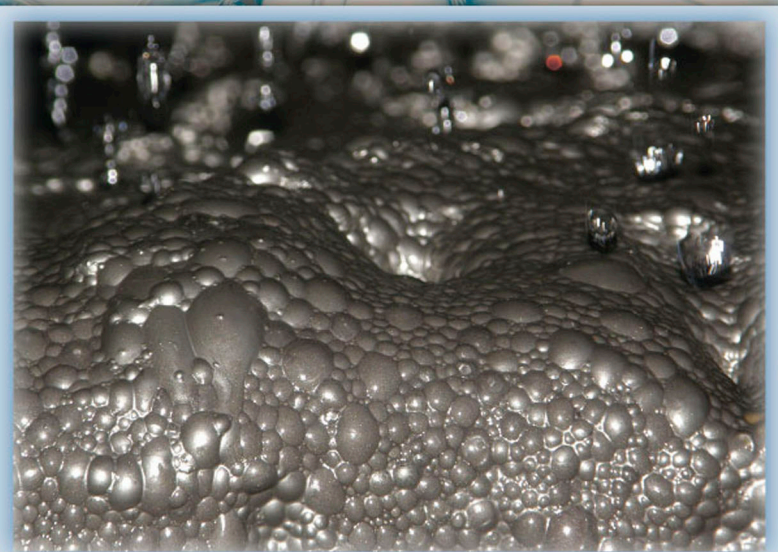


ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНИКА ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ ПЕНЫ



А.Г. Ветошкин



Инфра-Инженерия

УДК 66.069.89: 663.14.036

ББК 24.1

В39

Ветошкин А.Г.

В39 Физические основы и техника процессов сепарации пены : научн. изд. /
А.Г.Ветошкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 404 с.

ISBN 978-5-9729-0111-1

Рассмотрены физико-химические основы процессов, лежащие в основе сепарации пены на исходные фазы при воздействии физико-механических факторов и различных физических полей, включая акустическое, электрическое и термическое. Большое внимание уделяется капиллярным свойствам пены, гидромеханическим процессам течения и разрушения пены в каналах и в окрестности твердых поверхностей. На основе предложенной классификации механических пеногасителей подробно рассмотрены вопросы моделирования и расчета процессов разделения и разрушения пены в статических и динамических пеногасителях. С учетом предложенных моделей приведены методики и примеры расчета механических пеногасителей различных типов, даны анализ их работы и технико-экономическая оценка.

Рассмотрены механизмы акустического, электрического и термического воздействий на пенную структуру, приведена укрупненная оценка их эффективности.

Большое внимание уделено рассмотрению конструкций физико-механических пеногасителей и вопросов применения различных способов и устройств для механического и физического пеногашения в технологических процессах.

Книга может представлять интерес для специалистов различных отраслей промышленности: нефтедобывающей, горнорудной, химической, пищевой, химико-фармацевтической, строительной, для студентов вузов различных направлений подготовки. Материалы книги могут быть применены при проектировании технологических процессов и оборудования, где используются газо-жидкостные системы.

© Ветошкин А.Г., 2016

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2016

ISBN 978-5-9729-0111-1

Глава 1. Капиллярная гидродинамика пены

Гидродинамика пены включает в себя внутреннюю задачу капиллярной гидродинамики, и течение пены по трубопроводам и насадкам как внешнюю задачу. При этом, вследствие неустойчивости пены во времени, эти задачи являются взаимосвязанными и характерные для них явления протекают одновременно.

1.1. Модели гидропроводности пены

Для внутренней задачи гидродинамики пены целью рассмотрения является определение скорости процесса синерезиса (дренажа) жидкости из пены.

Вопросы капиллярной гидродинамики являются основополагающими при изучении устойчивости пенной структуры в силовых полях различной физической природы. Явление синерезиса, сопровождающее стадии образования и существования газожидкостной пены, влияет на ее основные структурные и гидромеханические свойства, и синерезис можно рассматривать в качестве характеристики гидродинамической устойчивости пены [1]. В свою очередь, синерезис существенным образом зависит от гидропроводности пенной среды, т. е. от ее структурных параметров.

К основным структурным параметрам пены относят ее кратность $K = V_n / V_{ж}$ (отношение объема пены V_n к объему ее жидкой фазы $V_{ж}$), объемную плотность пены как обратную величину кратности $\nu = 1 / K = V_{ж} / V_n$; используют также такое понятие как объемное газосодержание пены $\varphi_n = V_g / V_n$ (отношение объема газовой фазы V_g в пене ко всему объему пены V_n). Пену характеризуют также дисперсностью в виде $D_n = 1 / d_n$ (величины, обратной приведенному диаметру пузырька пены d_n), или удельной межфазной поверхностью $s = S / V_n$ (отношением суммарной поверхности S пузырьков, содержащихся в единице объема V_n пены).

Взаимная связь кратности пены с ее газосодержанием устанавливается по зависимости

$$K = \frac{1}{1 - \varphi_n} \quad \text{или} \quad \varphi_n = \frac{K - 1}{K}.$$

Различают [1] пены низкократные ($K < 20$), средней кратности ($20 < K < 200$) и высокократные ($K > 200$).

