

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-1.84>

УДК 614.843.8

ОЦЕНКА ДИАМЕТРА ПУЗЫРЬКОВ И СКОРОСТИ ПОТОКА ПЕНООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ ДЛЯ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ НА СЕТКЕ ПЕНОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Чан Д.Х., Камлюк А.Н., Лихоманов А.О.,
Грачулин А.В., Платонов А.С., Титовец А.Ф.

Цель. Теоретически исследовать процесс образования пузырьков воздушно-механической пены на ячеистой сетке пеногенерирующих устройств. Проанализировать влияние размеров ячейки сетки, скорости пенообразующей смеси, а также физических свойств данной смеси на диаметр пузырьков воздушно-механической пены.

Методы. В процессе исследований применялись теоретические методы анализа, а также аналитический метод Феррари и формула Кардано для решения алгебраического уравнения четвертой и третьей степеней соответственно.

Результаты. Показано, что на диаметр пузырьков воздушно-механической пены влияют размеры ячейки сетки, физические свойства пенообразователя, а также скорость пенообразующей смеси. Предложен теоретический метод определения диаметра пузырька пены, образующегося на ячеистой сетке пеногенерирующего устройства. Рассчитан диаметр пенных пузырьков, образующихся на затопленном и незатопленном отверстиях сетки с размерами ячейки в диапазоне от $0,5 \times 0,5$ до $5,0 \times 5,0$ мм.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть применены для теоретического обоснования и разработки пеногенерирующих устройств с ячеистыми сетками.

Ключевые слова: пена, сетка, пенный пузырек, скорость для выдувания пузырьков, диаметр пенного пузырька.

(Поступила в редакцию 10 января 2022 г.)

Введение

Пена представляет собой дисперсную систему, состоящую из пузырьков газа, разделенных пленками жидкости или твердого вещества [1]. В настоящей работе рассмотрена пена именно с жидкой дисперсной средой, т.к. она представляет наибольший интерес с позиции пожаротушения.

Процесс пенообразования весьма сложен по причине совместного воздействия многочисленных физико-химических, физико-механических и других факторов. Вид закономерностей изменения параметров, характеризующих образование пены, может существенно меняться в зависимости от условий конкретного технологического процесса или эксперимента. При этом множество переменных факторов (рис. 1), влияние которых не всегда поддается учету, практически исключает возможность строгого математического описания процессов пенообразования [2].

