

УДК 66.021.3:532.529:532.55

К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ ЦЕНТРОБЕЖНО-БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТОВ

С.Г. ЗАВАРУХИН, Г.Г. КУВШИНОВ, М.А. КУЗНЕЦОВ, Н.П. СМИРНОВ

Институт катализа СО РАН

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Предлагается уточненная зависимость для расчета гидравлического сопротивления центробежно-барботажных аппаратов и представлены экспериментальные данные по сопротивлению аппаратов с различными завихрителями диаметром до 410 мм и высотой до 210 мм. Предложена процедура расчета газосодержания слоя, и даны рекомендации по выбору конусности завихрителя.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы центробежно-барботажных аппаратов (ЦБА) основан на барботаже газа сквозь вращающийся слой жидкости, удерживаемый газовой потоком в вихревой камере. За счет интенсификации тепломассообменных процессов в центробежном поле центробежно-барботажные аппараты характеризуются малыми габаритами и высокой эффективностью. Поэтому они все шире применяются в качестве абсорберов, мокрых газоочистителей, увлажнителей воздуха, контактных теплообменников и химических реакторов в различных отраслях промышленности. Наряду с эффективностью и компактными размерами одной из основных характеристик аппаратов является гидравлическое сопротивление. Вопросу сопротивления центробежно-барботажных аппаратов посвящен ряд работ [1 – 7]. На основе обобщения экспериментальных данных и проведения аналогии с пенными аппаратами получены эмпирические и полуэмпирические зависимости для расчета сопротивления аппаратов, описывающие экспериментальные данные с точностью ~20%. Однако большинство опытных данных было получено на аппаратах с габаритами завихрителей, далекими от реальных промышленных размеров: диаметр 200 – 300 мм, высота 30 – 120 мм. Поэтому естественно возникает вопрос, насколько применимы предложенные зависимости при увеличении размеров аппарата. Второй вопрос, который, возможно, связан с масштабным эффектом и трактуется неоднозначно, относится к зависимости сопротивления центробежно-барботажного слоя от его толщины.

Первые экспериментальные данные по зависимости сопротивления ЦБА от толщины слоя получены в аппарате с вращающимся корпусом без протока жидкости с завихрителем диаметром 200 мм, высотой 37 мм и относительным проходным сечением 0,045 [1]. Данные хорошо описывались зависимостью

$$\Delta p = C \rho_{ж} g_* \delta_0, \quad (1)$$

где $g_* = \frac{V_{сл}^2}{R}$.

Толщина светлого слоя жидкости в опытах изменялась от 2 до 24 мм. Учитывая, что $\delta_0 = (1 - \varphi)\delta$, а газосодержание изменялось в опытах в пределах 0,67 – 0,85, можно сделать вывод, что сопротивление слоя пропорционально его толщине.

Сопротивление ЦБА с неподвижным корпусом изучалось в [2 – 4], где проводились опыты с завихрителями с различными геометрическими характеристиками: диаметр 150 – 300 мм, высота 12 – 120 мм, относительное проходное сечение 0,04 – 0,18, угол конусности 0 и 12°. Толщина светлого слоя жидкости в непроточном по жидкости аппарате изменялась в пределах 2 – 20 мм, в проточном аппарате толщина газожидкостного слоя составляла 15 – 40 мм. На основании большого объема экспериментальных данных был сделан вывод, что, в отличие от аппаратов с вращающимся корпусом, сопротивление аппаратов с неподвижным корпусом практически не зависит от толщины газожидкостного слоя. С точностью 20 % данные по сопротивлению были обобщены в [4] зависимостью

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_r V_r^2} = 23 \left(\frac{sH}{R} \right)^{0,7}. \quad (2)$$

В работе [6] экспериментальные данные, полученные в [4], были обработаны в новых переменных. По аналогии с пенными аппаратами отдельно выделено сопротивление завихрителя, а сопротивление слоя представлено в таком же виде, как для аппаратов с вращающимся корпусом [1]. Экспериментальные данные с точностью 20 % обобщились зависимостью вида

$$Eu = A + B \frac{\rho_{ж}(1-\varphi)}{\rho_r} \frac{\delta}{R} \left(\frac{V_{сл}}{V_r} \right)^2, \quad (3)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты, зависящие от конусности завихрителя. Для цилиндрических завихрителей $A = 0,7$, $B = 0,5$, для конических, расширяющихся кверху, $A = 0,5$, $B = 0,6$. Скорость вращения слоя в [6] рекомендуется рассчитывать по эмпирической формуле [4]

$$\frac{V_{сл}}{V_r} = 1,9 \left(\frac{sH}{R} \right)^{0,7}. \quad (4)$$

Следует отметить, что согласно зависимости (3), в отличие от (2), сопротивление ЦБА уже прямо пропорционально толщине газожидкостного слоя.