В зависимости от величины кратности пены, зависящей от формы составляющих ее структурных ячеек (газовых пузырьков), различают сферическую (шаровую), ячеистую и полиэдрическую структуры [1].

Сферическая структура соответствует наиболее плотной упаковке газовых пузырьков пены, имеющих форму шара. Для монодисперсной сферической пены объемное газосодержание составляет величину порядка $\varphi_n \approx 0,74$ (74 %), что соответствует значению кратности $K = 3,86$. Эта величина кратности представляет предел существования сферической структуры пены, ниже которой газожидкостная смесь представляет дисперсию не связанных между собой газовых пузырьков. Удельная поверхность s_0 сферической пены определяется выражением

$$s = 6 / d_n .$$

Ячеистая структура является промежуточной между сферической и полиэдрической пенами. В ячеистой структуре пузырьки пены имеют форму смятых сфер. Утверждается [1], что такая структура наиболее типична для получаемых на практике пен. Диапазон кратности, характеризующий ячеистую структуру, находится в пределах от $K = 4$ до $K = 170$ (нижняя граница полиэдричности пены).

Величина удельной межфазной поверхности ячеистой структуры пены определяется выражением [1]

$$s = 6 D_n \cdot \frac{K-1}{K} ,$$

где $D_n = 1 / d_n$ – дисперсность пены, m^{-1} .

В качестве характеристики взаимодействия пузырьков между собой при переходе сферической структуры в ячеистую в работе [2] вводится параметр τ_s , представляющий напряжения, возникающие по плоскости контакта дисперсной фазы, отнесенные к площади нормального сечения:

$$\tau_s = 2 \sigma \sqrt{\frac{\pi d_n}{4 \varphi_n}} \left(\sqrt{\frac{1}{1 - \varphi_n}} \sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} - 1 \right) .$$

Полиэдрическая структура пены представляет собой дисперсию газовых пузырьков многогранной формы. Полиэдрическая структура пены характеризуется наличием жидких плоскопараллельных пленок, каналов-капилляров Плато-Гиббса на месте контакта трех граней (пленок) и узлов-полостей между четырьмя пузырьками. Полиэдрическая структура пены детально и подробно исследована в ряде работ [3-5].

Для разграничения ячеистой и полиэдрической структурных моделей пены предложены критерии полиэдричности, когда пена начинает приобретать каналовую структуру [6]:

$$a > 5r_s ; a > 10r_k ,$$

где a - длина ребра додекаэдрической ячейки пены; r_s - радиус кривизны сферического мениска в узле пенной структуры; r_k - радиус канала Плато-Гиббса.

Удельная межфазная поверхность в полиэдрической структуре равна суммарной поверхности пленок в единице объема пены:

$$s = \frac{3}{r_k} \cong 6 D_n.$$

В самом общем виде процесс синерезиса жидкой фазы пены может быть описан уравнением Пуазейля при ламинарном течении жидкости со скоростью v_k в цилиндрическом капилляре диаметром d_k и длиной dl под действием перепада давления dp :

$$v_k = \frac{d_k^2}{32\mu_{ж}} \cdot \frac{dp}{dl}.$$

Течение жидкости между пузырьками сферической пены аналогично процессу фильтрования жидкости через зернистый пористый слой. Скорость фильтрации v_ϕ в пористой среде определяется [7] выражением

$$v_\phi = \frac{d_s^2 (1 - \varphi_n)}{32\mu_{ж}} \cdot \frac{dp}{dl}.$$

Значение эквивалентного диаметра d_s каналов в слое структурированной пористой среды можно связать [8] со средним значением диаметра d_n ее ячеек в виде пузырьков с учетом коэффициента формы ячеек Φ соотношением:

$$d_s = \frac{2\Phi(1 - \varphi_n)d_n}{3\varphi_n},$$

С учетом последнего соотношения выражение для скорости синерезиса в сферической пене примет вид

$$v_c = \frac{d_n^2 (1 - \varphi_n)^3}{k_c \mu_{ж} \varphi_n^2} \cdot \frac{dp}{dl},$$

где $k_c = 150...200$ - коэффициент проницаемости пористого слоя сферической пены.

Аналогичный подход используется для определения скорости фильтрации жидкости через слой монодисперсной ячеистой пены, которая рассматривается как своеобразная пористая среда [9]. Коэффициент фильтрации в пористой среде определяется по зависимости Козени-Кармана:

$$k_\phi = (C \mu_{ж} k_s s^2)^{-1}, \quad (1.1)$$

где $C = 2, 4$ - структурный коэффициент; k_3 - кратность засыпки (величина, обратная пористости слоя); s - удельная межфазная поверхность.

Для монодисперсной ячеистой структуры

$$s = \frac{6(K-1)}{d_n K} \cdot f(K), \quad (1.2)$$

где $f(K) = \sqrt{K_{\min} / K}$ - функция кратности: $0 < f(K) < 1$.

С учетом выражений (1.1) и (1.2) скорость синерезиса в ячеистой пене имеет вид

$$v_c = 2,89 \cdot 10^{-3} \frac{d_n^2}{\mu_{ж} (K-1)^2} \cdot \frac{dp}{dl}.$$

Для полиэдрической пены основной вклад в ее гидропроводность вносят каналы Плато-Гиббса [3], образующиеся на стыке трех ячеек, имеющие в поперечном сечении форму сферических треугольников с радиусом кривизны r_k (рис. 1.1).