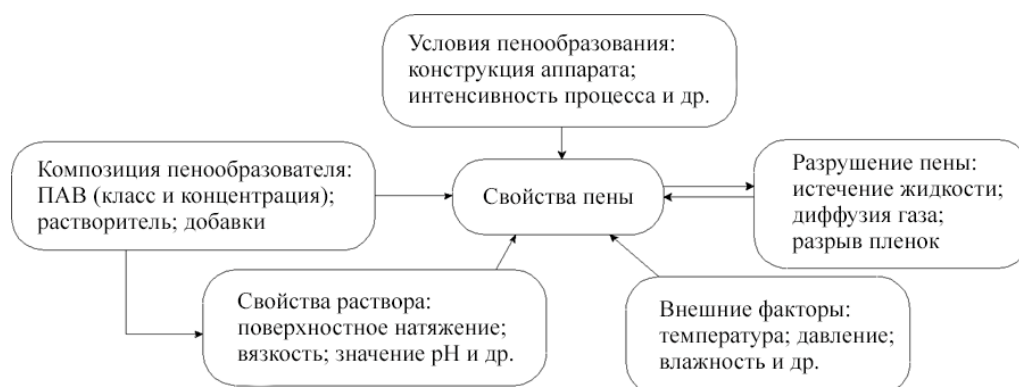


Рисунок 1. – Факторы, влияющие на свойства пены

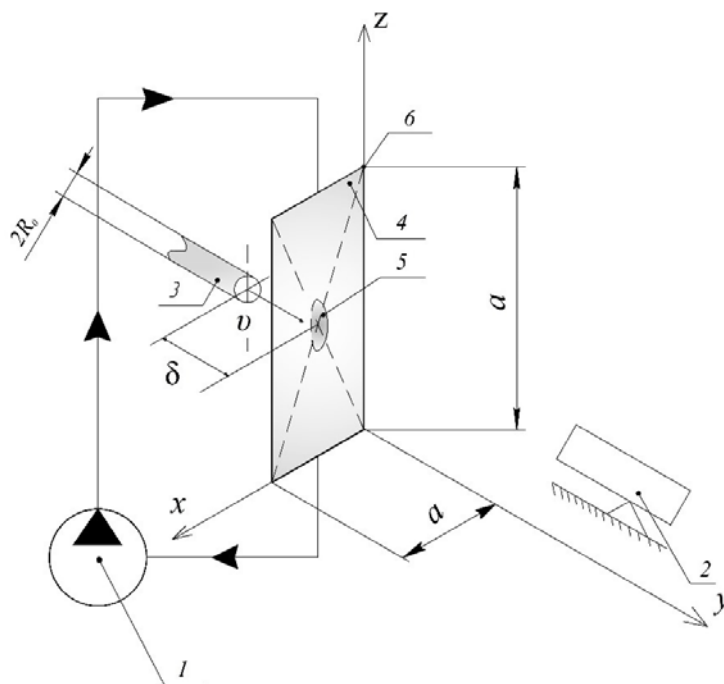
Как оказалось, процесс образования даже одного пенного пузырька является нетривиальной задачей [3]. Поэтому подходы к решению вопросов пенообразования должны быть пошаговыми с учетом ввода дополнительных упрощений и приближений.

В основу данной работы положена оценка скорости пенообразующей смеси, состоящей из пенообразователя, воды и воздуха, увлекаемого потоком жидкой фазы, при которой на сетке пеногенерирующего устройства образуются пузырьки пены (далее – скорость для выдувания пузырьков), а также определение диаметра данных пузырьков. В работе приняты следующие упрощения:

- 1) каждый отдельно взятый пузырек образуется независимо от других пузырьков;
- 2) пузырьки образуются в результате воздействия воздуха, увлекаемого потоком жидкой фазы – пенообразующим раствором (смесь пенообразователя и воды), на пленки данного раствора, которые формируются на ячейках сетки пеногенерирующего устройства. При этом скорость потока воздуха равна скорости жидкой фазы;
- 3) ячейки сетки пеногенерирующего устройства имеют квадратную форму, однако при расчетах рассматриваются как окружности с диаметром, равным длине ребра ячейки.

Основная часть

Оценка скорости для выдувания пузырьков пены. Французские физики из университета Ранна при изучении процесса выдувания мыльных пузырьков [3] установили, что основными параметрами, влияющими на диаметр пузырьков, являются скорость и диаметр поперечного сечения потока воздуха, а также размеры ячейки, на которой формируется мыльная пленка. Ими была разработана лабораторная установка (рис. 2) для выдувания пузырьков из мыльного раствора с динамической вязкостью $\mu = 0,05$ Па·с и поверхностным натяжением $\sigma = 0,024$ Н/м. Для выдувания пузырьков использовалась квадратная рамка 4 с длиной ребра $a = 0,007–0,075$ м. Воздух подавался на мыльную пленку по нормали по отношению к ней через сопло 3 диаметром $2R_0 = 10^{-1}–10^{-4}$ м со скоростью v . Для изменения диаметра поперечного сечения потока воздуха помимо изменения R_0 сопло отодвигали от рамки на расстояние δ . Для поддержания постоянной толщины мыльной пленки стекающий под действием силы тяжести раствор с помощью насоса 1 перекачивался с нижнего ребра рамки на верхнее, как это показано на рисунке 2.



1 – насос; 2 – камера; 3 – сопло; 4 – мыльная пленка; 5 – выдуваемый пузырек; 6 – рамка.

Рисунок 2. – Лабораторная установка согласно работе [3]

В работе [3] авторами была определена минимальная скорость для выдувания пузырьков v_{\min} , а также установлено, что на диаметр пузырьков оказывает влияние диаметр поперечного сечения потока воздуха: чем он больше, тем крупнее пенные пузырьки. Вместе с тем каждому диаметру поперечного сечения потока воздуха соответствует определенная минимальная скорость для выдувания пузырьков v_{\min} , при этом чем больше данный диаметр, тем ниже значение v_{\min} . Кроме того, если диаметр поперечного сечения потока воздуха гораздо больше, чем длина ребра рамки для мыльной пленки, то диаметр пузырька определяется размерами рамки.

