EDN: https://elibrary.ru/EXXZPA DOI: https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.54

УДК 614.843.8

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ КРАТНОСТИ, ДИСПЕРСНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕН НИЗКОЙ КРАТНОСТИ

Камлюк А.Н.

Цель. Теоретически оценить влияние основных факторов, влияющих на кратность, дисперсность и устойчивость воздушно-механической пены, получаемой в устройствах для пожаротушения.

Методы. В процессе исследований применялись теоретические и эмпирические методы анализа.

Результаты. В результате анализа теоретических и экспериментальных данных по исследованию пен выявлены основные факторы, влияющие на численные значения их кратности, дисперсности и устойчивости. Установлено, что кратность, дисперсность и устойчивость таких пен существенно зависят от способа генерирования, геометрических характеристик устройств, скорости подаваемого раствора пенообразователя и его физико-механических свойств.

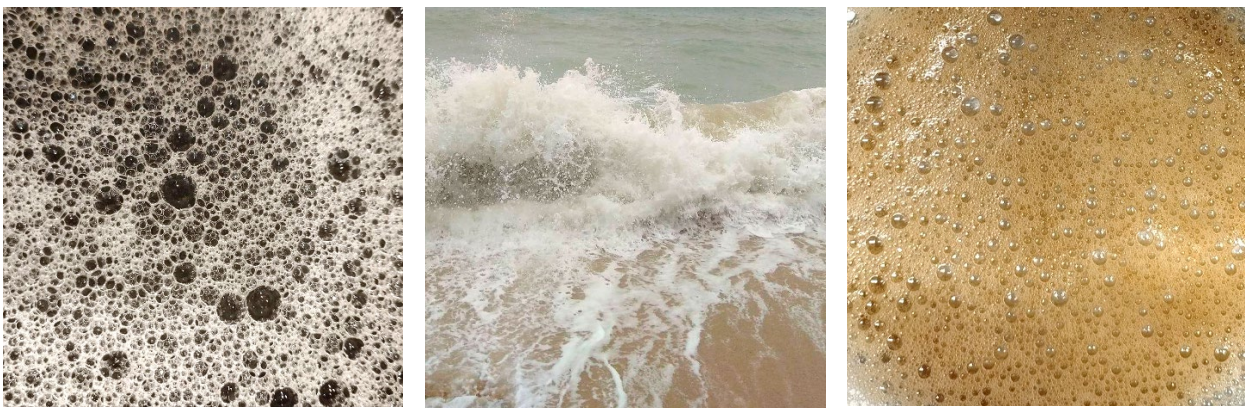
Область применения исследований. Результаты анализа могут быть применены при разработке пеногенерирующих устройств, а также для определения оптимальных режимов их работы.

Ключевые слова: пена, кратность, устойчивость, дисперсность, средний диаметр пузырька, газосодержание, капиллярное число, показатель смачивающей способности.

(Поступила в редакцию 13 января 2025 г.)

Введение

Люди регулярно встречаются с воздушно-механическими пенами (далее – пена) в своей повседневной деятельности – это может быть пена моющего средства 1*а*, морская пена 1*б* или пена кваса 1*в*. Пена как технологическая среда используется для повышения отдачи подземных пластов в добыче нефти и газа, во флотационных процессах обогащения полезных ископаемых и концентрировании биомассы при производстве продуктов биосинтеза, при очистке сточных вод, в качестве защитного противопылевого средства при проведении подземных работ, для смягчения последствий воздействия ударных волн от взрывов, а также как средство пенного пожаротушения [1, с. 3]. По всем этим направлениям в настоящее время активно ведутся исследования [2–8].



а *б* *в*

Рисунок 1. – Пена низкой кратности в повседневной жизнедеятельности

Систематическое изучение физико-химических свойств пен и пенных пленок началось более 150 лет назад, базируясь на первых работах бельгийского ученого Ж. Плато о мыльных пленках. Несмотря на это, работы прикладного характера появились совсем недавно – книги с описанием основных характеристик, а также механизмов образования и разрушения пен –

Э. Манегольда (1963 г.), Я. Бикермана (1973 г.) и В.К. Тихомирова (1975 г.), что связано со сложностью математического описания указанных процессов.

К основным характеристикам пен относятся кратность, устойчивость и дисперсность (рис. 2). Под кратностью понимают отношение объема получаемой пены к объему водного раствора пенообразователя (далее – раствор), из которого она получена. В отношении устойчивости пен различают следующие ее показатели: устойчивость объема (время разрушения 25 % ее первоначального объема), устойчивость к синерезису (время выделения из пены 50 % жидкой фазы), структурная устойчивость (время изменения среднего диаметра пузырька на 25 % от исходной величины) и др. Что же касается дисперсности – это физическая величина, обратно пропорциональная среднему диаметру пузырьков.

Рисунок 2. – Основные характеристики пены

На кратность, устойчивость и дисперсность пен существенное влияние оказывают физико-механические свойства раствора, способ смешения фаз, конструкция пеногенерирующего устройства, а также способы пенообразования. Тем не менее все указанные характеристики пены связаны между собой и зависят в первую очередь от газосодержания, смачивающей способности раствора и капиллярных явлений (рис. 2). Под пеногенерирующими в данной работе понимают устройства, способные генерировать пену, независимо от конструктивных особенностей и способа подачи раствора и воздуха.

