

## РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТА С ТРУБЧАТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ НАСАДКОЙ

УДК: 66.02.071.7

Гидродинамику аппарата с трубчатой цилиндрической насадкой характеризует гидравлическое сопротивление  $\Delta P_{ан}$ , количество удерживаемой жидкости  $h_0$ , газосодержание  $\varphi$  и поверхность контакта фаз (ПКФ)  $A$ .

Потери напора потока, затрачиваемые на формирование и перемещение вихрей в сухом аппарате, могут быть вычислены по следующей зависимости:

$$\Delta P_C = \xi_C \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_a W_a^2}{2 \varepsilon_0^2}, \quad (1)$$

где  $\xi_C$  - коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления, как от трения газа о поверхность насадочных тел, так и от изменения направления газового потока при обтекании элементов насадки  $\theta_b$  - коэффициент, учитывающий потерю давления при сдвиге моментах вихреобразования;  $\theta_p$  - коэффициент, учитывающий потерю давления при взаимодействии в радиальном направлении;  $H$  - высота насадки, м.

Коэффициент сопротивления сухой насадки рассчитывается по формуле:

$$\xi_C = 0,388 \frac{\theta_b \cdot \theta_p}{\text{Re}_a^{0,001}}, \quad (2)$$

где  $\theta_b$  - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в вертикальном направлении:

$$\theta_b = 0,75 + 0,25 \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{4 \cdot t_b}{m_k \cdot d_{\delta}} + 1 \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь  $d_{\delta}$  - диаметр цилиндров, м;  $m_k$  - параметр, учитывающий вихреобразования, форму обтекаемых элементов и снижение скорости вихрей:

$$m_k = 3,6 \cdot (1 - e^{-t_a/d_{\delta}}); \quad (4)$$

$\theta_p$  - коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении определяется из условия взаимодействия параллельных вихревых струй. Отсюда следует, что коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении и учитывающий изменение частоты вихреобразования,  $\theta_p$  может быть определен по формуле:

$$\theta_p = \frac{t_p - \lambda}{t_p - d_u} \quad (5)$$

Согласно [1] тела, расположенные в одном ряду перпендикулярно к обтекаемому потоку, инициируют образование вихрей с масштабами  $\lambda$ :

1.  $\lambda = d_{\text{ц}}$ . Для дискретно расположенных тел в одном ряду, перпендикулярному обтекаемому потоку.
2.  $\lambda = t_p - d_{\text{ц}}$ .

В первом случае масштаб и частота вихрей определяются шириной тела, а во втором случае размером зазора между телами.

Критерий Рейнольдса  $Re_r$  рассчитывают по формуле:

$$Re_r = \frac{W_{\text{а}} \cdot d_{\text{ц}}}{V_{\text{а}}} \quad (6)$$

Здесь  $V_{\text{а}}$  – коэффициент кинематической вязкости газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d_{\text{экр}}$  – эквивалентный диаметр насадки.

Введение в уравнение (6)  $d_{\text{экр}}$  обусловлено тем, что газ движется через насадку по каналам, образованным насадочными телами. Сечение этих каналов не постоянно по высоте аппарата и, следовательно, скорость газа также является переменной величиной.

Согласно [2] эквивалентный диаметр насадки определяется как эквивалентный диаметр каналов, по которым движется газ:

$$d_{\text{экр}} = \frac{4\varepsilon}{a_H} \quad (7)$$

где  $\varepsilon = 1 - V_H$  – порозность насадки;  $V_H$  – объем насадки в  $1 \text{ м}^3$  аппарата,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $a_H$  – удельная поверхность насадки в  $1 \text{ м}^3$  аппарата,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Для призматической насадки с круглым поперечным сечением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi d^2}{4t_b t_p} \quad (8)$$

Удельная поверхность насадочных элементов:

$$a_H = \frac{\pi d}{t_b t_p} \quad (9)$$

Тогда с учетом (8) и (9) эквивалентный диаметр насадки с круглым поперечным сечением:

$$d_{\text{экр}}^{\text{цил}} = \frac{4t_b t_p - \pi d^2}{\pi d} \quad (10)$$

В двухфазном потоке перепад давления на единицу высоты аппарата будет определяться не только сопротивлением, возникающим при движении газа, но также и тем напором, который нужно дополнительно сообщать газовому потоку, чтобы компенсировать трение жидкостного потока.