Следует отметить, что данный случай выдувания пузырька аналогичен генерированию воздушно-механической пены на сетке пеногенерирующих устройств, применяемых для целей пожаротушения, когда диаметр поперечного сечения потока пенообразующей смеси гораздо больше, чем размеры ячейки сетки. Согласно работе [3] для такого случая минимальную скорость для выдувания пузырьков v_{\min} можно определить по формуле:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho R_0}} \sqrt{\frac{2R_0}{a}} = \sqrt{\frac{16\sigma}{\rho a}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; R_0 – радиус сопла, м; a – длина ребра квадратной ячейки сетки, м.

Теоретическая зависимость для определения v_{\min} также сформулирована авторами работы [4], где ими рассматривалось пенообразование на сетках пеногенерирующих устройств для целей пожаротушения. Согласно работе [4] для получения пузырьков пены необходимо перед ячейками сетки создать давление, превышающее капиллярное давление в пузырьке. При равенстве данных давлений справедливо соотношение:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho a}}. \quad (2)$$

Значение v_{\min} , определенное по формуле (1), численно в $\sqrt{2}$ раз больше значения, определенного по формуле (2). Очевидно, что авторы работы [3] для получения уравнения (1) воспользовались ранее полученным теоретическим соотношением (2) из работы [4], включив в него дополнительные переменные на основе результатов собственных экспериментов. Однако справедливость применения как выражения (1), полученного для случая выдувания одного пузырька, так и зависимости (2), сформулированной теоретически для случая генерирования пены на сетке, не подтверждена экспериментально.

В экспериментальной работе [3] также показано, что при скоростях, больших v_{\min} , процесс образования пузырьков становится автоматическим. Согласно работе [4] при дальнейшем увеличении скорости потока воздуха сначала идет нормальный процесс пенообразования, при котором пена от сетки идет сплошным потоком без разрывов. Затем при некоторой скорости наступает такой момент, когда поток пены разрывается и от сетки идет отдельными хлопьями. При дальнейшем увеличении скорости хлопья уменьшаются и при определенной скорости пенообразование полностью прекращается. Капли раствора срываются с сетки и за нею идет поток аэрозоля. Максимальная скорость для выдувания пузырьков v_{\max} , при которой прекращается образование пенных пузырьков на сетке, зависит от концентрации пенообразователя в пенообразующей смеси и его свойств, а также от размеров ячейки сетки [4].

Существование максимальной скорости для выдувания пузырьков можно объяснить теорией устойчивости пены [4]. Устойчивая пена получается, если на поверхности раздела «воздух – жидкость» образуются адсорбционные слои, придающие жидкостным пленкам структурно-механическую прочность. Адсорбционные слои образуются в результате диффузии молекул поверхностно-активного вещества (ПАВ) к поверхности раздела фаз. Пено-

образование на сетках протекает при деформации капель пенообразующего раствора, во время которой поверхность раздела непрерывно увеличивается. При относительно медленной деформации капля раствора на поверхности пузырьков успевает образоваться адсорбционный слой, придающий стенкам пузырьков достаточную прочность. При быстрой деформации концентрация ПАВ на поверхности пузырьков понижается и не успевает восстановиться путем диффузии. Вследствие этого прочность пленок понижается. При увеличении скорости для выдувания пузырьков в потоке пенообразующей смеси возрастает интенсивность возмущений, которые деформируют капли. Понижение прочности пленок и увеличение возмущений приводит при определенных значениях скорости для выдувания к разрушению оболочек пузырьков, т.е. к прекращению процесса пенообразования. Очевидно, максимальное значение скорости для выдувания пузырьков тесно связано с параметрами, определяющими устойчивость пены, т.е. оно зависит от свойств пенообразователя, точнее, от структурно-механических свойств адсорбционных слоев, образующихся на поверхности раствора этого пенообразователя [4].

Таким образом, основываясь на данных, полученных в работах [3] и [4], можно сделать вывод, что выдувание пузырьков возможно потоком пенообразующей смеси, скорость которого находится между двумя пороговыми значениями – минимальной и максимальной скоростями для выдувания пузырьков для данного конкретного случая. Для определения зависимостей, которые можно использовать для расчета пороговых значений скорости для выдувания пузырьков, необходимо проводить экспериментальные исследования.