Какая характеристика является доминирующей, сказать сложно – все зависит от области применения пены. Например, как кратность пены влияет на эффективность пожаротушения [9] или как зависит вкус пива от структуры пены, в частности от ее дисперсности, стало понятно только недавно [10; 11]. В зависимости от области применения желаемые свойства пены могут меняться. Для одних случаев требуется устойчивая пена, например, для пожаротушения, а иногда требуется довольно нестабильная пена, например, для очистки жидкости от некоторых органических соединений.

Основная часть

Кратность. По численному значению кратности пены делят на пены низкой ($4 \le K \le 20$), средней ($20 < K \le 200$) и высокой ($K > 200$) кратности. По возможности регулировать численное значение кратности различают пены с регулируемой и нерегулируемой кратностью.

К пенам с нерегулируемой кратностью можно отнести те пены, которые получают путем генерирования на сетке или твердой поверхности за счет взбивания струи раствора пенообразователя. В этих случаях численное значение кратности может быть определено через долю φ объема газа в пене следующим образом [1, с. 5]:

$$K = \frac{1}{1-\varphi}. \qquad (1)$$

К пенам с регулируемой кратностью относятся те пены, пузырьки которых генерируются в среде раствора (барботирование) за счет пропускания через него воздуха преимущественно под давлением от какого-нибудь устройства, например, компрессора (в этом случае пена называется компрессионной) через отверстие в камере смешения. В этом случае [8, с. 163–164]

$$K = 1 + \frac{p_0 + p_{\text{и}}}{p_0} \cdot \frac{\varphi}{1-\varphi}, \qquad (2)$$

где p_0 – атмосферное давление, Па;

$p_{\text{И}}$ – избыточное давление на выходе из компрессора, Па.

Геометрическая форма пузырьков в пене зависит от соотношения объемов газа и жидкости в ней, т.е. от ее кратности, а также от степени полидисперсности и способа упаковки пузырьков. В соответствии с выражением (1) и с учетом границ значения кратности $4 \le K \le 20$ для низкократных пен диапазоном газосодержания будет $0{,}75 \le \varphi \le 0{,}95$. Для компрессионных пен, согласно уравнениям (2), учитывая, что $p_{\text{И}}$ должно быть не менее 100 кПа, получаем следующий диапазон газосодержания: $-\ 0{,}6 \le \varphi \le 0{,}9$. При увеличении $p_{\text{И}}$ газосодержание уменьшается при постоянной кратности (рис. 3).

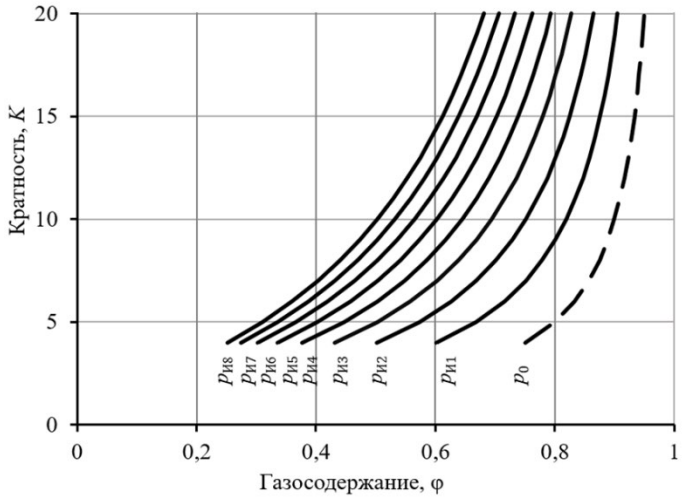


Рисунок 3. – Зависимости кратности *K* пены, полученной при атмосферном давлении p_0, а также при различных избыточных давлениях $p_{\text{И}j} = j \cdot 100$ кПа $(j = 1, ..., 8)$, от газосодержания φ

В работах [12; 13] установлено, что для монодисперсных систем критерием полиэдричности можно считать условие $\varphi \ge 0{,}74$, причем для полидисперсных систем пузырьки газа могут сохранять сферическую форму и при $\varphi < 0{,}74$. Условие $\varphi \ge 0{,}74$ в соответствии с (1) характерно для кратности $K = 4$, что относится к пенам низкой кратности. С другой стороны, по (2) при $K = 4$ газосодержание в зависимости от избыточного давления может меняться от $\varphi = 0{,}75$ $(p_{\text{И}} = 0$ кПа$)$ до $\varphi = 0{,}25$ $(p_{\text{И}8} = 800$ кПа$)$, что в 3 раза меньше минимального газосодержания по (1) (рис. 3). При этом полиэдрическая структура компрессионных пен сохраняется при значительно низких значениях φ по сравнению с обычными пенами. Таким образом, избыточное давление оказывает существенное влияние на газосодержание, а следовательно, и на форму получаемых пузырьков пены.

Самый простой способ оценить кратность пены – использование формул (1) или (2). При этом не имеет значения, какой способ генерирования пены используется: выдувание пузырьков на сетке, барботирование раствора пенообразователя газом или взбивание струи на твердой поверхности. Однако генерировать пену с фиксированным значением газосодержания возможно только для случая барботирования раствора газом, например, при получении компрессионной пены [8, с. 163–164]. В любом другом случае газосодержание является неизвестным параметром, поэтому для расчета кратности необходимо использовать специальные регрессионные модели или иные эмпирические зависимости, которые включают критерии подобия [14].