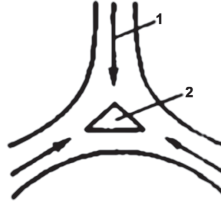


Рис.1.1. Схема поперечного сечения канала Плато-Гиббса:
1 – пленка жидкости; 2 - канал

Детальный анализ гидропроводности в полиэдрической пене показал [3, 4], что линейная скорость синерезиса в одиночном канале при условии неподвижности его стенок определяется в виде

$$v_k = \frac{C r_k^2}{\mu_{ж}} \cdot \frac{dp}{dl},$$

где $C = 3,3 \cdot 10^{-3}$ – геометрический коэффициент.

Поскольку число каналов, приходящееся на единицу площади пены, пропорционально относительному количеству жидкости $1/K$ на этой площади, а сами каналы в пространстве имеют произвольную ориентацию, то в соответствии с электрогидродинамической аналогией [10] приведенная скорость синерезиса в пене по направлению l выражается формулой

$$v_n = \frac{v_k}{3K} = \frac{C r_k^2}{3\mu_{ж} K} \cdot \frac{dp}{dl}. \quad (1.3)$$

Связь величины r_k с основными структурными параметрами пены установлена [11] из геометрических соображений:

$$r_k^2 = \frac{d_n^2}{4C_k K},$$

где $C_k = 0,33$ - геометрический коэффициент.

Тогда уравнение (1.3) принимает вид

$$v_n = 8,25 \cdot 10^{-4} \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K^2} \cdot \frac{dp}{dl}.$$

Градиент давления в центробежном поле для полиэдрической структуры определяется в виде

$$\frac{dp}{dl} = \rho_{ж} \omega^2 r - p_{\sigma},$$

где ω - угловая скорость вращения ротора; r - текущий радиус вращения; $p_{\sigma} = \sigma / r_k$ - капиллярное давление в каналах Плато-Гиббса.

Существование ламинарного режима синерезиса в пористой среде определяется [12] по условию

$$Re_{ж} = \frac{2\Phi(1-\varphi_n)}{3\varphi_n} \cdot \frac{v_{ж} d_n \rho_{ж}}{\mu_{ж}} < 50.$$

В общем случае по закону Дарси уравнение синерезиса, выраженное в векторной форме через плотность потока жидкости в пене \vec{q}_{ϕ} (аналог скалярной величины скорости синерезиса или скорости фильтрации v_{ϕ}), имеет следующий вид

$$\vec{q}_{\phi} = H_r \vec{F}_{\phi},$$

где H_r - коэффициент локальной гидропроводности пены, $m^4/(Hc)$; \vec{F}_{ϕ} - движущая сила процесса синерезиса, H/m^3 .

Движущая сила \vec{F}_{ϕ} процесса синерезиса складывается из внешней силы $\rho \vec{g}$ и противоположно направленного капиллярного разрежения $\text{grad} \Delta p_k$ [13]:

$$\vec{F}_{\phi} = \rho \vec{g} - \text{grad} \Delta p_k = \rho \vec{g} + \frac{\partial p_k}{\partial z},$$

где $p_k = p_n - \sigma / r_k$; p_n - давление внутри пузырька.

Для гравитационного поля $\vec{g} = g$, при действии на систему поля центробежных сил $\vec{g} = \omega^2 r$.

Гидростатическое равновесие в пене, отвечающее прекращению синерезиса ($\bar{q}_\phi = 0$), устанавливается при равенстве внешней силы и градиента капиллярного разрежения:

$$\bar{\rho} g + \frac{\partial p_k}{\partial z} = 0.$$

Для состояния равновесия полиэдрической структуры пены в однородном гравитационном поле получено [14] параболическое распределение локальной кратности $K(z)$ по высоте z газожидкостного столба:

$$K(z) = \left(\sqrt{K|_{z=0}} - \frac{\rho g r_n}{\sigma \sqrt{C_k}} \cdot z \right)^2.$$

Состояние равновесия полиэдрической структуры пены в центробежном поле в случае контакта пены с раствором описывается [14] параболой четвертого порядка:

$$K(r) = \left(\sqrt{K|_{r=0}} - \gamma_\omega r^2 \right)^2,$$

где параметр $\gamma_\omega = \frac{\rho r_n \omega^2}{2\sigma \sqrt{C_k}}$.

Коэффициент локальной гидропроводности (фильтрации) монодисперсной сферической пены получен в работе [1] с использованием гидродинамической аналогии фильтрации в пористых средах:

$$H_{г.с} = \frac{d_n^2}{36 C \mu_{ж} K (K-1)^2}, \quad (1.4)$$

где $C = 5,25 B / (K-1) = 2,63$ - константа Козени-Кармана; $B = 1,5$ - структурный коэффициент для сферической пены.