Как было сказано ранее, скорость потока пенообразующей смеси оказывает влияние на диаметр образующегося на сетке пузырька. Теоретически оценить диаметр пузырька можно по аналогии с работой [5], где авторы рассматривали процесс флотационного разделения полимерных отходов, а диаметр определяли из баланса сил в момент отрыва пузырька при его росте на затопленном отверстии в покоящейся жидкости. Затопленное отверстие далее будет рассматриваться как аналог ячейки сетки пеногенерирующего устройства, через которую происходит выдувание пузырька.

Оценка диаметра пенного пузырька, образующегося на затопленном отверстии.

Для определения диаметра пузырька во время отрыва воспользуемся условием равновесия сил (рис. 3) [5]. Принято, что сетка расположена горизонтально, т.е. поверхность затопленного отверстия расположена перпендикулярно действию подъемной силы $F_{дв}$, которая обусловлена разностью плотностей жидкости и газа. При росте пузырька сила прилипания $F_{пр}$ совместно с силой сопротивления F_c компенсирует подъемную силу $F_{дв}$:

$$F_{дв} = F_{пр} + F_c. \quad (3)$$

С увеличением объема пузырька наступает момент отрыва, когда сила прилипания принимает максимальное значение и не способна компенсировать подъемную силу. Однако отрыв пузырька не происходит мгновенно, существует стадия отрыва. Время отрыва, как правило, определяется эмпирическим путем. При этом следует отметить, что влияние стадии отрыва пузырька на его итоговый диаметр незначительно и согласно данным из работы [6] разница между экспериментальными и расчетными (без учета стадии отрыва) значениями составляет не более 10 % в широких интервалах изменяемых параметров. По этой причине стадию отрыва пузырька в расчетах принято не учитывать.

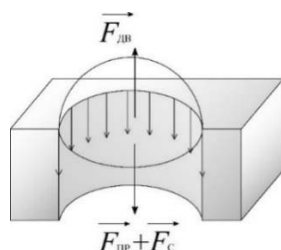


Рисунок 3. – Баланс сил при росте пузырька на затопленном отверстии

Для расчетов также принято, что длина ребра ячейки сетки a соответствует диаметру окружности, вписанной внутрь ячейки. Подъемная сила $F_{дв}$, обусловленная разностью плотностей дисперсных фаз, рассчитывается по формуле:

$$F_{дв} = \frac{\pi d_n^3 g (\rho_1 - \rho)}{6}, \quad (4)$$

где d_n – диаметр пузырька, м; ρ_1 – плотность пенообразователя, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила прилипания $F_{пр}$ пузырька к материалу отверстия, на котором он образуется, рассчитывается по формуле:

$$F_{пр} = \pi a \sigma \sin \theta, \quad (5)$$

где θ – краевой угол смачивания (как правило, при расчете силы прилипания пузырька принимается равным 90°), градус.

Сила гидравлического сопротивления среды F_c перемещению границы раздела фаз в росте пузырька на отверстие рассчитывается по закону Стокса:

$$F_c = 3\pi \mu d_n v_{отн}, \quad (6)$$

где $v_{отн}$ – относительная скорость перемещения границы раздела фаз относительно жидкости, м/с.

Динамическая вязкость, в свою очередь, рассчитывается по формуле:

$$\mu = \rho_1 \nu, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с.

При слабой конвекции жидкости относительная скорость перемещения границы раздела фаз может быть записана так:

$$v_{отн} = \frac{dr_n}{dt}, \quad (8)$$

где $r_n = d_n/2$ – радиус пузырька, м.

Из уравнения сплошности течения газа получаем равенство его объемного расхода приращению объема пузырька:

$$\pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 v dt = 4\pi \left(\frac{d_n}{2}\right)^2 dr_n, \quad (9)$$

где v – скорость жидкости для выдувания пузырьков, м/с.