Связь между кратностью пены со средним диаметром пузырька $d_{\text{п}}$ (м) установлена исходя из геометрических подходов и представляет собой следующее выражение:

– для шаровой пены [8, с. 46]

$$K = \frac{d_{\text{п}}}{3\delta}, \tag{3}$$

– для полиэдрической пены [15]

$$K = \frac{0,76 d_{\text{п}}^2}{r_{\text{к}}^2}, \qquad (4)$$

где δ – толщина пленки пузырька, м;

$r_{\text{к}}$ – радиус кривизны поперечного сечения поверхности канала Плато – Гиббса, м.

Таким образом, кратность пены может быть выражена через средний диаметр пузырька по формулам (3) или (4).

Дисперсность. По дисперсности различают пены монодисперсные и полидисперсные. Первые можно получить лишь в особых случаях, используя специальные устройства, поэтому в реальных условиях пены оказываются всегда полидисперсными. По форме пузырьков различают шаровую, ячеистую (пузырьки имеют форму смятых шариков) и полиэдрическую (пузырьки имеют форму многогранников).

Численные значения среднего диаметра пузырьков пены зависят от способа ее получения. Поэтому сначала будет проанализирован случай, когда генерируется пена путем барботирования раствора пенообразователя газом (компрессионная пена), для которого рассчитать средний диаметр пузырька согласно [16] можно по следующей формуле:

$$d_{\text{п}} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{4B_1}{\sqrt{Q}} - Q} + \sqrt{Q}\right) \quad \text{при} \quad Q = \sqrt[3]{2B_1^2 + 2\sqrt{2A_1^3 + B_1^4}} + \sqrt[3]{2B_1^2 - 2\sqrt{2A_1^3 + B_1^4}}, \qquad (5)$$

$$A_1 = \frac{3\eta\upsilon a^2}{(\rho_1 - \rho)g}, \quad B_1 = \frac{3\sigma a}{(\rho_1 - \rho)g},$$

где η – коэффициент динамической вязкости раствора пенообразователя, Па·с;

υ – скорость потока газа, м/с;

a – геометрический размер (диаметр трубки, по которой подается газ), м;

ρ_1 – плотность раствора пенообразователя, кг/м^3;

ρ – плотность газа, кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Для численной оценки и анализа параметров, влияющих на значение среднего диаметра пузырька, необходимо задаться внешними условиями, физико-механическими характеристиками раствора: атмосферное давление p_0 = 101,325 кПа, ускорение свободного падения g = 9,81 м/с^2, плотность раствора ρ_1 = 1040 кг/м^3, плотность газа ρ = 1,3 кг/м^3, поверхностное натяжение раствора σ = 0,024 Н/м, динамическая вязкость раствора $\eta = 10^{-3}$ Па·с, геометрический параметр (диаметр трубки для подачи газа) $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м. Указанные параметры задаются по умолчанию, если при построении графиков не указано иное.

На рисунке 4*а* показана зависимость среднего диаметра пузырька пены от плотности газа. Как оказалось, плотность газа не влияет на диаметр пузырька, т.е. не важно, подается гелий ρ = 0,179 кг/м^3, воздух ρ = 1,293 кг/м^3, углекислый газ ρ = 1,976 кг/м^3 или ксенон ρ = 5,89 кг/м^3, – диаметр пузырька будет такой же. С повышением скорости подачи газа наблюдается увеличение диаметра пузырька: при переходе от υ = 1 м/с (кривая *1*) до υ = 50 м/с (кривая *3*) диаметр растет на 31 %. Более наглядно зависимость среднего диаметра пузырька от скорости видна на рисунке 4*б*. Так, при малых значениях диаметра трубки, когда a менее 1 мм, например, a = 1 мм (кривая *1*, рис. 4*б*), влияние скорости на значение среднего диаметра пузырька незначительно. Однако при a более 1 мм значение среднего диаметра пузырька начинает увеличиваться с ростом значений скорости подачи газа. Уже при a = 10 мм (кривая *3*, рис. 4*б*) значение среднего диаметра пузырька растет на 39 % при изменении скорости подачи газа от 1 до 50 м/с. Существенное влияние на средний диаметр пузырька оказывает поверхностное натяжение (рис. 4*в*), причем чем меньше скорость подачи газа, тем

больше указанная зависимость. Как показано на рисунке 4*в* (кривая *1*), при изменении поверхностного натяжения с 0,005 до 0,05 Н/м диаметр пузырька увеличивается примерно на 60 % от первоначального значения.