В [7] изучалась гидродинамика ЦБА с неподвижным корпусом с оследующими размерами завихрителя: диаметр 180 мм, высота 29 мм, относительное проходное сечение 0,0265. Толщина слоя изменялась от 10 до 30 мм. Было установлено, что сопротивление ЦБА слабо зависит от толщины слоя, однако, в отличие от данных работы [4], скорость вращения слоя падала с увеличением его толщины.

Рассмотренные зависимости, как будет показано ниже, недостаточно хорошо обобщают экспериментальные данные, полученные на аппаратах большего размера. Можно предположить, что это связано с тем, что в соотношении (3) включена эмпирическая зависимость для скорости вращения слоя (4), найденная с использованием данных для ЦБА относительно небольших размеров. Кроме того, в зависимости (4) не учитывается влияние таких факторов, как толщина газожидкостного слоя, газосодержание, плотности жидкости и газа, угол наклона щелей завихрителя, особенности подачи жидкости в аппарат. Недостаток использования эмпирических зависимостей состоит в том,

что невозможно предсказать эффективность их применения в экспериментально непроверенном диапазоне параметров. С этой точки зрения представляется целесообразным вывод зависимостей для обработки экспериментальных данных базировать на более общих полуэмпирических моделях рассматриваемого процесса.

При увеличении размеров ЦБА на гидродинамике аппарата начинает сказываться поле тяжести, что проявляется в уменьшении толщины газожидкостного слоя в верхней части аппарата и может привести к проскоку газа через слой. Для компенсации этого эффекта применяются конические завихрители, эффективность которых зависит от правильного выбора угла конусности.

В данной работе предложены уточненные зависимости для расчета гидравлического сопротивления ЦБА, основанные на использовании полуэмпирического соотношения, полученного в [8] для скорости вращения центробежно-барботажного слоя, представлены экспериментальные данные по сопротивлению ЦБА в зависимости от толщины газожидкостного слоя в аппарате с коническими и цилиндрическими завихрителями диаметром до 410 мм и высотой до 210 мм. Дано сравнение полученных экспериментальных данных с имеющимися в литературе и предложенной зависимостями. Рассмотрены вопросы расчета газосодержания в ЦБА, выбора угла конусности конического завихрителя и путей учета влияния расхода жидкости при расчете сопротивления ЦБА.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема ЦБА показана на рис. 1. Аппарат представлял собой улиточный корпус, между верхней и нижней крышками которого размещался завихритель. Газ под давлением поступал через входной патрубок улитки размером 200×200 мм и выходил в свободное пространство через патрубок диаметром 250 мм в нижней крышке улитки. Подвод и отвод жидкости осуществлялся через кольцевые щели в верхней и нижней крышках соответственно. Опыты по влиянию толщины слоя на сопротивление ЦБА проводились на коническом завихрителе с фрезерованными щелями со следующими геометрическими характеристиками: $D_1 = 350$ мм, $D_2 = 410$ мм, $H = 210$ мм, $\beta = 8^\circ$, $s = 0,092$, $\theta = 70^\circ$. Толщина слоя регулировалась диаметром сливного кольца, который изменялся от 260 до 340 мм с шагом 20 мм, и определялась по соотношению $\delta = (D - D_n)/2$, где $D = (D_1 + D_2)/2$. Для некоторых фиксированных толщин слоя опыты проводились на других завихрителях, параметры которых и режимы экспериментов указаны в таблице. Эксперименты проводились на воде и в воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении. Сопротивление аппарата определялось как разница между статическим давлением во входном патрубке улитки и атмосферным давлением.

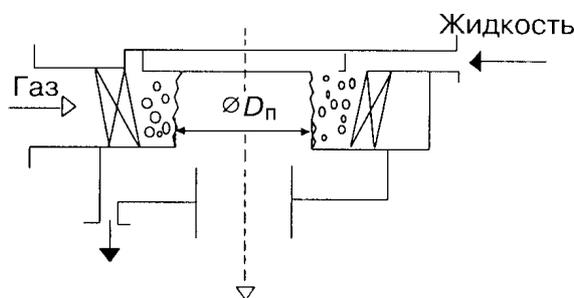


Рис. 1. Схема ЦБА.