Гидропроводность ячеистой структуры монодисперсной пены также определена в работе [1] с использованием соотношений Козени-Кармана:

$$H_{г.я} = 2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} (K-1)^2}. \quad (1.5)$$

В работах [3, 5] показано, что гидропроводность полиэдрической пены имеет преимущественно каналový характер и принята следующая зависимость

$$H_{г.п} = 8,25 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_n^2 \nu^2}{\mu_{ж}}. \quad (1.6)$$

где $\nu = 1/K$ - объемная плотность (влагосодержание) пены.

Путем анализа локальной гидропроводности канала Плато-Гиббса в работе [15] получено близкое значение:

$$H_{r,n} = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K^2}. \quad (1.7)$$

Исходя из результатов работ [16, 17], в работе [18] использовано значение средней скорости течения жидкости в канале Плато-Гиббса с сечением, отличным от цилиндрической формы:

$$H_{r,n} = 1,37 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{r_k^4 \varphi_n^2}{\mu_{ж} d_n^2}, \quad (1.8)$$

где $\varphi_n = \frac{K-1}{K}$.

В работах [4, 19] по исследованию синерезиса в полиэдрической пене использовалась модифицированная модель Леонарда-Лемлиха:

$$q_\phi = 0,16 \cdot k_n F_\phi \frac{r_k^4}{\mu_{ж}}, \quad (1.9)$$

где геометрический коэффициент $k_n = 3,3 \cdot 10^{-3}$.

Связь радиуса канала с геометрическими и структурными параметрами полиэдрической пены установлена в работе [3]:

$$r_k^2 = \frac{d_n^2 (1 - \varphi_n)}{C_n}, \quad (1.10)$$

где геометрический коэффициент полиэдрической пены $C_n = 1,26$.

Используя связь (1.10) и выражая газосодержание пены через ее кратность, получено иное выражение формулы (1.8):

$$H_{r,n} = 8,62 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_n^2 (K-1)^2}{\mu_{ж} K^4}. \quad (1.11)$$

Для больших значений кратности формула (1.11) практически совпадает с формулой (1.7).

Дальнейшее развитие представлений С.Хартланда и А.Барбера [18] получило в работе [20], где в значении приведенной скорости стекающей жидкости учтена подвижность стенок канала Плато-Гиббса:

$$H_{r,n} = 8,845 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{r_k^4 \varphi_n^2}{k \mu_{ж} d_n^2}, \quad (1.12)$$

где $k = 3$ - коэффициент скорости.

Использование в уравнении (1.12) связи (1.10) дает для этого случая значение коэффициента гидропроводности:

$$H_{г.п} = 1,86 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_n^2(K-1)^2}{\mu_{ж}K^4}, \quad (1.13)$$

которое для больших значений K имеет общий вид с выражениями (1.6) и (1.7), но величина числового коэффициента формулы (1.13) почти в 2 раза больше, что согласуется с экспериментальными данными [4], где примерно при $r_k \geq 5 \cdot 10^{-5}$ м (что соответствует $K > 400$ при величине среднего радиуса пузырька пены $r_n = d_n / 2 = 6,3 \cdot 10^{-4}$ м) качественно подтверждается ход зависимости (1.13), после чего скорость синерезиса начинает резко уменьшаться, что можно объяснить как увеличением жесткости границ каналов Плато-Гиббса, так и возрастающим влиянием гидропроводности утончающихся пленок пены.

В работах Десаи и Кумара [21] для оценки степени подвижности поверхностей используется величина $\beta = f(\alpha)$, которая представляет собой отношение скорости течения раствора ПАВ с учетом подвижной поверхности к скорости течения с неподвижными стенками канала Плато. Величина $\alpha = \frac{0,176\mu r_k}{\mu_s}$, где μ и μ_s - динамическая (Па·с) и поверхностная (Н·с/м) вязкость раствора ПАВ; r_k - радиус канала Плато, м.

В работе Нгуйена [22] из точного решения уравнения Навье-Стокса получена формула для расчета объемной скорости течения раствора ПАВ по каналу Плато с учетом подвижности поверхности для локального слоя пены:

$$Q = \frac{k r_k^4}{\mu} \cdot \frac{dp_\sigma}{dl} \left(\frac{a \cdot \frac{1}{\sqrt{B_0}}}{C + B_0^{0,628}} + 0,02 \right), \quad (1.14)$$

где $\frac{dp_\sigma}{dl}$ - градиент капиллярного давления; $C = 0,209$; $k = 0,026$; $a = 0,0655$; $B_0 = \frac{\mu_s}{\mu r_k}$ (число Буссинеска, безразмерная величина).