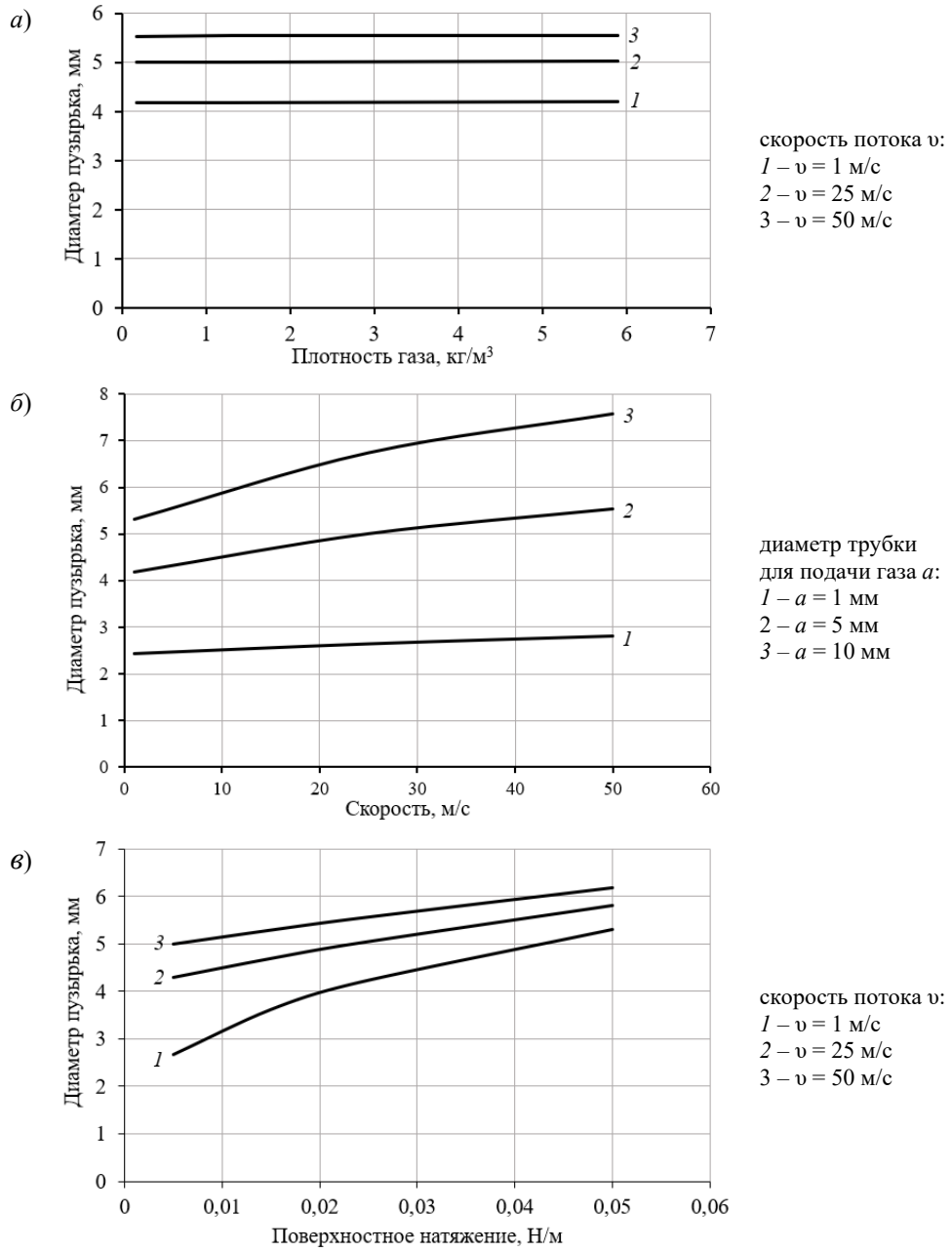


Рисунок 4. – Зависимости среднего диаметра пузырька от плотности газа (*а*), скорости потока (*б*) и поверхностного натяжения (*в*) раствора пенообразователя на затопленном отверстии

После рассмотрения случая с барботированием раствора пенообразователя газом можно исследовать еще два случая генерирования пены: на сетке и твердой поверхности. Экспериментально было зафиксировано, что скорость подачи раствора на рабочий орган (сетку или поверхность розетки оросителя) пеногенерирующего устройства оказывает существенное влияние на процесс пенообразования при прочих равных условиях. Так, в случае небольших скоростей вместо пены получается пеноэмульсия, а при достижении скорости некоторого критического значения происходит срыв процесса и, как итог, снова получается пеноэмульсия [17]. Таким образом, процесс пенообразования может протекать только в ограниченном диапазоне скоростей подачи раствора и газа на рабочий орган пеногенерирующего устройства, поэтому его важно знать.

Для случая генерирования пены на сетке значения среднего диаметра пузырька можно оценить по формуле [16]:

$$d_{\text{п}} = \sqrt[3]{\frac{D_1}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{\frac{D_1}{2} - \sqrt{Q}}. \qquad (6)$$

В уравнении (6) принято обозначение:

$$Q = -\frac{C_1^3}{27} + \frac{D_1^2}{4}, \quad \text{где} \quad C_1 = \frac{8a\sigma}{\rho\upsilon^2}, \quad D_1 = \frac{6a^2\eta}{\rho\upsilon}.$$

Вычисление диаметра пузырьков по формуле (6) может вызвать затруднения, если окажется, что величина $Q < 0$. В этом случае правая часть (6) представляет собой сумму кубических корней из сопряженных комплексных чисел с положительной действительной частью ($D_1 / 2 > 0$). Во избежание операций с комплексными числами, воспользовавшись формулой Муавра, из (6) получим следующее выражение для диаметра пузырьков:

$$d_{\text{п}} = 2 \cdot \sqrt[6]{\frac{D_1^2}{4} + |Q|} \cdot \cos\left(\frac{1}{3}\operatorname{arctg}\frac{2\sqrt{|Q|}}{D_1}\right), \quad \text{если} \quad Q < 0. \qquad (6')$$

Графические зависимости, построенные по выражению (6), изображены на рисунке 5.