Параметры завихрителей и режимы экспериментов

Вариант	D_1 , мм	D_2 , мм	H , мм	s	N	b , мм	δ , мм	Q_r , тыс м ³ /ч	λ , кг/кг
1	350	410	210	0,09	80	1,6	20–60	2,0–2,5	0,25–0,42
2	390	390	157,55	0,12	48	4	40–55	1,76–1,98	0,25–0,33
3	350	400	140	0,13	48	4	40	1,50	0,25
4	350	410	140	0,06	32	3	40	1,10	0,25
5	390	390	105	0,15	60	4	45	1,32–1,98	0,25
6	157	165	34	0,11	24	3	30	0,21	0,42

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведена размерная зависимость сопротивления ЦБА от толщины слоя при расходе газа 2 тыс. м³/ч и удельном расходе жидкости 0,42 кг/кг. Видно, что сопротивление ЦБА линейно возрастает при увеличении толщины слоя.

На рис. 3 в безразмерном виде показано сравнение экспериментальных данных с расчетными зависимостями (2) и (3). В расчетах принято $\rho_r = 1,2$ кг/м³, $\rho_{ж} = 10^3$ кг/м³. Газосодержание в (3), следуя работе [9], принято равным 0,7. Как видно из рис. 3, расчетные зависимости располагаются заметно выше экспериментальных данных, причем только зависимость (3) отражает рост Δp при увеличении δ .

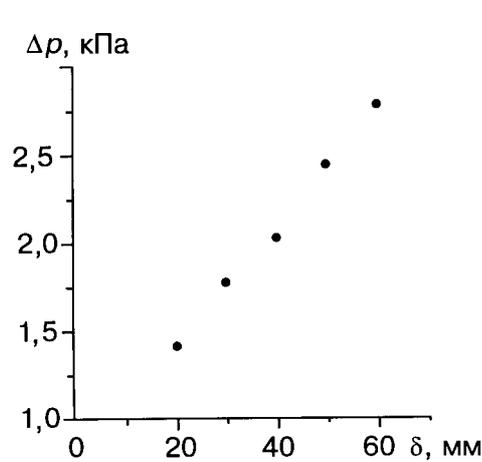
Ниже делается попытка получить выражение для расчета сопротивления ЦБА на основе более строгих зависимостей.

Учитывая, что скорость жидкости в слое слабо меняется вдоль радиуса [8] и вращающийся газожидкостный слой не плоский, а цилиндрический, перепад давления, обусловленный его “весом”, вычисляется как

$$\Delta p = \int_{R-\delta}^R (1-\varphi) \rho_c \frac{V_{\text{сл}}^2}{r} dr = (1-\varphi) \rho_{ж} V_{\text{сл}}^2 \ln \left(\frac{R}{R-\delta} \right), \quad (5)$$

или в безразмерном виде

$$K = \frac{\Delta p}{\rho_r V_r^2} = (1-\varphi) \frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \bar{v}_{\text{сл}}^2 \ln \left(\frac{1}{1-\bar{\delta}} \right) = (1-\varphi) \frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \bar{v}_{\text{сл}}^2 \ln \left(\frac{1}{\xi} \right), \quad (6)$$



где $\xi = 1 - \bar{\delta}$. Для расчета скорости вращения слоя в [8] предлагается подход на основе уравнения момента количества движения с учетом ряда вполне обоснованных допущений. Принимая, что скорость вращения слоя и газа на выходе из слоя равны, и считая, что потеря момента количества движения газа при прохождении сквозь слой жидкости происхо-

Рис. 2. Зависимость сопротивления ЦБА от толщины слоя.

$D = 380$ мм, $H = 210$ мм, $\beta = 8^\circ$, $s = 0,092$, $Q_r = 2$ тыс. м³/ч, $\lambda = 0,42$.

Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей сопротивления ЦБА от толщины слоя.

1 — эксперимент; 2 — расчет по (2) [4], 3 — по (3) [6], 4 — по (6).