Из последнего равенства выражается скорость перемещения границы раздела фаз относительно жидкости:

$$\frac{dr_n}{dt} = \frac{va^2}{4d_n^2}. \quad (10)$$

Силами инерции, возникающими при росте пузырька, можно пренебречь, тогда уравнение баланса сил (3) в момент отрыва пузырька с учетом формул (4)–(6) и (10) переписывается в виде

$$\frac{\pi d_n^3 g (\rho_1 - \rho)}{6} = \pi a \sigma + \frac{3\pi \mu v a^2}{4d_n}. \quad (11)$$

Путем несложных преобразований перейдем к уравнению

$$d_n^4 - \frac{6a\sigma d_n}{g(\rho_1 - \rho)} - \frac{9\mu\nu a^2}{2g(\rho_1 - \rho)} = 0. \quad (12)$$

Введем обозначения

$$C = \frac{3a\sigma}{g(\rho_1 - \rho)}, \quad D = \frac{3a^2\mu\nu}{g(\rho_1 - \rho)}. \quad (13)$$

Тогда (12) примет вид

$$d_n^4 - 2Cd_n - 3D/2 = 0. \quad (14)$$

Применим метод Феррари [7] для решения уравнения четвертой степени (14). Его резольвента имеет вид

$$y^3 + 6Dy - 4C^2 = 0. \quad (15)$$

С помощью подстановки $y = z - 2D/z$ от (15) перейдем к уравнению

$$z^6 - 4C^2z^3 - 8D^3 = 0,$$

которое, очевидно, приводит нас к уравнениям

$$z^3 = 2C^2 \pm 2\sqrt{C^4 + 2D^3}. \quad (16)$$

Если z_1, z_2, z_3 являются корнями (16), то резольвента (15) имеет решения

$$y_i = z_i - 2D/z_i, \quad i = \overline{1,3}.$$

Таким образом, согласно методу Феррари корни уравнения четвертой степени (14) находятся как корни двух уравнений

$$d_n^2 + \frac{y_1}{2} = \pm \sqrt{y_1 d_n^2 + 2Cd_n + \frac{y_1^2}{4} + \frac{3D}{2}}, \quad (17)$$

где подкоренное выражение в правой части является полным квадратом, а y_1 – произвольный корень резольвенты (15). В качестве y_1 можно выбрать

$$y_1 = z_1 - 2D/z_1, \quad \text{где} \quad z_1 = \sqrt[3]{2C^2 + 2\sqrt{C^4 + 2D^3}}. \quad (18)$$

Отметим, что при решении уравнений (17) из четырех возможных корней действительными оказывались только два, при этом один из них всегда был отрицательным.

Оценка диаметра пенного пузырька, образующегося на незатопленном отверстии. Выше был рассмотрен случай, когда пузырек пены образуется на затопленном отверстии, соответственно, в качестве $F_{дв}$ принималась выталкивающая сила согласно закону Архимеда. Далее рассмотрим случай, когда генерирование пены на сетке происходит в воздухе, т.е. на незатопленном отверстии. В данном варианте за $F_{дв}$ принимается сила удара воздуха о пенную пленку, образующуюся на сетке:

$$F_{дв} = \frac{\pi d_n^2 \rho v^2}{8}. \quad (19)$$

Тогда уравнение (3) принимает вид

$$\frac{\pi d_n^2 \rho v^2}{8} = \pi a \sigma + \frac{3\pi \mu \nu a^2}{4d_n}. \quad (20)$$

Откуда перейдем к уравнению

$$d_n^3 - \frac{8a\sigma}{\rho v^2} d_n - \frac{6a^2\mu}{v} = 0. \quad (21)$$

Введем обозначения

$$C_1 = -\frac{8a\sigma}{\rho v^2}, \quad D_1 = -\frac{6a^2\mu}{v}.$$

Тогда (21) переписывается в виде

$$d_n^3 + C_1 d_n + D_1 = 0. \quad (22)$$

Для решения уравнения воспользуемся формулой Кардано. В таком случае корни уравнения (22) в канонической форме равны

$$d_{n1} = A + B, \quad d_{n2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3},$$

где

$$A = \sqrt[3]{-\frac{D_1}{2} + \sqrt{Q}}, \quad B = \sqrt[3]{-\frac{D_1}{2} - \sqrt{Q}}, \quad Q = \left(\frac{C_1}{3}\right)^3 + \left(\frac{D_1}{2}\right)^2.$$

Отметим, что в рассматриваемых условиях уравнение (22) имеет только один положительный корень – два оставшихся либо отрицательные, либо комплексные.