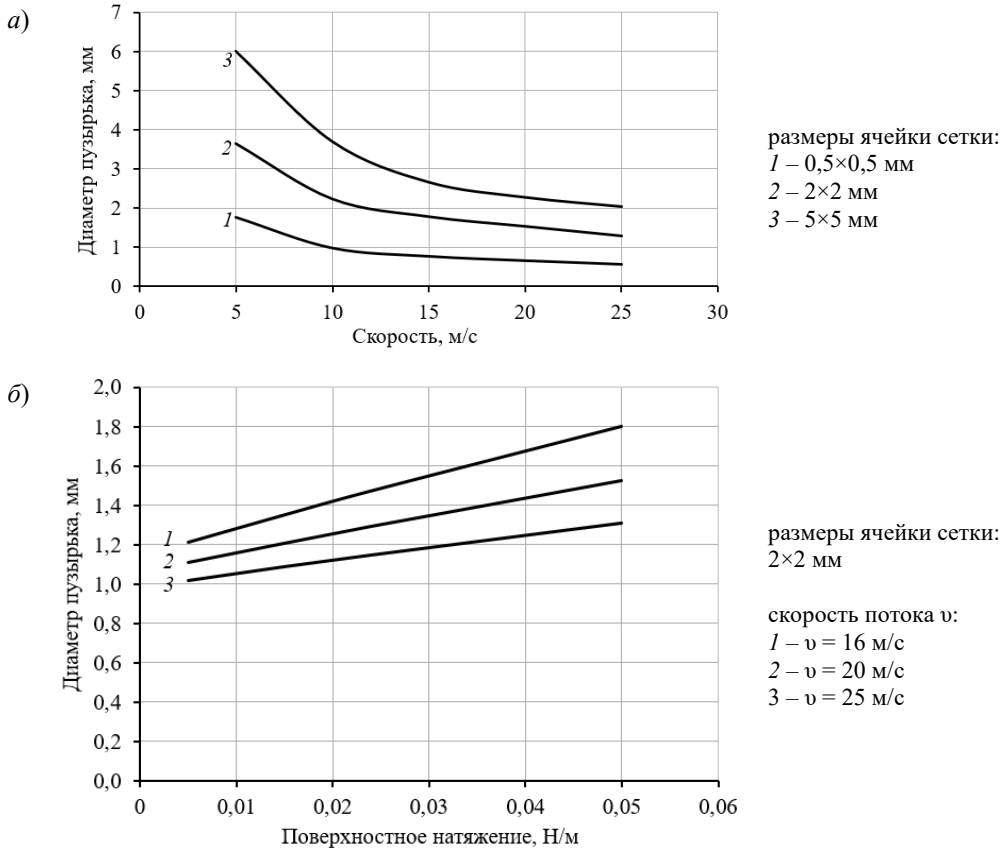


Рисунок 5. – Зависимости среднего диаметра пузырька от скорости потока (*а*) и поверхностного натяжения (*б*) раствора пенообразователя на незатопленном отверстии

В отличие от предыдущего случая (барботаж) существует минимальная скорость выдувания, ниже которой процесс пенообразования не будет протекать. Данная скорость зависит в первую очередь от геометрических размеров ячеек сетки: чем меньше размер ячейки сетки, тем больше должна быть скорость выдувания пузырьков. Экспериментально данный факт фиксировался многими исследователями, например, в работе [18]. Кроме того, средний диаметр

с ростом скорости стремительно уменьшается, например, для ячеек сетки 5×5 мм с 4,1 мм при υ = 8 м/с до 2 мм при υ = 25 м/с (на 50 %), что также хорошо согласуется с экспериментальными данными [19], по которым можно судить о наличии максимальной скорости, при которой будет сохраняться процесс пенообразования, но при превышении которой вместо пены пойдет пеноэмульсия, т.е. произойдет срыв процесса пенообразования на сетке.

На значение этой скорости оказывает влияние поверхностное натяжение раствора пенообразователя: чем меньше поверхностное натяжение, тем меньше значение максимальной скорости. Для подтверждения данного факта на рисунке 5*б* построены зависимости среднего диаметра пузырька от поверхностного натяжения для скоростей подачи 16, 20 и 25 м/с. В экспериментальной работе [20] были получены значения средних диаметров пузырьков на сетке, которые хорошо согласуются с результатами настоящей работы.

Для случая образования пены путем взбивания струи раствора пенообразователя о твердую поверхность средний диаметр пузырька согласно [17] можно определить следующим образом:

$$d_{\text{п}} = \frac{4\sigma}{2\rho_1 \upsilon^2 - p_0}. \tag{7}$$

Как видно из формулы (7) и рисунка 6, скорость подачи раствора пенообразователя на твердую поверхность, где происходит дезинтеграция, имеет определяющее значения для среднего диаметра пузырька. При этом диапазон скоростей, при котором будет проходить пенообразование, так же как и в предыдущем случае, лежит в узком диапазоне. В отличие от выдувания пены на сетке средний диаметр пузырьков уменьшается намного быстрее: при повышении скорости всего на 7 % средний диаметр становится меньше сразу на 91 %.