Сопоставление кривых изменения  $\Delta P_L$  орошаемой насадки в зависимости от скорости газового потока и плотности орошения (в режиме развитой турбулентности) показывает, что они почти параллельны кривой, соответствующей сухому аппарату. Это означает, что гидравлическое сопротивление орошаемого аппарата может быть определено зависимостью:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{t_b} \cdot \frac{\rho_{\text{а}} W_{\text{а}}^2}{2\varepsilon_0^2}, \quad (11)$$

где  $\xi_L$  – коэффициент сопротивления орошаемой насадки:

$$\xi_L = 4,11 \cdot \theta_b \cdot \theta_p \cdot \frac{Re_{\text{ж}}^{0,42}}{Re_{\text{а}}^{0,44}}, \quad (12)$$

здесь  $Re_{\text{ж}}$  – число Рейнольдса:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{U_{\text{ж}} \cdot d_{\text{ц}}}{V_{\text{ж}}}, \quad (13)$$

где  $U_{\text{ж}} = L/3600$  – скорость жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $V_{\text{ж}}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Сравнение данных, полученных по уравнениям (1) и (11) с экспериментальными, показывает их хорошую сходимость (до  $\pm 10\%$ ) как при изменении режимных параметров, так и взаимного расположения насадочных элементов.

Наряду с гидравлическим сопротивлением количество удерживаемой жидкости (КУЖ) является одним из основных параметров, характеризующих структуру слоя. Количество удерживаемой жидкости складывается из сумм статической и динамической составляющих. Статическая составляющая представляет собой количество жидкости, удерживаемой на насадке силами поверхностного натяжения. Эта величина не зависит от гидродинамических условий и определяется формой и материалом насадок, а также свойствами жидкости [2]. Динамическая составляющая представляет собой количество жидкости, движущейся по насадке, и определяется гидродинамическими условиями и конструктивными особенностями насадки.

Исследование количества удерживаемой жидкости ( $h_0$ ) в зависимости от режимных и конструктивных параметров проведены для насадки с круглым поперечным сечением. Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует об аналогичном изменении кривых  $h_0$  и  $\Delta P_L$ .

Количество жидкости, удерживаемой в аппарате рассчитываем по формуле:

$$h_0 = (h_{\bar{\epsilon}} + h_k) \cdot \frac{H}{t_b}, \quad (14)$$

где  $h_{\bar{\epsilon}}$  - условная высота жидкости, находящаяся в виде пленки на насадочных элементах одного ряда и отнесенная к поперечному сечению колонны, определяемая по формуле:

$$h_{\bar{\epsilon}} = \frac{\delta_{\bar{\epsilon}} \cdot b^2}{t_p^2}. \quad (15)$$

$h_k$  - капельная составляющая количества удерживаемой жидкости (КУЖ) в одном ряду элементов насадки:

$$h_k = B \xi_L \frac{\rho_a W_a^2}{2g\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{(\ell - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_0^2)}{\varepsilon_0^2}. \quad (16)$$

Значение постоянной в уравнении (16)  $B=0,48$  определено на основе сопоставления с экспериментальными данными. Погрешность полученных расчетных значений составляет менее  $\pm 12\%$ .

Установление взаимосвязи между количеством удерживаемой жидкости, динамической высотой и газосодержанием слоя имеет важное значение при анализе структуры потоков.

Газосодержание слоя рассчитывают по формуле:

$$\varphi = \varepsilon - \frac{h_0}{H} \quad (17)$$

Известно, что импульсное воздействие среды ускоряет межфазный перенос вещества. Ускорение переноса в пульсационных системах в основном происходит за счет увеличения скорости обновления контактирующих фаз.

Поверхность контакта фаз зависит от гидродинамической обстановки, которая в свою очередь определяется режимными и конструктивными параметрами аппарата.

Поскольку в аппаратах с подвижной насадкой газосодержание слоя имеет относительно высокие значения ( $\varphi > 0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ), в режиме развитой турбулентности, можно полагать, что в слое будут преобладать капли жидкости и ПКФ в основном определяется размерами этих капель.

В слое трубчатой цилиндрической насадки механизм распада капли жидкости носит сложный характер [1], так как дробление происходит как из-за деформации капель, так и под действием удара движущихся с большой скоростью капель о насадку и между собой. В зависимости от кинетической энергии соударяющихся частиц и частиц жидкости об элементы насадки, может произойти и распад капель, и прилипание к насадке, и коалесценция частиц жидкости. Такая постоянная и многократная смена актов дробления и слияния приведет к выравниванию размеров капель. Поэтому оценка зависимости среднеинтегрального значения диаметра капель от основных параметров слоя представляет интерес для расчетных уравнений.