В работе [23] представлены результаты расчета профиля канала Плато в предположении подвижной поверхности. С учетом величины поверхностной вязкости, подвижности поверхностей, параметра $\beta = \frac{Q}{Q_m}$ и линейной зависимости $\beta = 1 + 5,4 \alpha^{0,5}$ (полученной на основе данных работ Десаи, Кумара), была рассчитана объемная скорость течения раствора ПАВ по каналу Плато

$$Q = \frac{0,16f}{\mu} \cdot \frac{dp_\sigma}{dl} \cdot r_k^4 (1 + 5,4 \alpha^{0,5}) \quad (1.15)$$

и на ее основе было определено изменение радиуса канала Плато по его длине:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{L} \cdot \left(r_{\max}^3 - r_{\min}^3 + 3 \cdot 1,98 \cdot r_{\max}^3 \sqrt{\frac{\mu r_{\max}}{\mu_s}} - 3 \cdot 1,98 \cdot r_{\min}^3 \sqrt{\frac{\mu r_{\min}}{\mu_s}} \right) + \\ & + r_{\min}^3 + 1,98 \cdot r_{\min}^3 \sqrt{\frac{\mu r_{\min}}{\mu_s}} = r_{\kappa}^3 \left(1 + 1,98 \sqrt{\frac{\mu r_{\kappa}}{\mu_s}} \right). \end{aligned} \quad (1.16)$$

Здесь f - геометрический коэффициент; r_{\max} и r_{\min} - максимальный и минимальный радиусы канала Плато.

С использованием уравнения Нгуйена (1.14) также получена формула для расчета профиля канала Плато с учетом подвижной поверхности:

$$\begin{aligned} & \frac{k \sigma a r_{\kappa}^3 \left(\frac{\mu r_{\kappa}}{\mu_s} \right)^{1,13}}{4,13 \mu l} + \frac{5,2 \cdot 10^{-4} \sigma r_{\kappa}^3}{3 \mu l} = \frac{k \sigma a r_{\min}^3 \sqrt{\frac{\mu r_{\min}}{\mu_s}}}{4,13 \mu l} + \frac{5,2 \cdot 10^{-4} \sigma r_{\min}^3}{3 \mu l} + \\ & + \frac{k \sigma a r_{\kappa}^3 \left(\frac{\mu r_{\max}}{\mu_s} \right)^{1,13}}{4,13 \mu L} - \frac{k \sigma a r_{\min}^3 \left(\frac{\mu r_{\min}}{\mu_s} \right)^{1,13}}{4,13 \mu L} + \frac{5,2 \cdot 10^{-4} \sigma (r_{\max}^3 - r_{\min}^3)}{3 \mu L}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Для расчета теоретической объемной скорости течения растворов ПАВ по каналу Плато с учетом величины поверхностной вязкости и подвижности поверхностей в работе [23] использовали полученные формулы (1.16) и (1.17) с помощью зависимостей Десаи, Кумара (1.15) и Нгуйена (1.14):

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{0,16 \cdot f \cdot \sigma (r_{\max}^3 - r_{\min}^3)}{3 \mu L} \cdot (1 + 5,4 \alpha^{0,5}); \\ Q_2 &= \frac{k \sigma a r_{\max}^3 \left(\frac{\mu r_{\max}}{\mu_s} \right)^{1,13} - k \sigma a r_{\min}^3 \left(\frac{\mu r_{\min}}{\mu_s} \right)^{1,13}}{4,13 \mu L} + \frac{5,2 \cdot 10^{-4} \sigma (r_{\max}^3 - r_{\min}^3)}{3 \mu L}. \end{aligned}$$

Анализ существующих модельных представлений по гидропроводности пены различной структуры показывает, что в основном используются два концептуальных подхода. Для сферической и ячеистой структур пены используется концепция фильтрации в пористом слое между газовыми пузырьками по аналогии с моделью Козени-Кармана. Для полиэдрической пены применяется концепция каналовой гидропроводности как аналог модели Пуазейля.

В общем случае для пен с различной структурой в качестве исходной предпосылки используется [24] значение коэффициента гидропроводности из уравнения Пуазейля

$$H_r = \frac{d_r^2}{32 \mu_{ж}}, \quad (1.18)$$

где d_r - гидравлический диаметр межпузырькового пространства, м.

Для сферической пены значение гидравлического диаметра свободного сечения пространства между газовыми пузырьками по аналогии с зернистым слоем выражается соотношением

$$d_r = 4 \frac{1 - \Phi_n}{s},$$

где $s = \frac{6}{\Phi d_n}$ - удельная поверхность пены; Φ - фактор формы пузырьков.

Поскольку для сферических пузырьков $\Phi_c = 1$, то значение гидропроводности (1.18) в плоском сечении в окрестности сферического пузырька определяется по формуле

$$H_{r,c} = \frac{d_n^2 (1 - \Phi_n)^2}{72 \Phi_n^2 \mu_{ж}}. \quad (1.19)$$

Кривизна каналов-капилляров между пузырьками снижает полученное по формуле (1.19) значение коэффициента гидропроводности.

Для определения влияния кривизны капилляров используется [25] электрогидродинамическая аналогия оценки структуры пены, при этом по данным работы [25 24] для сферической структуры пены значение коэффициента электропроводности $B_c = 1,5$. Поскольку число каналов-капилляров между пузырьками, приходящееся на единицу площади пены, пропорционально относительному количеству жидкости на этой площади $(1 - \Phi_n)$, то фиктивная или приведенная гидропроводность в сферической пене определяется выражением

$$H_{r,c} = H_r \frac{1 - \Phi_n}{B_c} = \frac{d_n^2 (1 - \Phi_n)^3}{72 B_c \Phi_n^2 \mu_{ж}}$$

или в терминах кратности пены:

$$H_{r,c} = \frac{d_n^2}{108 \mu_{ж} K (K - 1)^2}. \quad (1.20)$$

Сравнение значений коэффициентов гидропроводности по формулам (1.4) и (1.20) показывает, что они совпадают с точностью до числового коэффициента, и относительная ошибка определения коэффициента гидропроводности по этим формулам составляет 12 %.

Поскольку ячеистая пена занимает промежуточное положение между сферической и полиэдрической структурами, проведено [24] сопоставление коэффициентов гидропроводности, полученных с использованием двух концепций гидропроводности.

В соответствии с концепцией фильтрации в пористом слое исходное уравнение си-
нерезиса имеет вид, аналогичный уравнению (1.18), но при определении гидравлического
диаметра учитывается, что фактор формы пузырьков ячеистой пены $\Phi_{я} < 1$, а его числен-
ное значение получено как промежуточное значение

$$\Phi_{я} = (\Phi_c + \Phi_n) / 2 = 0,956,$$

где $\Phi_n = 0,912$ - коэффициент формы полиэдрической пены.

Для ячеистой пены величина коэффициента электропроводности также принимается
как среднее значение

$$B_{я} = (B_c + B_n) / 2 = 2,25,$$

где $B_n = 3$ - коэффициент электропроводности полиэдрической пены.

Приведенный коэффициент гидропроводности для этого случая определяется по
формуле

$$H_{г.я} = \frac{\Phi_{я}^2}{72 B_{я}} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K (K-1)^2} = 5,63 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K (K-1)^2}. \quad (1.21)$$

При использовании концепции каналовой гидропроводности для ячеистой пены в
качестве исходного принимается аналог уравнения Леонарда-Лемлиха [20]:

$$H_{г.я} = \frac{a_p^2}{2m\mu_{ж}},$$

где $a_p = 0,205r_k$; $m = 6,43$.

Значение структурного коэффициента a_p в связи (1.10) получено [24] путем экстра-
поляции зависимости (1.10) в область сферической пены, что означает $2r_k = d_n$, в этом
случае $C_c = 1,036$ и $C_n = 1,26$.

Для ячеистой пены принято среднее значение

$$C_{я} = (C_c + C_n) / 2 = 1,15.$$

С учетом этих величин структурных параметров ячеистой пены получено значение
гидропроводности одного канала Плато-Гиббса:

$$H_{г.к} = 1,83 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d_n^2}{m\mu_{ж} K},$$

а также приведенного коэффициента гидропроводности ячеистой пены:

$$H_{г.я} = \frac{H_{г.к}}{B_{я} K} = 1,265 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K^2}. \quad (1.22)$$

Используя аналогичный подход для полиэдрической пены, получено [24] значение гидропроводности одного канала Плато-Гиббса:

$$H_{r,k} = 3,345 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d_n^2}{2m\mu_{ж}K}.$$

С учетом кривизны каналов в слое пены значение приведенного коэффициента гидропроводности полиэдрической пены определено по формуле

$$H_{r,n} = \frac{H_r}{B_n K} = 8,65 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K^2}, \quad (1.23)$$

которая практически совпадает с формулой (1.7).

При использовании в работе [26] модифицированной модели Леонарда-Лемлиха в соответствии с уравнением (1.9) коэффициент гидропроводности одного канала Плато-Гиббса определяется по формуле

$$H_r = k_n \frac{r_k^2}{\mu_{ж}}.$$

Учитывая произвольную ориентацию каналов в пространстве, приведенный коэффициент гидропроводности в направлении действия массовой силы выражается по аналогии с (1.23):

$$H_{r,n} = \frac{H_r}{B_n K} = \frac{k_n}{B_n} \cdot \frac{r_k^2}{\mu_{ж} K}. \quad (1.24)$$

С учетом связи (1.10) уравнение (1.24) принимает вид

$$H_{r,n} = 8,32 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{d_n^2}{\mu_{ж} K^2}, \quad (1.25)$$

что практически совпадает с зависимостью (1.6).

Графическая интерпретация основных зависимостей коэффициента гидропроводности для различных структурных форм пены представлена на рисунке 1.2.

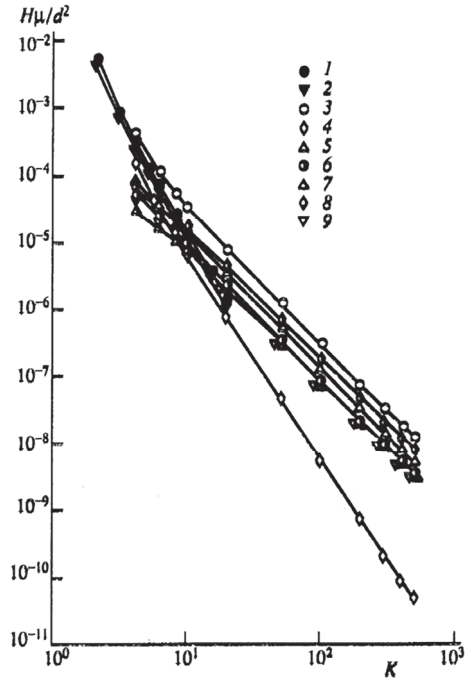


Рис. 1.2. Зависимость приведенной гидропроводности пены от кратности K . Модельные уравнения: 1 - (1.4); 2 - (1.20); 3 - (1.5); 4 - (1.21); 5 - (1.22); 6 - (1.7), (1.23); 7 - (1.11); 8 - (1.13); 9 - (1.6), (1.25)

Расчет коэффициента гидропроводности сферической пены проведен [24] в пределах значений кратности пены от $K = 2$ до $K = 20$, гидропроводность ячеистой и полиэдрической структур пены рассчитана в диапазоне $K = 4...500$. Верхняя граница кратности $K = 500$ принята из практических соображений, а именно, из условия незначительного влияния градиента капиллярного давления по высоте пенного слоя в принятом диапазоне кратности пены.

Ход представленных на рис.1.2 зависимостей показывает, что для сферической пены коэффициент гидропроводности по формулам (1.4) и (1.20) с ростом кратности пены снижается гораздо интенсивнее, чем гидропроводность ячеистой и полиэдрической структур, исключая зависимость (1.21), полученной с использованием концепции гидропроводности пористого слоя, при этом наклон этой кривой практически совпадает с наклоном для сферической пены, но она расположена ниже последней.

Значения гидропроводности ячеистой пены по зависимости (1.5) выше значений этой характеристики для зависимости (1.22), полученной на основе концепции каналовой гидропроводности, и существенно выше значений, полученных по формуле (1.21), а также выше значений гидропроводности полиэдрической пены. Для ячеистой пены зависимость (1.5) согласуется с зависимостями (1.4) и (1.20) для сферической пены при значении кратности $K = 4$, а зависимость (1.22) для ячеистой структуры согласуется с ними уже при значении кратности $K = 9...10$.

Для полиэдрической структуры пены согласование величин гидропроводности по формуле (1.13) с зависимостями (1.4) и (1.20) для сферической пены происходит также при этих значениях кратности, для гидропроводности по формулам (1.7) и (1.23) - при значении кратности $K = 12$ и $K = 13$, а по формуле (1.11) - при $K = 16$.

Учитывая, что зависимости (1.5) для ячеистой пены и (1.13) для полиэдрической пены имеют экспериментальное подтверждение в достаточно широком диапазоне кратности пены, рекомендуется [24] эти зависимости для расчета коэффициента гидропроводности пены вплоть до значения $K = 500$.

1.2. Гидропроводность полидисперсной пены

Большинство аналитических моделей каналовой гидропроводности пены, в частности, модели Кротова [3, 5], Леонарда-Лемлиха [16, 17], Хартланда-Барбера [18], Штейнера-Ханкелера-Хартланда [20], получены для монодисперсной полиэдрической пены, когда сечение канала Плато-Гиббса рассматривается в форме равнобедренного сферического треугольника. Фактически пена имеет полидисперсную структуру, т. е. состоит из пузырьков разных размеров. В работе [27] предложена функция распределение пузырьков пены по размерам в виде

$$\Phi = \frac{12\beta d_n}{(1 + \beta d_n^2)^4},$$

где β - параметр функции распределения.

Учет полидисперсности при расчете гидропроводности сферической и ячеистой пены [28] показывает, что коэффициент гидропроводности в этом случае существенно снижается из-за появления в узлах пенной структуры более мелких пузырьков.

В шаровой пене пузырьки меньших фракций занимают зазоры между пузырьками более крупных фракций. С ростом количества фракций кратность шаровой пены растет медленно. С ростом кратности сферической пены растет и ее полидисперсность. Поэтому предлагается [1] использовать величину кратности как меру полидисперсности шаровой пены.

Вследствие сложности формы структурных элементов ячеистой пены дисперсность таких систем характеризуют [1] понятием «эквивалентного сферического пузырька», объем которого равен объему пузырька ячеистой структуры, а ансамбль эквивалентных пузырьков представляет «эквивалентную пену».

Полидисперсность ячеистой пены характеризуется [1] количественным критерием в виде «минимальной кратности» K_{\min} эквивалентной пены. Минимальная кратность ячеистой пены - это кратность шаровой пены с тем же распределением «эквивалентных сферических пузырьков» по размерам. Минимальная кратность K_{\min} любой пены может служить количественной характеристикой степени ее полидисперсности, поскольку полидисперсность ячеистой пены и ее эквивалентной пены одна и та же.

Практически полидисперсность реальных пен такова, что минимальная кратность эквивалентной пены находится в пределах $K_{\min} = 10 \dots 20$.

В полиэдрической пене с монодисперсной структурой и тонкими пленками площадь сечения одного канала Плато-Гиббса (рис. 1.3) без учета площади сечения трех сопряженных пленок равна

$$S_k = k r_k^2, \quad (1.26)$$

где $k = 0,1612$.

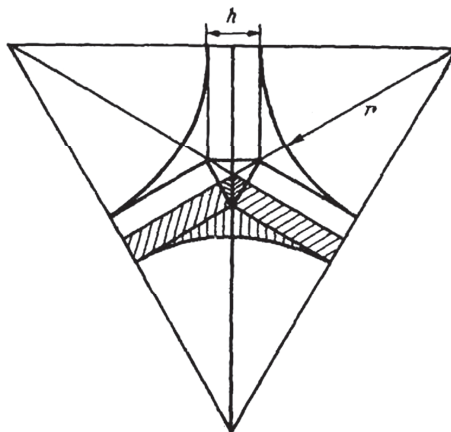


Рис. 1.3. Сечение канала Плато-Гиббса

Учитывая полидисперсный характер реальной пены, в качестве геометрической модели канала Плато-Гиббса в работе [29] рассматривается зазор между тремя касающимися модельными цилиндрами, имеющими различные радиусы кривизны (рис. 1.4).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Капиллярная гидродинамика пены.....	5
1.1. Модели гидропроводности пены.....	5
1.2. Гидропроводность полидисперсной пены.....	18
Глава 2. Реологические свойства пены.....	25
2.1. Реологические модели пены.....	25
2.2. Гидродинамическая идентификация реологии пены.....	35
2.3. Реологическая модель пены с учетом синерезиса.....	39
2.4. Экспериментальные исследования реологии пены.....	43
Глава 3. Гидродинамика и гидромеханика пены.....	57
3.1. Конвективный синерезис в потоке пены.....	57
3.2. Гидродинамические характеристики течения пены.....	65
3.3. Течение пены в трубопроводах.....	71
3.4. Режимы течения пены в сопловых насадках.....	81
3.5. Реомеханические свойства пены.....	94
Глава 4. Классификация способов и устройств для гашения пены.....	104
4.1. Основные способы ограничения пенообразования и гашения пены.....	104
4.2. Обобщенная классификация механических пеногасителей.....	105
4.3. Классификация статических фильтрующих, гидромеханических и струйных пеногасителей.....	109
4.4. Классификация динамических роторных пеногасителей.....	111
4.5. Основы статической и динамической сепарации пены.....	114
Глава 5. Моделирование и расчет статических фильтрующих и гидромеханических пеногасителей.....	120
5.1. Моделирование и расчет осадительных фильтрующих пеноразделителей.....	120
5.2. Моделирование и расчет процессов разделения пены в гидромеханических пеногасителях.....	129
5.2.1. Разрушение пены в трубопроводах и сопловых насадках.....	131
5.2.2. Циклонирование пены и газовой эмульсии.....	135
Глава 6. Моделирование и расчет струйных пеногасителей.....	148
6.1. Моделирование и расчет пеногасителей с продольно-круглой струей.....	149

6.2. Расчет пеногасителя с радиально-всерединной струей.....	155
6.3. Расчет инжекционного пароструйного пеногасителя.....	161
Глава 7. Моделирование и расчет роторных деформационных пеногасителей.....	172
7.1. Оценка параметров лопастных пеногасителей.....	172
7.2. Моделирование и расчет дисковых пеногасителей.....	181
7.3. Расчет параметров барабанных пеногасителей.....	199
Глава 8. Моделирование и расчет центробежных роторно-тарельчатых пеноразделителей.....	208
8.1. Осаждение жидкости из пены в центробежном поле.....	211
8.2. Теоретические основы процесса центробежного разделения пены.....	217
8.3. Гидродинамика пены в центробежном роторно-тарельчатом пеногасителе.....	223
8.4. Взаимодействие потоков в центробежном пеногасителе с коническими тарелками.....	227
8.5. Расчет основных параметров центробежных роторно-тарельчатых пеноразделителей.....	234
Глава 9. Анализ работы механических пеногасителей.....	248
9.1. Анализ условий работы механических пеногасителей.....	248
9.2. Автоколебательная модель процесса при механическом пеногашении.....	255
9.3. Анализ эффективности работы механических пеногасителей.....	262
Глава 10. Сферы применения и оценка технико-экономической эффективности оборудования для сепарации пены.....	271
10.1. Области применения механических пеногасителей.....	271
10.2. Критерии и показатели эффективности работы механических пеногасителей.....	274
10.3. Оценка технико-экономической эффективности механических пеногасителей.....	283
Глава 11. Физические методы пеногашения.....	289
11.1. Классификация физических методов и устройств для пеногашения.....	289
11.2. Закономерности физических воздействий на газожидкостные системы.....	291
11.2.1. Механизм акустического воздействия на пену.....	292
11.2.2. Влияние электрического поля на устойчивость газожидкостных систем.....	296
11.2.3. Термический и термодинамический способы разделения пены.....	301
11.3. Основы расчета физических пеногасителей.....	304
11.4. Эффективность физических методов разделения пены.....	305
11.5. Физико-химические способы пеногашения.....	316

Глава 12. Техника и технология сепарации пены.....	319
12.1. Гидромеханические пеногасители.....	319
12.2. Струйные пеногасители.....	333
12.3. Роторные пеногасители.....	340
12.3.1. Дисковые пенорегуляторы.....	344
12.3.2. Центробежные пеноразделители.....	348
12.3.3. Барабанные пеноразрушители.....	354
12.4. Комбинированные механические пеногасители.....	359
12.5. Способы и конструкции устройств и аппаратов для разделения пены физическими методами.....	363
12.5.1. Акустические деаэраторы-пеногасители.....	363
12.5.2. Электрические устройства-пеногасители.....	367
12.5.3. Термические пеногасители.....	377
Заключение.....	382
Список литературы.....	384