Теплофизика и аэромеханика, 2000, том 7, № 1

УДК 66.021.32: 536.248.2: 532.529

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕННЫХ АППАРАТОВ

М.И. ШИЛЯЕВ, А.Р. ДОРОХОВ

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Теоретически анализируется составляющая перепада давления на полке пенного аппарата Δp, связанная с пульсационным характером отрыва пузырей от отверстий решетки. Показано, что при расчете суммарного перепада давления эта составляющая входит в выражение для расчета перепада давления с отрицательным знаком, т. е. уменьшает перепад давления на полке пенного аппарата. Для расчета Δp предлагается зависимость, которая включает гидравлическое сопротивление собственно газожидкостного слоя, составляющие капиллярного давления при отрыве пузыря от решетки и на выходе из пенного слоя и пульсационную составляющую перепада давления. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

При выборе типа тепломассообменного аппарата прямого контакта фаз или аппарата “мокрой” газоочистки важное значение имеют его энергетические показатели, определяющие энергозатраты на единицу объема обрабатываемого газа. Основным вкладом в удельные энергетические затраты в таких системах является величина потерь давления на аппараты Δp.

Существующие методы расчета гидравлического сопротивления пенных аппаратов основаны на представлении о возможности разделения полного гидравлического сопротивления на отдельные составляющие [1]. При этом полагают справедливым равенство

$$\Delta p = \Delta p_{\text{с.р}} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{\text{с.п}}, \qquad (1)$$

где $\Delta p_{\text{с.р}} = \zeta \rho_g v_0^2 / 2$ — гидравлическое сопротивление “сухой” решетки, ζ, ρ_g, v_0 — коэффициент гидравлического сопротивления, плотность газа и его скорость в отверстиях газораспределительной решетки; $\Delta p_{\sigma} = k\,4\sigma/d_0$ — составляющая гидравлического сопротивления, связанная с силами поверхностного натяжения, препятствующими росту пузыря на отверстии решетки, σ, d_0 — коэффициент поверхностного натяжения и диаметр отверстий решетки, k — эмпирический коэффициент (по данным [2] k = 0,45 – 0,66); $\Delta p_{\text{с.п}} = k_1 \rho_f g h_0$ — гидравлическое сопротивление слоя пены, обусловленное “весом” газожидкостного слоя, ρ_f, h_0 — плотность жидкости и высота “светлого” слоя жидкости на решетке, g — ускорение силы тяжести, по экспериментальным данным [2] k_1 = 1,2.

Эмпирические коэффициенты k и k_1 в составляющих, учитывающих капиллярное давление и вес столба газожидкостного слоя, до настоящего времени не имеют удовлетворительного теоретического объяснения. Ввиду относительно малого гидравлического сопротивления полки пенного аппарата указанное обстоятельство может показаться и не столь важным, однако, с точки зрения развития теории пенно-барботажных слоев, выяснения физики процессов гидродинамики и тепломассопереноса в таких слоях оно имеет большое значение. Кроме того, применение метода расчета гидродинамики пенных слоев, например, к расчету центробежно-барботажных аппаратов приводит уже к значительным ошибкам [3].

Причина расхождения результатов расчета перепада давления в ЦБА по общепринятой методике с экспериментом была объяснена в [3] необходимостью учета нормальной составляющей тензора турбулентных напряжений на выходе газа из отверстий газораспределительной решетки, связанной с пульсациями трения при росте и отрыве пузырей на решетке. Причем эта составляющая входит в расчетную формулу с отрицательным знаком. Представляет интерес оценить ее роль при расчете перепада давления и в пенном слое.

Для непроточного газожидкостного слоя в пенном аппарате система уравнений гидродинамики двухфазного слоя, записанная в [3], существенно упрощается. Для стационарного случая, направляя ось x по нормали к поверхности барботажной решетки и полагая $x = 0$ на поверхности этой решетки, можем записать

$$\varepsilon_g \rho_g v_{gx} \frac{\partial v_{gx}}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tau_{sxx}\right) + \rho_s g\,, \tag{2}$$

где ε_g, ρ_g, v_{gx} — объемная концентрация, плотность и скорость в направлении оси x газовой фазы, ρ_s — плотность газожидкостной смеси, τ_{sxx} — нормальная составляющая тензора турбулентных напряжений, p — давление. Опуская в связи с малостью инерционные члены в (2), получим

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_s g + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tau_{sxx}\right), \tag{3}$$

где

$$\tau_{sxx} = -\rho_s \overline{v'_x v'_x}\,, \tag{4}$$

v'_x — пульсационная скорость газожидкостной смеси в направлении x.