Механизм дробления капель в сплошном потоке объясняется исходя из теории локальной изотропной турбулентности. Мелкомасштабные пульсации  $l \ll d_k$  на каплю, движущуюся в газовом потоке с плотностью  $\rho_g \ll \rho_{\text{ж}}$ , не способны оказать влияние, даже на характер ее движения. Крупномасштабные пульсации сравнительно мало изменяются на расстоянии порядка размера капли. Следовательно, на нее могут результивно воздействовать, вызывая деформацию формы или дробление, только пульсации с масштабов  $l \sim d_k$ . Считается [1], что размеры капель, дробящихся в турбулентном потоке, при  $d_k \gg l_0$  не должны зависеть от вязкостных свойств сплошной и дисперсной сред.

Визуальные наблюдения позволяют представить следующую картину преимущественного образования капель в слое дискретно расположенных цилиндрических элементов насадки. Жидкость стекает по поверхности насадки в виде пленки. Под воздействием вихрей, попеременно образующихся на боковых поверхностях цилиндра, образуется жидкостной валик. Под воздействием пульсаций вихрей жидкостной валик разрывается в колеблющиеся лепестки, которые, закручиваясь, образуют шнур с диаметром равным толщине пленки. Согласно [1] образование капли происходит не у поверхности насадки, а на некотором расстоянии, превышающем толщину пленки. Поэтому нет необходимости учитывать распределение скоростей сплошной фазы в пристенных слоях.

Исходя из изложенного принимаем: образование капель происходит при дроблении пленки под действием вихрей, возникающих при обтекании насадочных тел, вдали от пристенных слоев сплошной среды; капли в момент формирования имеют сферическую форму с однородным поверхностным натяжением; скорости дробления и коалесценции капель одинаковы. Последнее допущение справедливо при последовательном и многократном дроблении образующейся пленки.

При определении размера капли исходили из условия равновесия сил, действующих на каплю.

$$\rho_{жс} (\bar{U}')^2 / 2 = 4\sigma / d_k, \quad (18)$$

где в левой части уравнения – динамический напор, действующий изнутри на поверхность раздела, обусловленный изменением пульсационных скоростей на расстоянии  $l = d_k$ , а в правой части – капиллярное давление.

Среднюю пульсационную скорость можно выразить согласно закона "двух-третей" следующим образом:

$$\bar{U}' = \mathfrak{E}^{1/3} l^{1/3} = \mathfrak{E}^{1/3} d_k^{1/3}, \quad (19)$$

где  $l$  – масштаб пульсаций, сравниваемый с диаметром капли, т.е.  $l \sim d_k$ .

Диссипацию энергии в массе жидкости определим как:

$$\mathfrak{E} = \frac{N_b \theta_b}{V_{жс} \rho_{жс}}. \quad (20)$$

Здесь  $N_b$  – мощность вихря, образующегося при обтекании цилиндра сплошным потоком, Вт;  $V_{жс}$  – объем жидкости на поверхности насадки, м<sup>3</sup>;  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Мощность вихря определяем по уравнению [3]:

$$N_b = C_L \sqrt{\frac{C_L}{C_D}} \rho_{г} l_{ц} (d_{ц} + b) \frac{U_{г}^3}{2\theta_p}, \quad (21)$$

в котором  $C_L$  – коэффициент подъемной силы;  $C_D$  – коэффициент сопротивления;  $U_{г}$  – истинная скорость газового потока,  $U_{г} = W_{г} / \varepsilon_0 \varphi$ , м/с;  $b$  – длина лепестков, м:

$$b = U_{нл} / \omega. \quad (22)$$

Объем жидкости на поверхности насадки:

$$V_{жс} = l_{ц} b \delta_{нл} \quad (23)$$

Подставляя выражение (19-22) в уравнение (18) и решая относительно  $d_k$ , получим:

$$d_k = 6,9 \frac{\sigma^{3/5}}{\rho_{жс}^{1/5} U_{г}^{6/5}} \left[ \frac{b \delta_{нл} \theta_p}{\lambda (d + b) \rho_{г} \theta_b} \right]^{2/5}, \quad (24)$$

где  $\lambda = C_L \sqrt{\frac{C_L}{C_D}}$ .

Сравнение расчетных данных, полученных по уравнению (24) и рассчитанных на основе экспериментальных данных по ПКФ, показывает, что

$$d_k = 8,2 \frac{\sigma^{3/5}}{\rho_{жс}^{1/5} U_{г}^{6/5}} \left[ \frac{b \delta_{нл} \theta_p}{(d + b) \rho_{г} \theta_b} \right]^{2/5} \quad (25)$$

Степени при членах уравнения (25) соответствуют диапазона степеней, полученных ранее различными авторами, а именно  $d_k \sim \sigma^{0,3 \div 0,6}$ ;  $\rho_c^{-(0,2 \div 0,6)}$ ;  $\rho_g^{-(0,2 \div 0,4)}$ ;  $U_c^{-(1,0 \div 1,2)}$ ;  $l^{0,4 \div 0,5}$ , где  $\rho_c$  и  $\rho_g$  – плотности сплошной и дисперсной фаз. Это подтверждает то, что полученное теоретическое уравнение (25) практически полностью отражает характер влияния на размер капель параметров турбулентного потока.