При расчетах использовались следующие значения физических величин: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $\sigma = 0,024 \text{ Н/м}$, $v = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho_1 = 1040 \text{ кг/м}^3$ (значения σ , v , ρ_1 соответствуют показателям водного раствора одного из наиболее широко используемого на территории Республики Беларусь пенообразователя Синтек-6НС (6 %)). Результаты решения уравнений (12) и (21) для сеток с размером ячеек от $0,5 \times 0,5$ до $5,0 \times 5,0$ мм и минимальных скоростей для выдувания пузырьков, рассчитанных по формуле (2), приведены в таблице.

Таблица. – Результаты расчета диаметра пузырька для сеток с различным размером ячеек

Размеры ячейки сетки, мм	0,5 × 0,5	0,7 × 0,7	1,0 × 1,0	2,0 × 2,0	3,2 × 3,2	4,0 × 4,0	5,0 × 5,0
Минимальная скорость для выдувания пузырьков v_{\min} , м/с	17,5	14,8	12,4	8,7	6,9	6,2	5,5
Диаметр пузырька d_n , мм:							
– на затопленном отверстии	2,0	2,2	2,5	3,2	3,8	4,1	4,4
– на незатопленном отверстии	0,6	0,9	1,2	2,3	3,6	4,5	5,6

Для проверки адекватности принятых в работе моделей образования пузырьков требуется проведение экспериментов по генерированию пены и измерению среднего диаметра пузырьков при различных скоростях для их выдувания.

Заключение

Рассмотрены известные способы оценки скорости пенообразующей смеси для выдувания пузырьков пены. Показано, что на диаметр пузырьков воздушно-механической пены влияют размеры ячейки сетки пеногенерирующего устройства, физические свойства пенообразователя, а также скорость пенообразующей смеси. Отмечено, что справедливость применения сформулированных различными авторами выражений для определения минимальной скорости для выдувания пузырьков пены не подтверждена экспериментально. Кроме того, основываясь на данных, полученных в работах [3] и [4], можно сделать вывод, что выдувание пузырьков для конкретного случая возможно потоком пенообразующей

смеси, скорость которого находится между двумя пороговыми значениями – минимальной и максимальной скоростями для выдувания пузырьков. Для определения зависимостей, которые можно использовать для расчета пороговых значений скорости для выдувания пузырьков, необходимо проводить экспериментальные исследования.

Предложен теоретический метод определения диаметра пузырька пены, образующегося на ячеистой сетке пеногенерирующего устройства, основанный на балансе сил в момент отрыва пузырька при его росте на затопленном отверстии в условно покоящейся жидкости, а также на незатопленном отверстии. Рассчитан диаметр пенных пузырьков, образующихся на сетке с размерами ячейки в диапазоне от $0,5 \times 0,5$ до $5,0 \times 5,0$ мм. Предложенный метод также требует экспериментального подтверждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров, В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В.К. Тихомиров. – М.: Химия, 1975. – 263 с.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 223 с.
3. Salkin, L. Generation Soap Bubbles by Blowing on Soap films / L. Salkin [et. al.] // Physical Review Letters, 2016. – Vol. 116, Iss. 7. – Article 077801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
4. Казаков, М.В. Средства и способы тушения пламени горючих жидкостей / М.В. Казаков, И.И. Петров, В.Ч. Реутт. – М.: Стройиздат, 1977. – 113 с.
5. Левданский, А.Э. Флотационное разделение смеси измельченных полимерных отходов / А.Э. Левданский [и др.]. – Шымкент: Элем, 2020. – 152 с.
6. Рубинштейн, Ю.И. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю.И. Рубинштейн [и др.]. – М.: Недра, 1989. – 303 с.
7. Еремин, М.А. Уравнения высших степеней / М.А. Еремин. – М.: Арзамас, 2003. – 304 с.