Проинтегрируем уравнение (3) по толщине газожидкостного слоя и пренебрежем составляющей тензора турбулентных напряжений на его свободной поверхности (при $x = H$). В результате будем иметь

$$\Delta p = \rho_s g H - \rho_s \left(\overline{v_x'^2}\right)_{x=0}. \tag{5}$$

Выразим плотность смеси через объемное газосодержание φ:

$$\rho_s \approx (1-\varphi)\rho_f\,, \tag{6}$$

и воспользуемся соотношением, связывающим высоту пенного слоя H с высотой “светлого” слоя жидкости h_0; тогда из (5) получим

$$\Delta p = \rho_f g h_0 - \rho_f \left(1-\varphi_w\right)\overline{v_x'^2}_{\,x=0}\,, \tag{7}$$

здесь φ_w — газосодержание вблизи газораспределительной решетки.

Пульсации скорости газожидкостной смеси на отверстии газораспределительной решетки связаны с процессами роста и отрыва пузырей газа. Из уравнения баланса массы втекающего в пузырь газа его радиус $r_п$ определяется следующей зависимостью от времени:

$$r_п = \left(3d_0^2\, v_0 / 16\right)^{1/3} t^{1/3},$$

где d_0 — диаметр отверстий в газораспределительной решетке, v_0 — скорость газа в отверстиях. Для скорости роста пузыря соответственно имеем

$$v_п = \frac{dr_п}{dt} = \frac{1}{3} t^{-2/3} \left(3d_0^2\, v_0 / 16\right)^{1/3}. \qquad (8)$$

Обозначим через $t_к$ время от начала роста пузыря до его отрыва, которое связано с частотой отрыва пузырей соотношением $f = 1/t_к$. Представим среднеквадратичную корреляцию пульсаций в виде

$$\overline{v_x'^2} \approx \bar{v}_п \bar{v}_п = \left(\frac{1}{t_к} \int_0^{t_к} v_п\, dt\right)^2. \qquad (9)$$

Подставляя (8) и (9) и выполняя интегрирование, будем иметь

$$\bar{v}_п \bar{v}_п = \left(3d_0^2\, v_0 f^2 / 16\right)^{2/3}. \qquad (10)$$

Примем, согласно данным [1], значение частоты $f \approx 20$ 1/с и подставим выражение (10) в формулу (7) с учетом (6). Получим

$$\Delta p = \rho_f g h_0 - 17{,}78 \rho_f \left(1 - \varphi_w\right) \left(d_0^2 v_0\right)^{2/3}. \qquad (11)$$

Выражение (11) должно быть дополнено составляющими, учитывающими капиллярный перепад давления, согласно Лапласу, на растущем на отверстии пузыре, а также капиллярный перепад давления на выходе пузыря из слоя. Указанные составляющие определяются соответственно по диаметру отверстия в решетке

$$\Delta p_{\sigma 1} = 4\sigma / d_0 \qquad (12)$$

и по диаметру пузыря на выходе из пенного слоя $d_{п.к}$, который найдем из условия равенства архимедовой силы и силы капиллярного давления в пузыре

$$d_{п.к} = \sqrt{6\sigma / \rho_f (1 - \varphi) g}. \qquad (13)$$

Тогда

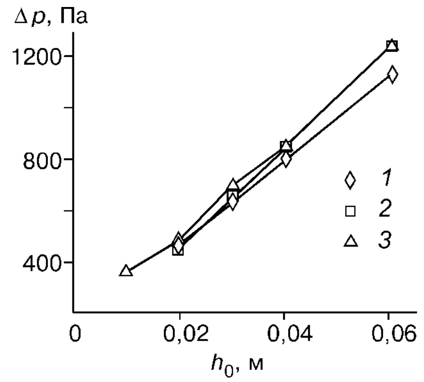
$$\Delta p_{\sigma 2} = 2\left(4\sigma / d_{п.к}\right). \qquad (14)$$

Коэффициент 2 в формуле (14) учитывает наличие двух поверхностей примерно одинакового радиуса (внутренней и внешней) при выходе пузыря из пенного слоя.

Добавляя составляющие капиллярного давления в (11), получим следующую формулу для расчета перепада давления в пенном слое:

$$\Delta p = \rho_f g h_0 + 4\sigma / d_0 + 2(4\sigma / d_{п.к}) - 17{,}78 \rho_f \left(1 - \varphi_w\right) \left(d_0^2\, v_0\right)^{2/3}. \qquad (15)$$

Для проведения практических расчетов по формуле (15) необходимо знать газосодержание у поверхности решетки φ_w. В первом приближении можно предположить, что газосодержание φ_w есть не что иное как доля поверхности решетки, занятая газом, т. е. живое сечение решетки s. Приняв такое допущение, определим максимальный вклад последней составляющей в уравнении (15).



Зависимость перепада давления на пенном аппарате от высоты “светлого” слоя жидкости (w = 0,5 м/с, d_0 = 2,5 мм, s = 0,06).

1 — расчет по формуле (15), *2* — расчет по методике [2], *3* — эксперимент [2].

Для расчета диаметра пузыря на выходе из слоя воспользуемся эмпирической зависимостью [2] для газосодержания, входящего в формулу (13):

$$\varphi = 1{,}2\mathrm{Fr}_{\text{м}}^{0,1},$$

где $\mathrm{Fr}_{\text{м}} = \rho_g w^2 / \left(\rho_f g h_0\right)$ — так называемый модифицированный критерий Фруда, $w = v_0 s$ — среднерасходная скорость газа в расчете на полную поверхность решетки.

Ниже для одного из режимов приведены отдельные составляющие перепада давления в пенном слое, полученные согласно методике расчета [2] с учетом эмпирических коэффициентов, а также по формуле (15) (h_0 = 0,02 м, w = = 0,5 м/с, d_0 = 2,5 мм, s = 0,06):

Составляющие перепада давления, Па	Расчет по [2]	Расчет по (15)
Статическое давление слоя $\Delta p_{\text{ст}}$	400	334
Капиллярный перепад на решетке, $\Delta p_{\sigma 1}$	57,6	128
Перепад на выходе из слоя $\Delta p_{\sigma 2}$	—	53,7
Пульсационная составляющая $\Delta p_{\text{п}}$		39,6
Итого	457,6	476,1

Сопоставление представленных данных позволяет выяснить физический смысл введенных в методику расчета [2] коэффициентов. Так, увеличение статического давления слоя в 1,2 раза можно объяснить компенсацией неучета капиллярного сопротивления на выходе газа из слоя. Заниженная оценка капиллярного перепада давления на решетке в [2] здесь объясняется тем, что действительное его значение уменьшается на величину пульсационной составляющей.

В целом результаты определения перепада давления как по методике [2], так и по формуле (15) достаточно близки (см. рисунок). Однако принципиальным является то обстоятельство, что при выводе зависимости (15) учтены в более полном объеме все физические факторы, влияющие на перепад давления в пенном слое, причем входящие в формулу эмпирические коэффициенты (газосодержание слоя, газосодержание слоя на стенке и пр.) имеют ясный физический смысл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мухлетов И.П., Тарат Э.Я., Туболкин А.Р., Тумаркина Е.С.** Пенный режим и пенные аппараты. —Л.: Химия, 1977. —303 с.
2. **Бурдуков А.П., Дорохов А.Р., Казаков В.И.** Совместный тепло- и массоперенос в динамическом двухфазном слое // Тепло- и массоперенос в абсорбционных аппаратах. — Новосибирск, 1979. — С. 30 — 47.
3. **Шиляев М.И., Дорохов А.Р.** К расчету гидравлического сопротивления центробежно-барботажных аппаратов // Теплофизика и аэромеханика. — 1998. — Т. 5, № 4. — С. 565 — 571.

Статья поступила в редакцию 16 октября 1998 г.