Предполагая, что вся орошающая жидкость, поступающая на поверхность цилиндра, стекает в виде пленки со средней скоростью  $\bar{U}_{пл}$ , получим:

$$d_{ц} l_{ц} U_{жс} = \frac{3}{2} \delta_{пл} l_{ц} \bar{U}_{пл} \quad (26)$$

Откуда толщина пленки:

$$\delta_{пл} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_{ц} U_{жс}}{\bar{U}_{пл}}, \quad (27)$$

где  $d_{ц}$  - диаметр цилиндра, м;  $U_{жс} = \frac{L}{3600(1-\varphi)}$  - истинная скорость жидкости в слое, м/с.

Считается, что при противоточном движении фаз, в случае, если скорость газа  $W_{г} < 0,9W_{захл}$ , то касательные напряжения на свободной поверхности пленки и градиент давления незначительны. Скорость захлебывания противоточных аппаратов с подвижной насадкой  $W_{захл} \leq 5,0 - 7,0$  м/с. Поэтому на свободной поверхности пленки при  $y = \delta$  (касательные напряжения)  $\tau_{Гжс} \ll \tau_{Тжс}$ . При  $y = 0$ :

$$\tau_{Тжс} = g \rho_{жс} \delta_{пл}, \quad (28)$$

где  $\tau_{Гжс}$  и  $\tau_{Тжс}$  - касательные напряжения на поверхностях раздела фаз газ-жидкость и твердое тело-жидкость, соответственно, м/м<sup>2</sup>. Тогда:

$$\mu_{жс} \frac{\partial U_{пл}}{\partial y} = g \rho_{жс} \delta_{пл}. \quad (29)$$

Учитывая, что при  $y \rightarrow \delta_{пл}$ ,  $U_{пл} \rightarrow U_{пл}^{max}$ , получим:

$$U_{пл}^{max} = \frac{g \rho_{жс} \delta_{пл}^2}{\mu_{жс}} = \frac{g \delta_{пл}^2}{\nu_{жс}}, \quad (30)$$

в котором  $\mu_{жс}$  и  $\nu_{жс}$  - динамический (нс/м<sup>2</sup>) и кинематический (м<sup>2</sup>/с) коэффициенты вязкости жидкости.

С учетом зависимости (27) уравнение (30) примет вид:

$$U_{пл}^{max} = \frac{4}{9} \cdot \frac{g d_{ц}^2 U_{жс}^2}{\nu_{жс} \bar{U}_{пл}^2}. \quad (31)$$

Учитывая, что диаметр насадки невелик, на поверхности стенок не должно возникать волн. По данным Н.Н.Кулова [5], длина крупной волны  $110 \div 140$  мм, а мелких 19 мм. Поэтому можно считать, что течение пленок ламинарное и для него можно принять  $\frac{U_{пл}^{max}}{\bar{U}_{пл}} = 1,5$ .

С учетом этого уравнение (31) преобразуется к следующему виду:

$$\bar{U}_{пл} = 0,666 \left( \frac{g}{\nu_{жс}} \right)^{1/3} U_{жс}^{2/3} d_{ц}^{2/3}. \quad (32)$$

Тогда толщина пленки жидкости на поверхности цилиндра:

$$\delta_{пл} = \left( \frac{U_{жс} d_{ц} \nu_{жс}}{g} \right)^{1/3}. \quad (33)$$

Анализ литературных данных по определению толщины пленки показывает, что показатели степени при членах уравнения (33) соответствуют диапазону изменения этих показателей, полученных авторами для систем с различными физико-химическими свойствами и аппаратов различных конструкций.

Результаты исследования поверхности контакта фаз в аппарате с призматической насадкой круглого поперечного сечения, в зависимости от скорости газового потока показали, что повышение  $W_{г}$  приводит к увеличению поверхности контакта фаз, отнесенной к сечению аппарата  $A$  и к объему аппарата  $a$ . Такой значительный рост обусловлен повышением интенсивности пульсаций, степени турбулентности газожидкостного слоя и количества жидкости, удерживаемой аппаратом.

При увеличении плотности орошения значения (а) растут за счет все большего количества жидкости, участвующей в процессе. Приращение значений ПКФ более значительно при скоростях газового потока 4-5 м/с, чем 2-3 м/с, т.е. проведение процесса массообмена предпочтительнее в режиме развитой турбулентности.

Суммарная поверхность контакта фаз (ПКФ) может быть определена как: