^3/с$; ΔP - сопротивление слоя, Па.

Сопротивление пенного слоя можно приближенно принять равным статическому давлению жидкости, содержащейся в рабочей зоне аппарата:

$$\Delta P = g\rho_{ж}h_0 \qquad (1.19)$$

где h_0 – высота слоя светлой жидкости, м

Отсюда диссипация энергии равна:

$$\varepsilon = \frac{N}{h_0 f \rho_{ж}} = g w_{Г} \qquad (1.20)$$

где f –сечение рабочей зоны аппарата, $м^2$;

$w_г$ – скорость газа, м/с

Величина удельной поверхности контакта фаз, отнесенная к единице объема пенного слоя, связана со средним диаметром пузырей и газосодержанием зависимостью:

$$A = \frac{6\varphi_{Г}}{d} \qquad (1.21)$$

Отсюда на основании выражения 1.17 получим уравнение для определения удельной поверхности контакта фаз в режиме развитой турбулентности, реализуемой в циклонно-пенном аппарате:

$$A = c_1\varphi_{Г}\left(\frac{\sigma}{\rho_{ж}}\right)^{-0,6}\varepsilon^{0,4}x^{1.6} \qquad (1.22)$$

где:

$$x = 1 \qquad \text{при} \quad \varphi_г < \varphi_{гр}$$

$$x = \frac{\varphi_{Г}^{-1/3} - 1}{0,105} \qquad \text{при} \quad \varphi_г > \varphi_{гр}$$

c_1 - постоянный коэффициент, определяемый на основании обработки экспериментальных данных и учитывающий полидисперсность газовых пузырей.

Анализ полученного выражения показывает, что при постоянном значении высоты слоя светлой жидкости h_0 величина удельной поверхности контакта фаз с ростом скорости газа сначала увеличивается вплоть до достижения граничного значения газосодержания. Увеличение межфазной поверхности происходит в результате уменьшения среднего поверхностно-объемного диаметра газовых пузырей. В момент достижения граничного газосодержания из-за стесненности потоков происходит смена масштаба турбулентных пульсаций, вызывающих разрушение пузырей в слое. Масштаб пульсаций становится зависимым от газосодержания и с увеличением последнего уменьшается. Это обстоятельство, в свою очередь, приводит к росту среднего диаметра газовых пузырей и, соответственно, к уменьшению поверхности контакта фаз.

С увеличением высоты столба светлой жидкости h_0 при постоянном значении скорости газа $w_г$ происходит уменьшение газосодержания двухфазного слоя.

В области малой стесненности пузырей ($\varphi_г < \varphi_{гр}$) масштаб турбулентных пульсаций не зависит от газосодержания и, соответственно, от h_0.

При большой стесненности потока ($\varphi_г > \varphi_{гр}$) в результате уменьшения масштаба пульсаций происходит увеличение удельной поверхности контакта фаз.

Уменьшение поверхностного натяжения жидкости и увеличение её плотности приводит к уменьшению диаметра газовых пузырей и, соответственно, к росту величины удельной поверхности контакта фаз.

Литература:

1. Богатых С.А. Циклонно-пенные аппараты. Л., "Машиностроение", 1978, 223 с.
2. Рамм В.М. Абсорбция газов. М., "Химия", 1976, 655 с.
3. Позин М.С., Маркина Е.С. О влиянии физических свойств жидкости на образование подвижной пены. - ЖПХ, 1954, т.27, № II, С.II70-II83.
4. Азбель Д.С. Гидродинамика барботажных процессов. "Химическая промышленность", 1962, № II, с.854-857.

1. Bogatich S.A. Ciklonno-penni apparati. L., ‘Maschinostroenie’, 1978, 223 s.
2. Ramm V.M. Absorbzija gazov. M., ‘Himija’, 1976,655 s.
3. Pozin M.S.,Markina E.S. O vlijanii phisitcheskich svoistv gidkosti na obrazovanie podviznoi peni. – ZPH, 1954, t.27, № 11, s. 1170-1183.
4. Azbel D.S. Hidrodinamika Barbotaschni prozessov. ‘Himitcheskaja promischlennost”, 1962, № 11, s.854-857.