дит за счет трения слоя о торцовые крышки аппарата, была получена следующая формула для расчета скорости вращения слоя:

$$\frac{V_{\text{сл}}}{V_{\Gamma} \sin \theta} = \sqrt{\frac{\alpha^2 \xi^2}{4} + \alpha} - \frac{\alpha \xi}{2}, \quad (7)$$

где для аппарата с плоскими торцовыми крышками

$$\alpha = \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}} c_f (1 - \varphi) \sin \theta} \frac{3s\bar{H}}{(1 - \xi^3)}, \quad (8)$$

а c_f — эмпирический коэффициент трения газожидкостного потока о стенку в вихревой камере, принятый в [8] равным 0,025.

Формулу (7) можно переписать в виде, более удобном для вычислений,

$$\bar{v}_{\text{сл}} = \frac{V_{\text{сл}}}{V_{\Gamma}} = \frac{\sin \theta}{\frac{\xi}{2} + \sqrt{\frac{\xi^2}{4} + \frac{1}{\alpha}}} = \frac{\sin \theta}{\frac{\xi}{2} + \sqrt{\frac{\xi^2}{4} + \frac{1 - \xi^3}{\alpha_0}}}, \quad (9)$$

где

$$\alpha_0 = \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}} c_f (1 - \varphi) \sin \theta} \frac{3s\bar{H}}{(1 - \xi^3)}. \quad (10)$$

Зависимость (7) хорошо описывает экспериментальные данные, что подтверждено сравнением с экспериментом как в [8], так и в [9]. При $\bar{v}_{\text{сл}} \ll 1$, что выполняется при $\frac{\alpha \xi^2}{4} \ll 1$ и, как правило, наблюдается в эксперименте, формула (9) принимает вид

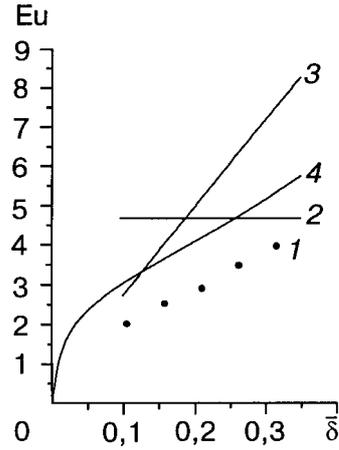
$$\bar{v}_{\text{сл}} = \sin \theta \sqrt{\alpha} = \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}} c_f (1 - \varphi) \sin \theta} \frac{3 \sin \theta s \bar{H}}{(1 - \xi^3)}}. \quad (11)$$

Для оценок скорости вращения слоя можно использовать формулу для “тонкого” слоя, когда $\bar{\delta} \ll 1$, но еще выполняется зависимость $\bar{v}_{\text{сл}} \ll 1$, которая имеет вид

$$\bar{v}_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}} c_f (1 - \varphi) \sin \theta} \frac{s \bar{H}}{\bar{\delta}}}. \quad (12)$$

Заметим, что, в отличие от (4), в формулах (9), (11) и (12) скорость вращения слоя зависит от его толщины.

В зависимостях (3), (6) и (8) фигурирует газосодержание, которое также необходимо определять. В работе [2] для расчета газосодержания рекоменду-



ется пользоваться такими же зависимостями φ от числа Фруда, которые применяются при расчете обычных барботажных аппаратов, при условии, что в качестве определяющих параметров необходимо брать центробежное ускорение g_* и среднерасходную скорость газа в радиальном направлении V :

$$\varphi = 1,2 \text{Fr}_M^{0,1}, \text{ где } \text{Fr}_M = \frac{\rho_\Gamma}{\rho_{\text{ж}}} \frac{V^2}{g_* \delta_0}. \quad (13)$$

Учитывая, что $V = V_\Gamma s$ и $g_* = \frac{V_{\text{сл}}^2}{R}$, выражение для Fr_M можно записать в виде, независящем от расхода газа:

$$\text{Fr}_M = \frac{\rho_\Gamma}{\rho_{\text{ж}}} \frac{s^2}{\bar{v}_{\text{сл}}^2 \bar{\delta}_0}. \quad (14)$$

Рассматривая (9) и (13) как систему двух уравнений относительно двух неизвестных $\bar{v}_{\text{сл}}$ и φ , решение этой системы можно построить на основе следующего итерационного процесса. На первом шаге задается приближенное значение φ , далее вычисляются $\bar{v}_{\text{сл}}$ (9), $\bar{\delta}_0 = (1 - \varphi) \bar{\delta}$, Fr_M (14) и по (13) определяется значение φ для следующего шага. Поскольку φ изменяется слабо, то обычно с практической точностью процесс сходится уже на втором или третьем шаге.

Такой расчет был проведен для системы вода — воздух при $\rho_\Gamma = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $s = 0,05 - 0,20$, $\bar{H} = 0,3 - 1,0$, $\bar{\delta} = 0,1 - 0,5$. Было получено $\varphi = 0,64 - 0,74$. Поскольку φ меняется в узких пределах, далее при обработке данных, как и в [9], φ было принято $\varphi = 0,7$. В общем случае, при других значениях параметра φ следует рассчитывать по предложенной методике.

На основе зависимостей (6) для K и (9) для $\bar{v}_{\text{сл}}$ для условий эксперимента был проведен расчет перепада давления, определяемого “весом” газожидкостного слоя, при $\bar{\delta} = 0 - 0,4$ (см. рис. 3, кривая 3).

Как видно из рис. 3, кривая 3 лучше описывает экспериментальные данные и хорошо отражает угол наклона экспериментальной кривой. Это позволяет использовать зависимости (6) и (9) в качестве основы для построения полуэмпирической формулы для расчета сопротивления ЦБА. Расположение расчетной кривой выше экспериментальных точек объясняется тем, что реальное сопротивление пенного слоя меньше его “веса”. Например, в обычном пенном слое вода — воздух $\Delta p = 0,85 \rho_{\text{ж}} g \delta_0$ [10], а в зависимости (3) коэффициент $B = 0,5 - 0,6$.

Опираясь на проведенный выше анализ, экспериментальные данные авторов для различных завихрителей были обработаны в переменных Eu , K , где

$$K = (1 - \varphi) \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_\Gamma} \bar{v}_{\text{сл}}^2 \ln \left(\frac{1}{\xi} \right), \text{ значение } \bar{v}_{\text{сл}} \text{ рассчитывалось по (9), а } \varphi \text{ принималось}$$

равным 0,7. В таблице приведены размеры завихрителей и режимы экспериментов, которым соответствует следующий диапазон изменения параметров: $\bar{H} = 0,3 - 1,1$, $s = 0,06 - 0,16$, $\bar{\delta} = 0,1 - 0,3$, $\lambda = (0,25 - 0,42) \text{ кг/кг}$, $Q_\Gamma = (0,2 - 2,5) \text{ тыс м}^3/\text{ч}$.

Использованные данные были обобщены в виде полуэмпирической зависимости

$$Eu = A + 0,7(1 - \varphi) \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \bar{v}_{сл}^2 \ln\left(\frac{1}{\xi}\right), \quad (15)$$

где $A = 0,4$. Результаты обработки данных приведены на рис. 4.

Отличие полученной зависимости (15) от (3) состоит в том, что для расчета $\bar{v}_{сл}$ вместо (4) использовалось выражение (9), член δ/R заменен на $\ln 1/\xi$ и изменены значения эмпирических констант. Замена δ/R на $\ln 1/\xi$ позволяет использовать зависимость (15) как для “тонких” ($\bar{\delta} \ll 1$), так и для “толстых” барботажных слоев. Без такой замены, например в случае при $\bar{\delta} = 0,4$, внесится дополнительная погрешность около 20 %. Предложенная зависимость описывает приведенные экспериментальные данные с погрешностью около 20 %.

Следует отметить, что коэффициент A в (15) отражает вклад завихрителя в общее сопротивление аппарата и, вообще говоря, зависит от конструктивных параметров завихрителя. Расчет сопротивления завихрителя должен включать расчет местных сопротивлений и сопротивления трения при прохождении газа сквозь щели завихрителя. Однако учитывая, что вклад завихрителя в общее сопротивление ЦБА обычно не превышает 15 %, для завихрителей с постоянной шириной щелей можно ограничиться грубым приближением и на основе экспериментальных данных принять $A = 0,4$. Для лопаточных завихрителей, у которых ширина щели не постоянна и, так как нет резкого сужения потока, местное сопротивление при входе газа в щель меньше, коэффициент A будет меньше.

Зависимость (15) включает в себя сопротивление завихрителя и сопротивление, связанное с гидростатическим перепадом давления в слое в поле центробежных сил. Ввиду того, что, как правило, $\bar{v}_{сл} \ll 1$, потерями полного давления газа после выхода из слоя пренебрегают. Однако, если толщина слоя столь мала, что значение $\bar{v}_{сл}$ сравнимо с единицей, или по каким-либо причинам “зажат” выход газа из аппарата (например, путем уменьшения диаметра выходного патрубка газа), то это слагаемое необходимо учитывать.

На основе зависимостей (3), (15) можно объяснить, почему в экспериментах [4, 7] сопротивление ЦБА практически не зависело от толщины слоя. На рис. 5 показана зависимость Eu от ($\bar{\delta}$) при различных значениях параметра $s\bar{H}$, рассчитанная по (15). Видно, что с уменьшением $s\bar{H}$ зависимость Eu от $\bar{\delta}$ ослабевает, а при $s\bar{H} = 0,01$ значение Eu практически не зависит от $\bar{\delta}$. В работе [4, рис. 2] $s\bar{H} = 0,016$, в [7] 0,0085, в настоящих опытах 0,05 – 0,1. Этим объясняется различный характер зависимости $Eu(\bar{\delta})$.

Более строго характер поведения $\bar{v}_{сл}(\bar{\delta})$ и $Eu(\bar{\delta})$ определяется параметром α_0 (см. (10)), который отражает влияние трения о торцовые крышки. При $\alpha_0 < 0,1$ (случай, характерный для практики) трение существенно и $\bar{v}_{сл}$ падает при увеличении $\bar{\delta}$. В случае $\alpha_0 > 2,7$ трение перестает играть заметную роль и $\bar{v}_{сл}$ растет при увеличении $\bar{\delta}$. При $0,1 <$

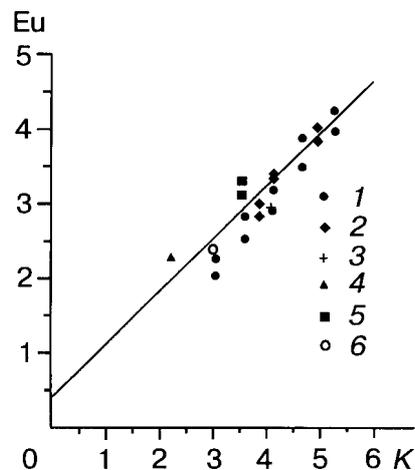


Рис. 4. Обобщение экспериментальных данных по сопротивлению ЦБА.

Обозначения экспериментальных точек см. по таблице.
Прямая — расчет по (15).

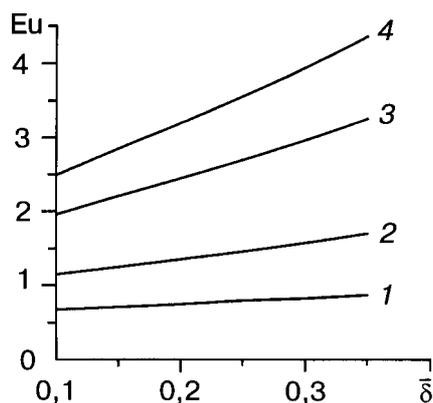


Рис. 5. Зависимость $Eu(\bar{\delta})$ при различных значениях $s\bar{H}$.

$$s\bar{H} = 0,01 (1), 0,03 (2), 0,07 (3), 0,1 (4).$$

$< \alpha_0 < 2,7$ поведение $\bar{v}_{\text{сл}}(\bar{\delta})$ имеет не-монотонный характер. При увеличении $\bar{\delta}$ скорость слоя сначала падает, достигая минимума, а затем начинает расти, как показано в [8, рис. 5]. Зависимость $Eu(\bar{\delta})$ является монотонно возрастающей функцией при всех α_0 .

Рассмотрим далее вопросы о конусности завихрителя и форме внутренней поверхности вращающегося газожидкостного слоя. В системе отсчета, связанной с частицей жидкости, последняя находится в поле силы тяжести \vec{g} , направленном вертикально вниз, и в центробежном поле \vec{g}_* , направленном радиально от оси на периферию. Свободная поверхность жидкости располагается соответственно перпендикулярно вектору суммарного силового поля $\vec{g} + \vec{g}_*$ представляет собой конус с раскрытием вверх с углом конусности γ , равным

$$\gamma = \text{arctg} \left(\frac{g}{g_*} \right). \quad (16)$$

Естественно, для обеспечения хороших гидродинамических условий прохождения газа сквозь слой следует обеспечить постоянство толщины слоя по высоте, что достигается при равенстве углов конусности поверхности слоя и завихрителя. При $Htg\gamma \ll \delta$ конусностью слоя можно пренебречь и использовать цилиндрические завихрители.

Влияние конусности поверхности газожидкостного слоя проявляется в уменьшении средней толщины слоя по сравнению с толщиной слоя с вертикальной поверхностью. При расчете сопротивления ЦБА это можно учесть следующим образом. На первом шаге, принимая свободную поверхность слоя вертикальной, рассчитываем g_* , на втором шаге, уменьшив среднюю толщину слоя на $0,5Hg/g_*$, делаем окончательный расчет требуемых параметров.

В ряде работ [5, 6, 11] приводятся экспериментальные данные по влиянию расхода жидкости на сопротивление ЦБА, которое проявляется в слабом росте сопротивления при увеличении орошения. Одним из путей учета влияния орошения в рамках настоящего подхода является учет влияния расхода жидкости на скорость вращения барботажного слоя. Формула (7) была получена в [8] для аппарата без протока жидкости. В [7] в рамках подхода, аналогичного [8], была получена зависимость для скорости вращения слоя с учетом протока жидкости при ее незакрученной подаче. С использованием обозначений, принятых в настоящей работе, эта формула имеет вид

$$\bar{v}_{\text{сл}} = \frac{\sin \theta}{\frac{(1+\lambda)\xi}{2} + \sqrt{\frac{(1+\lambda)^2 \xi^2}{4} + \frac{1}{\alpha}}}. \quad (17)$$

При подаче жидкости без закрутки увеличение ее расхода приводит к уменьшению скорости вращения слоя. Поэтому в общем случае, при больших рас-

ходах жидкости, чтобы обеспечить высокую скорость вращения слоя и сохранить преимущества центробежного барботажа, жидкость в аппарате необходимо подавать закрученной. Для этого случая в рамках подхода [8], учитывая момент количества движения, вносимый жидкостью, получим следующее соотношение для скорости вращения слоя:

$$\bar{v}_{\text{сл}} = \frac{\sin \theta + \lambda \xi_{\text{ж}} \bar{v}_{\text{ж}\varphi}}{\frac{(1+\lambda)\xi}{2} + \sqrt{\frac{(1+\lambda)^2 \xi^2}{4} + \frac{1}{\alpha}}}, \quad (18)$$

где

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}} c_f (1-\varphi)} \frac{3s\bar{H}}{(\sin \theta + \lambda \xi_{\text{ж}} \bar{v}_{\text{ж}\varphi}) (1-\xi^3)}. \quad (19)$$

Изменяя тангенциальную скорость подачи жидкости, можно управлять скоростью вращения слоя. Так, в случае, когда $V_{\text{ж}\varphi}$ больше скорости вращения слоя в непроточном аппарате, скорость вращения слоя увеличивается.

На основе формул (17), (18) можно оценить влияние протока жидкости на гидродинамические характеристики ЦБА. Для условий настоящих опытов ($\lambda = 0,25 - 0,42$ и $V_{\text{ж}\varphi} = 0$) влияние протока жидкости незначительно.

Однако при расчете сопротивления ЦБА учет одного влияния орошения на скорость вращения слоя недостаточен. Например, при подаче жидкости без закрутки увеличение расхода жидкости приводит к уменьшению $v_{\text{сл}}$ и, следовательно, должно приводить к падению сопротивления ЦБА. В эксперименте же наблюдается обратное. Для устранения этого противоречия необходимо учитывать изменение толщины газожидкостного слоя при изменении расхода жидкости. Дело в том, что хотя толщина слоя определяется главным образом диаметрами завихрителя и сливного порога, в зависимости от расходов жидкости и газа она может быть несколько больше или меньше расчетного значения. В работах [5, 11] отмечается рост толщины слоя при увеличении расхода жидкости и уменьшении расхода газа. Однако этот вопрос требует специального исследования.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Предложена уточненная зависимость для расчета гидравлического сопротивления ЦБА, основанная на использовании полуэмпирического выражения для скорости вращения центробежно-барботажного слоя, полученного в [8].
2. В рамках модели [8] предложена процедура расчета газосодержания центробежно-барботажного слоя.
3. Даны рекомендации по выбору конусности завихрителя и предложена методика учета конусности центробежно-барботажного слоя при расчете сопротивления ЦБА.
4. Представлены экспериментальные данные по сопротивлению ЦБА с различными цилиндрическими и коническими завихрителями диаметром до 410 мм и высотой до 210 мм в зависимости от режимных и конструктивных параметров.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Δp — перепад давления, гидравлическое сопротивление;
 C, A, B, c_f — эмпирические константы;
 $\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{г}}$ — плотности жидкости и газа;
 g_* — центробежное ускорение;
 g — ускорение силы тяжести;
 $V_{\text{сл}}$ — линейная скорость вращения слоя;
 V — среднерасходная скорость газа в радиальном направлении;