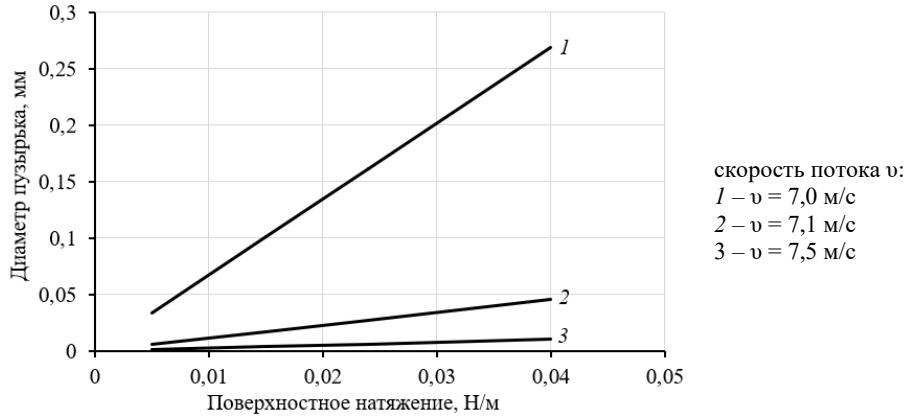


Рисунок 6. – Зависимость среднего диаметра пузырька от поверхностного натяжения раствора пенообразователя на поверхности

Устойчивость. По устойчивости пен наибольший интерес представляет время разрушения 25 % объема пены и время, в течение которого из пены вытечет 50 % жидкой фазы. В ходе проведения многочисленных экспериментов с различными устройствами для генерирования пен, марками пенообразователей, скоростями подачи растворов и газа было установлено, что эти времена примерно равны (отклонение не превышает 20 %).

Для расчета времени вытекания жидкой фазы из пенной структуры можно воспользоваться выражением [21, с. 45]:

$$t = \left(\frac{V_0}{V_0 - V_t} - 1 \right) \frac{3 r_{\text{к}}^2 r_{\text{ср}} \eta}{4\delta^2}, \tag{8}$$

где V_0 – объем жидкости в пене в момент времени $t = 0$, м^3;

V_t – объем жидкости в пене в момент времени t, м^3;

$r_{\text{ср}} = d_{\text{п}} / 2.$

При потере 50 % жидкой фазы выражение (8) преобразовывается в формулу:

$$C = \frac{9r_к^2 d_п \eta}{8\delta^2}, \quad (9)$$

где C – устойчивость (время, за которое пена потеряет 50 % жидкой фазы), с.

В уравнении (9) присутствует средний диаметр пузырька, который зависит от способа генерирования пены и может быть получен по формулам (5)–(7) или по упрощенным выражениям (3), (4), для которых важно знать форму пузырьков пены. В формуле (9) есть еще такие параметры, как толщина пленки и радиус кривизны канала Плато – Гиббса, возведенные во вторую степень каждый, которые являются функциями того же времени и для фиксации которых необходимо точное оборудование.

В работе [22] получена другая зависимость для определения устойчивости:

$$C = \frac{\tau\sigma K}{\rho_1 \upsilon} = \frac{\tau K}{C_a}, \quad (10)$$

где τ – показатель смачивающей способности раствора пенообразователя, с;

C_a – капиллярное число.

В выражение (10) входят параметры, которые можно определить в лабораторных условиях и которые для их расчета не требуют дорогого оборудования. Полученное соотношение (10) хорошо описывает экспериментальные данные, полученные при испытаниях пенообразователей, используемых в пожаротушении [22].

Для проверки универсальности указанного выражения и возможности применения его в других сферах были проведены эксперименты с гелем для мытья посуды. Предварительно в лаборатории были получены все необходимые для расчета физико-химические параметры раствора: $\rho_1 = 1003{,}2$ кг/м^3, $\eta = 1{,}02 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\sigma = 28{,}18 \cdot 10^{-3}$ Н/м^2, $\tau = 4{,}8$ с. В ходе проведения экспериментов были установлены значения кратности и устойчивости получаемой пены: $K_{эксп} = 7{,}55$; $C_{эксп} = 102$ с соответственно. Расчетное значение устойчивости по формуле (10) $C_{теор} = 100{,}1$ с на 1,9 % отличается от экспериментального значения, что свидетельствует о возможности применения ее не только при расчетах в пожаротушении, но и в других отраслях деятельности человека.

Заключение

В результате анализа теоретических и экспериментальных данных по исследованию пен выявлены основные факторы, влияющие на численные значения их кратности, дисперсности и устойчивости. Установлено, что кратность, дисперсность и устойчивость таких пен существенно зависят от способа генерирования, геометрических характеристик устройств, скорости подаваемого раствора пенообразователя и его физико-механических свойств, скорости газового потока. Для оценки их численных значений можно пользоваться формулами, представленными в работе. В то же время плотность газового потока не влияет на перечисленные характеристики пены, в связи с чем ею можно пренебрегать при проведении расчетов: $\rho_1 - \rho = \rho_1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветошкин, А.Г. Физические основы и техника процессов сепарации пены: научн. изд. / А.Г. Ветошкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 404 с. – ISBN: 978-5-9729-0111-1.
2. Hill, C. Foams: From nature to industry / C. Hill, J. Eastoe // Advances in Colloid and Interface Science. – 2017. – Vol. 247. – P. 496–513. – DOI: 10.1016/j.cis.2017.05.013.
3. Nanoparticle foam flotation for caesium decontamination using a pH-sensitive surfactant / C. Micheau, D. Dedovets, P. Bauduin [et al.] // Environmental science: Nano. – 2019. – Vol. 6, № 5. – P. 1576–1584. – DOI: 10.1039/c9en00188c.

4. Murray, B.S. Recent developments in food foams / B.S. Murray // Current Opinion in Colloid and Interface Science. – 2020. – Vol. 50. – Article 101394. – 24 p. – DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101394.
5. The Acoustics of Liquid Foams / F. Elias, J. Crassous, C. Derec [et al.] // Current Opinion in Colloid and Interface Science. – 2020. – Vol. 50. – Article 101391. – 13 p. – DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101391.
6. A Review on Foam Stabilizers for Enhanced Oil Recovery / T. Majeed, M.S. Kamal, X. Zhou, T. Solling // Energy & Fuels. – 2021. – Vol. 35, № 7. – P. 5594–5612. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00035.
7. Leaching Foams for Copper and Silver Dissolution: A Proof of Concept of a More Environmentally Friendly Process for the Recovery of Critical Metals / P. Trinh, A. Mikhailovskaya, M. Zhang [et al.] // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – Vol. 9, № 42. – P. 14022–14028. – DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c02258.
8. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с. – ISBN: 978-985-590-050-5.
9. Kamluk, A.N. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, A.V. Grachulin // Fire Safety Journal. – 2020. – Vol. 116. – Article 103177. – 10 p. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103177.
10. Benilov, E.S. Why do bubbles in Guinness sink? / E.S. Benilov, C.P. Cummins, W.T. Lee // American Journal of Physics. – 2013.– Vol. 81, № 2. – P. 88–91. – DOI: 10.1119/1.4769377.
11. Liger-Belair, G. How Many CO2 Bubbles in a Glass of Beer? / G. Liger-Belair, C. Cilindre // ACS Omega. – 2021. – Vol. 6, № 14. – P. 9672–9679. – DOI: 10.1021/acsomega.1c00256.
12. Мухамедиев, Ш.А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость 1 / Ш.А. Мухамедиев, В.А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 10. – С. 22–26.
13. Мухамедиев, Ш.А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость 2 / Ш.А. Мухамедиев, В.А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 11. – С. 2–5.
14. Kamluk, A.N. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, E.G. Govor, A.V. Grachulin // Magazine of Civil Engineering. – 2024. – Vol. 17 (7). – Article 13102. – 11 p. – DOI: 10.34910/MCE.131.2.
15. Кротов, В.В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. 1. Локальная кратность полиэдрических дисперсных систем / В.В. Кротов // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, №6. – С. 1081–1091.
16. Чан, Д.Х. Оценка диаметра пузырьков и скорости потока пенообразующей смеси для их образования на сетке пеногенерирующих устройств / Д.Х. Чан, А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 84–94. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. – EDN: QAEHWG.
17. Камлюк, А.Н. Количественное описание механизмов образования воздушно-механической пены низкой кратности для нужд пожаротушения / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 276–288. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. – EDN: EJOWFD.
18. Salkin, L. Generation soap bubbles by blowing on soap films / L. Salkin, A. Schmit, P. Panizza, L. Courbin // Physical Review Letters. – 2016. – Vol. 116, № 7. – Article 077801. – 5 p. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
19. Бычков, А.И. О срыве пенообразования на сетках / А.И. Бычков // Материалы VII Всесоюзной науч.-практ. конф. «Горение и проблемы тушения пожаров»: Секция «Тепломассообмен в условиях пожара». – М.: ВНИИПО, 1981. – С. 17–20.
20. Камлюк, А.Н. Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла на дисперсность пены / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.Ф. Титовец [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 441–450. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.441. – EDN: GNBQTD.
21. Канн, К.Б. Капиллярная гидродинамика пен / К.Б. Канн. – Новосибирск: Наука: Сибирское отд-ние, 1989. – 167 с. – ISBN: 5-02-028655-9.
22. Камлюк, А.Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. – EDN: SQVQWY.

Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости воздушно-механических пен низкой кратности

Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability of low expansion air-mechanical foams

Камлюк Андрей Николаевич
кандидат физико-математических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», заместитель начальника университета по научной и инновационной деятельности

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: kan@ucp.by
SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk
PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Deputy Chief of the University on Scientific and Innovative Activity

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: kan@ucp.by
ORCID: 0000-0002-9347-0778
ScopusID: 57218325403

DOI: https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.54 EDN: https://elibrary.ru/EXXZPA

APPROACHES TO CALCULATING THE EXPANSION, DISPERSION AND STABILITY OF LOW EXPANSION AIR-MECHANICAL FOAMS

Kamlyuk A.N.

Purpose. To theoretically evaluate the influence of the main factors affecting the expansion rate, dispersion and stability of air-mechanical foam produced in fire extinguishing devices.

Methods. Theoretical and empirical methods of analysis were used in the research.

Findings. As a result of the analysis of theoretical and experimental data on foam research, the main factors affecting the numerical values of their expansion rate, dispersion and stability were identified. It was found that the expansion rate, dispersion and stability of such foams significantly depend on the generation method, geometric characteristics of the devices, the rate of the supplied foaming agent solution and its physical and mechanical properties.

Application field of research. The results of the analysis can be used in the development of foam-generating devices, as well as to determine the optimal modes of their operation.

Keywords: foam, expansion rate, stability, dispersion, average bubble diameter, gas content, capillary number, wetting capacity index.

(The date of submitting: January 13, 2025)

REFERENCES

1. Vetoshkin A.G. *Fizicheskie osnovy i tekhnika protsessov separatsii peny* [Physical basis and technique of foam separation processes]: scientific edition. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2016. 404 p. (rus). ISBN: 978-5-9729-0111-1.
2. Hill C., Eastoe J. Foams: From nature to industry. *Advances in Colloid and Interface Science,* 2017. Vol. 247. Pp. 496–513. DOI: 10.1016/j.cis.2017.05.013.
3. Micheau C., Dedovets D., Bauduin P., Diat O., Girard L. Nanoparticle foam flotation for caesium decontamination using a pH-sensitive surfactant. *Environmental science: Nano*, 2019. Vol. 6, No. 5. Pp. 1576–1584. DOI: 10.1039/c9en00188c.
4. Murray B.S. Recent developments in food foams. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2020. Vol. 50. Article 101394. 24 p. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101394.
5. Elias F., Crassous J., Derec C., Dollet B., Drenckhan W., Gay C., Leroy V., Noûs C., Pierre J., Saint-Jalmes A. The Acoustics of Liquid Foams. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2020. Vol. 50. Article 101391. 13 p. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101391.
6. Majeed T., Kamal M.S., Zhou X., Solling T. A Review on Foam Stabilizers for Enhanced Oil Recovery. *Energy & Fuels*, 2021. Vol. 35, No. 7. Pp. 5594–5612. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00035.
7. Trinh P., Mikhailovskaya A., Zhang M., Perrin P., Pantoustier N., Lefèvre G., Monteux C. Leaching Foams for Copper and Silver Dissolution: A Proof of Concept of a More Environmentally Friendly Process for the Recovery of Critical Metals. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021. Vol. 9, No. 42. Pp. 14022–14028. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c02258.
8. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus). ISBN: 978-985-590-050-5.
9. Kamluk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers. *Fire Safety Journal*, 2020. Vol. 116. Article 103177. 10 p. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103177.
10. Benilov E.S., Cummins C.P., Lee W.T. Why do bubbles in Guinness sink? *American Journal of Physics*, 2013. Vol. 81, No. 2. Pp. 88–91. DOI: 10.1119/1.4769377.
11. Liger-Belair G., Cilindre C. How Many CO_2 Bubbles in a Glass of Beer? *ACS Omega*, 2021. Vol. 6, No. 14. Pp. 9672–9679. DOI: 10.1021/acsomega.1c00256.
12. Mukhamediev Sh.A., Vas'kina V.A. Emul'sii i peny: stroenie, poluchenie, ustoychivost' 1 [Emulsions and foams: structure, production, stability 1]. *Masla i zhiry*, 2008. No. 10, Pp. 22–26. (rus)
13. Mukhamediev Sh.A., Vas'kina V.A. Emul'sii i peny: stroenie, poluchenie, ustoychivost' 2 [Emulsions and foams: structure, production, stability 2]. *Masla i zhiry*, 2008. No. 11, Pp. 2–5. (rus)

14. Kamluk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G., Grachulin A.V. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers. *Magazine of Civil Engineering*, 2024. Vol. 17 (7). Article 13102. 11 p. DOI: 10.34910/MCE.131.2.
15. Krotov V.V. Teoriya sinerezisa pen i kontsentrirovannykh emul'siy. 1. Lokal'naya kratnost' poliedricheskikh dispersnykh sistem [Syneresis theory of foams and concentrated emulsions. 1. Local multiplicity of polyhedral disperse systems]. *Colloid Journal*, 1980. Vol. 42, No. 6. Pp. 1081–1091. (rus)
16. Chan D.Kh., Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V., Platonov A.S., Titovets A.F. Otsenka diametra puzyr'kov i skorosti potoka penoobrazuyushchey smesi dlya ikh obrazovaniya na setke penogeneriruyushchikh ustroystv [Evaluation of the bubble's diameter and the blowing speed of the air-mechanical foam forming bubbles on the screen of the foam generators]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 84–94. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. EDN: QAEHWG.
17. Kamlyuk A.N. Kolichestvennoe opisanie mekhanizmov obrazovaniya vozdushno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti dlya nuzhd pozharotusheniya [Quantitative description of the mechanisms of formation of low multiplicity air-mechanical foam for firefighting needs]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 276–288. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. EDN: EJOWFD.
18. Salkin L., Schmit A., Panizza P., Courbin L. Generating soap bubbles by blowing on soap films. Physical Review Letters, 2016. Vol. 116, No. 7. Article 077801. 5 p. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
19. Bychkov A.I. O sryve penoobrazovaniya na setkakh [About foaming disruption on the nets]. *Proc. of VII All-Union scientific-practical conf. «Gorenie i problemy tusheniya pozharov»:* Section *«Teplomassoobmen v usloviyakh pozhara»*. Moscow: FGBU VNIIPO of EMERCOM of Russia, 1981. Pp. 17–20. (rus)
20. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Titovets A.F., Polochanin N.S., Grachulin A.V. Vliyanie razmerov yacheyki setki i rasstoyaniya ot sopla na dispersnost' peny [Influence of the dimensions of the grid cell and the distance from it to the nozzle of the foam-generating device on the foam dispersion]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 441–450. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.441. EDN: GNBQTD.
21. Kann K.B. *Kapillyarnaya gidrodinamika pen* [Capillary hydrodynamics of foams]. Novosibirsk: Nauka, 1989. 167 p. (rus). ISBN: 5-02-028655-9.
22. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G. Zavisimost' ob"emnoy ustoychivosti nizkokratnykh pen ot ikh kratnosti [Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024. Vol. 69, No. 4. Pp. 194–205. (rus). DOI:10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. EDN: SQVQWY.

Copyright © 2025 Kamlyuk A.N.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.