**Оценка диаметра пузырьков и скорости потока пенообразующей смеси
для их образования на сетке пеногенерирующих устройств**
**Evaluation of the bubbles diameter and the blowing speed of the air-mechanical foam
forming bubbles on the screen of the foam generators**

Чан Дык Хоан

кандидат технических наук

Университет пожарной безопасности
и профилактики, факультет технических
средств пожарно-спасательных служб,
заместитель начальника факультета

Адрес: р-н Тхань Суан,
ул. Хуат Дуй Тиен, 243,
123000, г. Ханой, Вьетнам

Email: duchoant34@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8558-8979

Hoan Duc Tran

PhD in Technical Sciences

University of Fire Prevention and Fighting,
Faculty of Automation and Technical
Equipment of Fire Fighting and Rescue,
Deputy Head of the Faculty

Address: Thanh Xuan District,
Khuat Duy Tien str., 243,
123000, Hanoi, Vietnam

Email: duchoant34@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8558-8979

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

ORCID: 0000-0002-9347-0778

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physics and Mathematics 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

Грачулин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Grachulin_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3832-8258

Aleksandr V. Grachulin

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Grachulin_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3832-8258

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра автоматиче-
ских систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

Платонов Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел науки
и инновационного развития, ведущий
научный сотрудник

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: alexpltn@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5463-6029

Aleksandr S. Platonov

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Department of scientific and Innovation Activity,
Leading Researcher

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: alexpltn@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5463-6029

Титовец Артем Федорович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации
чрезвычайных ситуаций, курсант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: artemlucky619@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9952-6525

Artem F. Titovets

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Emergency Prevention and Elimination,
cadet

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: artemlucky619@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9952-6525

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-1.84>

EVALUATION OF THE BUBBLES DIAMETER AND THE BLOWING SPEED OF THE AIR-MECHANICAL FOAM FORMING BUBBLES ON THE SCREEN OF THE FOAM GENERATORS

Tran D.H., Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V., Platonov A.S., Titovets A.F.

Purpose. To study the formation process of bubbles of air-mechanical foam on the cellular screen of foam generators. To analyze the influence of the foam screen cell dimensions, the speed of the foaming mixture (the foam bubble blowing speed), as well as the physical properties of this mixture on the diameter of the bubbles of the air-mechanical foam.

Methods. In the process of the research theoretical methods of analysis were used, as well as the analytical Ferrari method and Cardano's formula for solving an algebraic equation of the fourth degree and cubic equation, respectively.

Findings. It is shown that the diameter of the air-mechanical foam bubbles is affected by the size of the foam screen cell, the physical properties of the foaming agent, and the speed of the foaming mixture (the foam bubble blowing speed). A theoretical method is proposed for determining the diameter of the foam bubble formed on a cellular screen of the foam generator. The diameter of foam bubbles formed at the flooded and unflooded holes of the foam screen with cell size in the range from 0.5×0.5 to 5.0×5.0 mm was calculated.

Application field of research. The results can be used for theoretical substantiation and development of foam generators with cellular screen.

Keywords: foam, foam screen, foam bubble, foam bubble blowing speed, foam bubble diameter.

(The date of submitting: January 10, 2022)

REFERENCES

1. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foam. Theory and practice of their production and destruction]. Moscow: Khimiya, 1975. 263 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy: monografiya* [Compressed air foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection of the Republic of Belarus, 2019. 223 p. (rus)
3. Salkin L., Schmit A., Panizza P., Courbin L. Generating Soap Bubbles by Blowing on Soap Films. *Physical Review Letters*, 2016. Vol. 116, Iss. 7. Article 077801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
4. Kazakov M.V., Petrov I.I., Reutt V.Ch. *Sredstva i sposoby tusheniya plameni goryuchikh zhidkostey* [Means and methods of extinguishing the flame of combustible liquids]. Moscow: Stroyizdat, 1977. 113 p. (rus)
5. Levanskiy A.E., Olimakh E.V., Volnenko A.A., Korganbaev B.N., Zhumadullaev D.K. *Flotatsionnoe razdelenie smesi izmel'chennykh polimernykh otkhodov* [Flotation separation of a mixture of crushed polymeric waste]. Shymkent: Alem, 2020. 152 p. (rus)
6. Rubinshteyn Yu.I., Melik-Gaykazyan V.I., Matveenko N.V., Leonov S.B. *Pennaya separatsiya i kolonnaya flotatsiya* [Foam separation and column flotation]. Moscow: Nedra, 1989. 303 p. (rus)
7. Eremin M.A. *Uravneniya vysshikh stepeney* [Equations of the highest powers]. Moscow: Arzamas, 2003. 304 p. (rus)