V_r — скорость газа в щелях завихрителя;
 $V_{ж\varphi}$ — тангенциальная компонента скорости жидкости при подаче ее в слой;
 r — радиус в цилиндрической системе координат;
 $D_{п}$ — диаметр сливного кольца;
 δ_0 — толщина светлого слоя жидкости;
 δ — толщина газожидкостного слоя;
 ξ — безразмерное расстояние от оси до внутренней границы газожидкостного слоя;
 $\xi_{ж}$ — безразмерный радиус, на котором жидкость вводится в слой;
 φ — среднее объемное газосодержание;
 γ — угол конусности свободной поверхности центробежно-барботажного слоя;
 D_1, D_2, D — нижний, верхний и средний диаметры завихрителя;
 R, H — средний радиус и высота завихрителя;
 s — относительное проходное сечение завихрителя;
 β — угол конусности завихрителя, $\beta = \arctg((D_2 - D_1)/2H)$;
 θ — угол наклона щели к радиусу в горизонтальной плоскости;
 N — число щелей завихрителя;
 b — ширина щели завихрителя;
 Q_r — объемный расход газа;
 λ — удельный массовый расход жидкости, отношение массового расхода жидкости к массовому расходу газа;
 α, α_0 — безразмерные параметры;
 K — безразмерный перепад давления, обусловленный “весом” слоя;
 Eu — число Эйлера;
 Fr_m — модифицированное число Фруда;
 $\bar{\delta} = \frac{\delta}{R}$; $\bar{\delta}_0 = \frac{\delta_0}{R}$; $\bar{H} = \frac{H}{R}$; $\bar{v}_{сл} = \frac{V_{сл}}{V_r}$; $\bar{v}_{ж\varphi} = \frac{V_{ж\varphi}}{V_r}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдуков А.П., Гольдштик М.А., Казаков В.И., Ли Т.В. Тепло- и массоперенос в закрученном барботажном слое // Расчет тепломассообмена в энергохимических процессах. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1981. — С. 37 – 58.
2. Бурдуков А.П., Казаков В.И. Гидродинамика вращающегося барботажного слоя // Дисперсные системы в энергохимических процессах. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1982. — С. 20 – 27.
3. Бурдуков А.П., Дорохов А.Р., Казаков В.И. и др. Разработка вихревых барботажных аппаратов для абсорбционной очистки газов // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1985. — № 4, вып. 1. — С. 99 – 102.
4. Казаков В.И., Кармановский Д.Г. Влияние геометрических характеристик газораспределительных устройств на гидродинамику вращающегося барботажного слоя // Процессы переноса в аппаратах энергохимических производств. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1985. — С. 125 – 137.
5. Лаптев С.А. Поведение газожидкостного потока в вихревых камерах // Сиб. физ.-техн. журн. — 1992. — Вып. 5. — С. 131 – 134.
6. Бурдуков А.П., Дорохов А.Р., Казаков В.И., Крисанов А.А. О расчете гидравлического сопротивления центробежно-барботажных аппаратов // Там же. — 1993. — Вып. 5. — С. 16 – 20.
7. Борисов И.И., Халатов А.А., Титова Т.Г., Шевцов С.В. Гидродинамика вихревых барботажных аппаратов // Пром. теплотехника. — 1994. — Т. 16, № 1. — С. 28 – 33.
8. Гольдштик М.А., Ли Т.В., Ханин В.М., Смирнов Н.П. О скорости вращения газожидкостного слоя в вихревой камере // Процессы переноса в энергетических многофазных системах. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1983. — С. 93 – 99.
9. Бурдуков А.П., Казаков В.И., Кувшинов Г.Г. Влияние геометрических параметров решеток на скорость вращения барботажного слоя // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1986. — № 4, вып. 1. — С. 32 – 37.
10. Тарат Э.Я. и др. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями. — Л.: Изд. ЛГУ, 1976. — 240 с.
11. Бурдуков А.П., Богер А.Ф. Исследование гидродинамики контактного устройства для неадиабатического массообмена // Энерготехнологические процессы и аппараты химических производств. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1989. — С. 120 – 125.

Статья поступила в редакцию 26 мая 1997 г.