

О РЕЖИМАХ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ В РАСТВОРЕ С ПАВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ

Камлюк А.Н., Гусаров И.С., Масюк С.А.

Цель. Провести исследования режимов генерирования пузырьков в растворе с поверхностно-активным веществом (ПАВ) для получения компрессионной пены¹ и их геометрических характеристик на затопленном отверстии. На основе полученных экспериментальных данных выделить основные режимы генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и дать их описание. Определить характеристические числа Рейнольдса, Вебера, Фруда, Маха, капиллярности, Бонда и Мортонна, по которым можно судить о режимах генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристиках на затопленном отверстии.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических (анализ, синтез, сравнение) и экспериментальных методов исследования. Применялся метод визуализации и фотосъемки, метод цифровой обработки изображений, расчетный метод.

Результаты. Экспериментально установлены три последовательно сменяющих друг друга режима генерирования пузырьков в растворе ПАВ на затопленном отверстии: пузырьковый, гирляндовый (переходный) и струйный. Определены критерии этих режимов: для пузырькового: числа Рейнольдса – $Re < 1000$; Вебера – $We \leq 15$; капиллярности – $Ca_{max} = 0,018$; Маха – $M_{max} = 0,075$ и среднее газосодержание – $\varphi_{cp}^{min} = 0,769$; $\varphi_{cp}^{max} = 0,997$; для гирляндового: $1000 \leq Re \leq 2000$; $3 \leq We \leq 45$; $Ca_{max} = 0,031$; $M_{max} = 0,129$; $\varphi_{cp}^{min} = 0,954$; $\varphi_{cp}^{max} = 0,998$; для струйного: $Re > 2000$; $We \geq 80$; $Ca_{min} = 0,029$; $M_{min} = 0,123$; $\varphi_{cp}^{min} = 0,998$. Показано, что даже при малых скоростях воздуха в растворе с ПАВ генерируются деформированные (эллиптические) пузырьки, что подтверждается значениями числа Бонда $Bo > 1$ и $Re > 1,1Mo^{-1/5}$. Для каждого режима определены геометрические характеристики: для пузырькового – эквивалентный диаметр пузырька и шаг между пузырьками; для гирляндового – расстояние между гирляндой и пузырьками и высота гирлянды; для струйного – высота факела и угол его раскрытия. Наиболее эффективным с точки зрения газонасыщения и дисперсности пузырьков признан струйный режим.

Область применения исследований. Исследования режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии могут применяться для оптимизации барботажных процессов для пожаротушения, флотации, пищевых производств и получения пористых материалов.

Ключевые слова: ПАВ, компрессионная пена, пузырьки, барботаж, число Рейнольдса, число Вебера, число Фруда, число Маха, число капиллярности, число Бонда, число Мортонна.

(Поступила в редакцию 12 марта 2026 г.)

Введение

Огнетушашую воздушно-механическую пену можно получать на сетках в насадках на пожарные стволы [1], на розетках оросителей автоматических установок пожаротушения [2], а также в установках генерирования компрессионной пены [3]. Последний способ является новым и эффективным, однако еще не получил широкого распространения в Республике Беларусь, т.к. не исследованы все свойства и качества компрессионной пены [4]. Настоящая работа посвящена изучению режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии. Одним из основных приближений для генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для

¹ Техника пожарная. Мобильные системы генерирования компрессионной пены. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 58792-2019 – Введ. 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2020. – III, 14 с.

получения компрессионной пены, принятых в данной работе, является постоянство стационарного объема раствора пенообразователя в камере смешения экспериментальной установки (расход жидкой фазы равен нулю). Изменяемым параметром остается расход воздуха, подаваемого в жидкую фазу. В реальных же условиях работы установки генерирования компрессионной пены дополнительно имеется возможность регулирования расходов воды и пенообразователя. Тем не менее, в связи с тем, что изучаются возможные режимы генерирования пены только в камере смешения (не рассматриваются режимы движения пен в рукавных линиях) и геометрические характеристики пузырьков на затопленном отверстии, данное приближение можно считать приемлемым.

Процесс генерирования компрессионной пены при определенных условиях идентичен по механизму фрагментации с барботажем, под которым понимают процесс пропускания газа [5–7] или пара [8] через слой жидкости и применяют в различных видах техники. Для исследований барботажных режимов применяются установки как с постоянным стационарным объемом жидкой фазы [5; 8], так и с заданным расходом [6; 7]. В работах [6; 7] установлено, что отрывной диаметр пузырька уменьшается с ростом расхода потока жидкости как при восходящем, так и опускном течении, однако с повышением расхода газа через отверстие диаметр пузырька увеличивается при постоянном расходе жидкости. Данный эффект связан с изменением режима отрыва пузырьков. Классически различают два режима отрыва пузырьков [9, с. 8–12]. При малых скоростях наблюдается образование и движение отдельных пузырьков – пузырьковый режим, при котором глубина погружения источника газа практически не влияет на диаметр пузырька [10]. При скоростях, превышающих критическое значение, наблюдается образование газового факела – струйный режим, в котором пузырьки всплывают, соприкасаясь друг с другом. Первые попытки теоретического описания режимов представлены в работах: пузырькового – [11; 12, с. 57–61], струйного – [12, с. 62–66]. С учетом развития численного моделирования получены количественные характеристики скорости всплытия пузырьков различных диаметров, частоты и амплитуды их движения [13].

В отличие от барботажа (пузырьки просто всплывают), процесс генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены (сжатый воздух вбивается в поток раствора под давлением) может проводиться со значительно большими скоростями газового потока, численные значения которых могут достигать даже до околосвуковой области. Повышение скорости газового потока связано с необходимостью интенсификации процесса образования пены (повышением кратности пены), однако, как оно влияет на характеристики режимов отрыва пузырьков, а также форму и размеры самих пузырьков, в настоящее время не изучено.

Основная часть

Для определения режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены необходимо определить значения характеризующих этот процесс безразмерных чисел подобия: Рейнольдса (Re), Вебера (We), Бонда (Bo) [14, с. 208–216], капиллярности (Ca) [16] и Мортонна (Mo) [17], для оценки газосодержания – числа Фруда (Fr) [18], а в качестве дополнительного критерия подобия при больших числах Рейнольдса – Маха (M) [19]:

число Рейнольдса

$$Re = \rho_{\Gamma} v_{\Gamma} d_{\text{отв}} / \eta_{\Gamma}, \quad (1)$$

где ρ_{Γ} – плотность газа (воздуха), кг/м³;
 v_{Γ} – характерная скорость потока газа, м/с;
 $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия, м;
 η_{Γ} – динамическая вязкость газа, Па·с;
 число Вебера

$$We = \rho_{\Gamma} v_{\Gamma}^2 d_{\text{отв}} / \sigma_{\text{ж}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ж}}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (раствора пенообразователя), Н/м;

число Фруда

$$Fr = v_{\Gamma}^2 / (g d_{\text{отв}}), \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

число Маха

$$M = v_r / v_{зв}, \quad (4)$$

где $v_{зв}$ – скорость звука в воздухе, м/с;
число Бонда

$$Bo = (\rho_{ж} - \rho_r)gd_{п}^2 / \sigma_{ж}, \quad (5)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (раствора пенообразователя), кг/м³;
 $d_{п}$ – диаметр пузырька, м;
число Моргона

$$Mo = \frac{(\rho_{ж} - \rho_r)g\eta_{ж}^4}{\rho_{ж}^2\sigma_{ж}^3}, \quad (6)$$

где $\eta_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости (раствора пенообразователя), Па·с;
число капиллярности

$$Ca = v_r\eta_r / \sigma_{ж}. \quad (7)$$

Для определения среднего газосодержания использовался подход, описанный в работе [18]:

$$\varphi_{ср} = \sqrt{Fr} / (1 + \sqrt{Fr}). \quad (8)$$

Для расчета теоретического диаметра пузырька применялась следующая формула [20]:

$$d_{п} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4B}{\sqrt{Q_1}}} - Q_1 + \sqrt{Q_1} \right) \quad \text{при} \quad Q_1 = \sqrt[3]{2B^2 + 2\sqrt{2A^3 + B^4}} + \sqrt[3]{2B^2 - 2\sqrt{2A^3 + B^4}}, \quad (9)$$

$$A = \frac{3\eta_{ж}v_r d_{отв}^2}{(\rho_{ж} - \rho_r)g}, \quad B = \frac{3\sigma_{ж}d_{отв}}{(\rho_{ж} - \rho_r)g}.$$

Кроме того, в работе принята во внимание аналогия гидродинамики процессов кипения и барботажной жидкости газом [21], а также процессов испарения и кипения [21].

Известно [22, с. 36], что ПАВ даже при очень незначительной концентрации существенно влияют на движение газового пузырька в жидкости. Так, скорость всплытия одиночного пузырька в 1,5 раза меньше скорости всплытия в жидкостях, полностью свободных от ПАВ [22, с. 61]. Данное явление объясняется тем, что при движении газового пузырька в растворе пенообразователя на поверхности раздела фаз накапливаются молекулы ПАВ (мицеллы), которые лишают границу раздела подвижности – пузырек движется, как бы окруженный жесткой оболочкой.

Исследование режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ (растворе пенообразователя) для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии проводилось в прозрачной емкости объемом $V = 0,003$ м³. Результаты исследований показаны в таблице 1.

В выходное отверстие, расположенное в центре дна емкости, диаметром 4 мм вставлялся сменный насадок (сопло) соответствующего диаметра (рис. 1), изготовленный по технологии 3D-печати с помощью смолы, типичная усадка и погрешность которой составляет не более 1,5 %. Таким образом, имелась возможность подачи воздуха от компрессора через отверстия: $d_{отв1} = 4$ мм (без насадков), а также $d_{отв2} = 2$, $d_{отв3} = 1$ и $d_{отв4} = 0,5$ мм соответственно. Далее емкость заполнялась раствором пенообразователя целевого назначения марки ПО-РЗФ (6 %) ($\sigma_{ж} = 0,0256$ Н/м, $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³, $\eta_{ж} = 10^{-3}$ Па·с) объемом $V_{ж} = 0,002$ м³. Следует подчеркнуть, что в исследованиях для получения пены готовился именно рабочий раствор пенообразователя, т.е. водный раствор с рекомендуемой производителем концентрацией пенообразователя в нем (указана в скобках в названии марки пенообразователя).

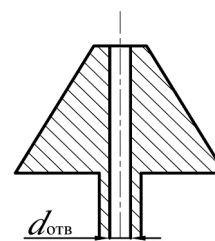


Рисунок 1. – Общий вид сменного насадка (сопла) с различными диаметрами выходного отверстия

Таблица 1. – Генерирование пузырьков на затопленном отверстии

$d_{отв}$, мм	Расход воздуха, подаваемого компрессором, Q , м ³ /ч				
	0,030	0,039	0,059	0,149	0,188
4,0					
2,0					
1,0					
0,5					

Как правило, при отклонении концентрации пенообразователя от рекомендуемой производителем наблюдается существенное ухудшение пенообразования, в том числе кратности пены. По этой причине растворы пенообразователя с иной концентрацией активного компонента не рассматривались. Фотоаппарат устанавливался от емкости строго на фиксированном расстоянии, равном 80 ± 1 см. Показания расходов воздуха снимались по поверенному ротаметру, погрешность которого составляет 2,5 %. Эксперименты проводились при стандартных условиях (температура – $T_r = 293 \pm 0,5$ К, $T_{ж} = 293 \pm 0,1$ К, атмосферное давление – $p_{атм} = 99,8 \pm 0,2$ кПа, относительная влажность воздуха – $RH = 38,2–46,8$) с каждым отверстием от $d_{отв1} = 4$ до $d_{отв4} = 0,5$ мм во всем диапазоне расходов воздуха от 0,018 до 0,188 м³/ч. После каждого эксперимента раствор пенообразователя сливался, емкость промывалась проточной водой и сушилась. Для нового эксперимента заново заливался рабочий раствор пенообразователя и эксперимент повторялся не менее трех раз для каждого отверстия при всех расходах воздуха. Фотографирование проводилось в течение 10–30 с до образования пенного слоя на поверхности раствора пенообразователя, высота которого доходила до верхней кромки емкости. Фотографии режимов, полученных в ходе экспериментов, подвергались цифровому анализу и обработке.

В качестве определяющего критерия для классификации режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены было выбрано число Рейнольдса (формула (1)) с учетом ряда других чисел (формулы (2)–(4) и (7), (8)).

Результаты расчетов критериев подобия представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты расчетов критериев подобия

$d_{отв}$, мм	Q , м ³ /ч	v_r , м/с	Re	We	Fr	φ_{cp}	$Ca \cdot 10^3$	M
4	0,030	0,66	174,06	0,081	11,10	0,769	0,46	0,002
	0,039	0,86	226,80	0,137	18,85	0,813	0,60	0,003
	0,059	1,30	342,84	0,313	43,07	0,868	0,91	0,004
	0,149	3,27	862,36	1,982	272,50	0,943	2,30	0,010
	0,188	4,13	1089,16	3,161	434,68	0,954	2,90	0,012
2	0,030	2,65	349,43	0,651	357,93	0,950	1,86	0,008
	0,039	3,45	454,92	1,103	606,65	0,961	2,42	0,010
	0,058	5,13	676,44	2,439	1341,33	0,973	3,60	0,015
	0,145	12,83	1691,76	15,253	8389,85	0,989	9,02	0,038
	0,180	15,92	2099,21	23,484	12917,76	0,991	11,19	0,047
1	0,025	9,16	603,92	3,887	8553,07	0,989	6,44	0,027
	0,032	11,73	673,36	6,375	14025,78	0,992	8,24	0,035
	0,051	18,69	1232,23	16,184	35608,17	0,995	13,13	0,055
	0,114	41,78	2754,56	80,872	177937,66	0,998	29,36	0,123
	0,153	56,07	3696,70	145,654	320473,49	0,998	39,40	0,165
0,5	0,018	25,48	839,95	15,039	132360,94	0,997	17,90	0,075
	0,023	32,55	1073,01	24,543	216004,59	0,998	22,87	0,096
	0,031	43,88	1446,50	44,603	392549,32	0,998	30,83	0,129
	0,056	79,26	2612,81	145,526	1280764,04	0,999	55,70	0,233
	0,062	87,76	2893,01	178,413	1570197,27	0,999	61,67	0,258

На основе визуального анализа, с учетом рассчитанных значений характеристических чисел (табл. 2) были выделены три последовательно сменяющие друг друга режима генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены на затопленном отверстии: пузырьковый (рис. 2а), гирляндовый (рис. 2б) и струйный (рис. 2в).

Пузырьковый режим характеризуется значениями чисел Рейнольдса ($Re < 1000$), Вебера ($We \leq 15$), низким газосодержанием ($\varphi_{cp}^{min} = 0,769$; $\varphi_{cp}^{max} = 0,997$) и небольшими скоростями ($Ca_{max} = 0,018$; $M_{max} = 0,075$). Для гирляндового режима (так называемый переходный режим) можно отметить следующие особенности: $1000 \leq Re \leq 2000$; $3 \leq We \leq 45$; $\varphi_{cp}^{min} = 0,954$; $\varphi_{cp}^{max} = 0,998$; $Ca_{max} = 0,031$ и $M_{max} = 0,129$. Струйный режим начинается при $Re > 2000$; $We \geq 80$; $\varphi_{cp}^{min} = 0,998$; $Ca_{min} = 0,029$ и $M_{min} = 0,123$.

Таким образом, самым эффективным можно считать струйный режим, который обеспечивает наибольшее газонасыщение раствора пенообразователя с минимальными диаметрами пузырьков. Число Моргтона, рассчитанное по формуле (6), равно $Mo = 56,40 \cdot 10^{-11}$. А так

как не выполняется условие $Re \leq 1,1Mo^{-1/5}$ [22, с. 60], все пузырьки имеют эллиптическую форму ($Re_{min} = 174,06$; $1,1Mo^{-1/5} = 77,83$). Дополнительным подтверждением эффекта сжатия пузырьков в растворе с ПАВ является выполнение неравенства $Bo > 1$ для рассчитанного числа Бонда. С использованием методов цифровой обработки изображений для каждого из режимов были определены присущие им геометрические характеристики: для пузырькового режима – эквивалентный диаметр пузырька на отверстии $d_{п(э)}$ и шаг между пузырьками h_n ; для гирляндового – расстояние между гирляндой и пузырьками h_r и высота гирлянды H_r ; для струйного – высота H_ϕ и угол раскрытия факела струи β_ϕ .

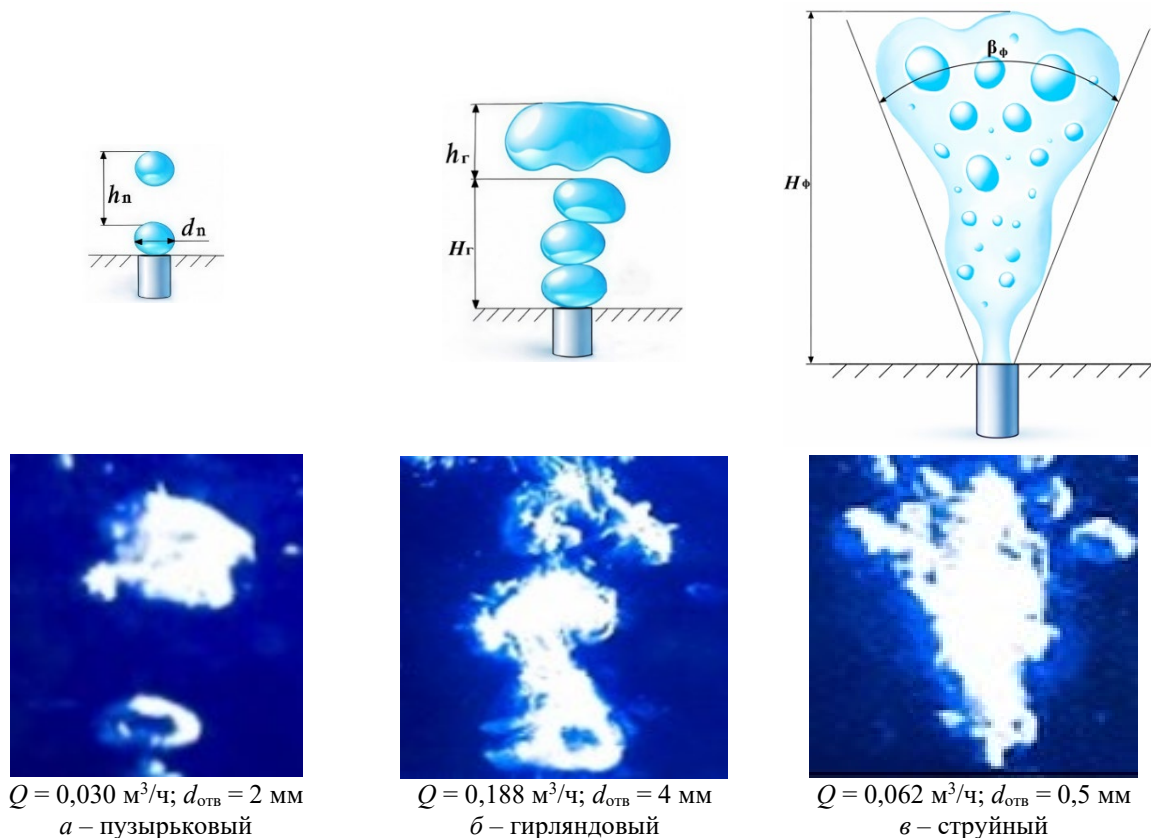


Рисунок 2. – Режимы генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены на затопленном отверстии (первый ряд – схема; второй ряд – увеличенное фото)

Пузырьки воздуха имели эллиптическую форму даже при малых скоростях воздуха в отверстии ($v_r^{min} = 0,66 \text{ м/с}$). По этой причине оцениваются эквивалентные диаметры пузырьков.

Расчет эквивалентного диаметра пузырька на затопленном отверстии проводился исходя из условия:

$$\left| (S_{элл} - S_{окр}) / S_{элл} \right| \cdot 100 \% \leq 10 \%, \quad (10)$$

где $S_{элл}$ и $S_{окр}$ – площади эллипса и окружности, м^2 .

Таким образом,

$$2\sqrt{0,9r_a r_b} \leq d_{п(э)} \leq 2\sqrt{1,1r_a r_b}, \quad (11)$$

где r_a и r_b – большой и малый радиусы эллипса, м.

Данные неравенства обеспечивают приемлемую степень приближения формы пузырька к осесимметричной. Стоит отметить, что определение реальных размеров пузырьков (r_a и r_b) выполнялось с учетом масштабного коэффициента, который рассчитывался как отношение показаний эталонной линейки, установленной непосредственно на затопленном отверстии, к показаниям линейки, закрепленной на внешней стенке емкости.

Численные значения параметров, соответствующих режимам генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены, представлены в таблицах 3, 4 и 5 соответственно.

Таблица 3. – Характеристики пузырькового режима

v_r , м/с	Re	$d_{отв}$, мм	$d_{п(э)}$, мм	Bo	$h_{п}$, мм	$d_{п(р)}$, мм
0,66	174,06	4,0	4,0	6,1	19,9	4,60
0,86	226,80	4,0	4,2	6,7	18,5	4,61
1,30	342,84	4,0	4,4	7,4	14,4	4,62
2,65	349,43	2,0	3,4	4,4	17,0	3,68
3,27	862,36	4,0	4,4	7,4	10,2	4,70
3,45	454,92	2,0	3,3	4,2	12,7	3,70
5,13	676,44	2,0	3,3	4,2	4,6	3,73
9,16	603,92	1,0	2,9	3,2	5,5	2,97
11,73	673,36	1,0	3,4	4,4	5,6	3,00
25,48	839,95	0,5	2,9	3,2	4,1	2,41

Примечание: $d_{п(э)}$ и $d_{п(р)}$ – эквивалентный и расчетный диаметры пузырька, мм.

Таблица 4. – Характеристики гирляндового режима

v_r , м/с	Re	$d_{отв}$, мм	H_r , мм	h_r , мм
4,13	1089,16	4,0	67,1	10,1
12,83	1691,76	2,0	55,4	8,2
15,92	2099,21	2,0	70,1	6,9
18,69	1232,23	1,0	18,6	7,1
32,55	1073,01	0,5	13,9	5,4
43,88	1446,50	0,5	16,2	2,4

Таблица 5. – Характеристики струйного режима

v_r , м/с	Re	$d_{отв}$, мм	$H_{ф}$, мм	$\beta_{ф}$, градусы
41,78	2754,56	1,0	17,1	88,2
56,07	3696,70	1,0	18,2	78,9
79,26	2612,81	0,5	18,0	83,7
87,76	2893,01	0,5	17,1	75,6

Заключение

В работе проведены исследования режимов генерирования пузырьков в растворе с ПАВ для получения компрессионной пены и их геометрических характеристик на затопленном отверстии. Установлены три режима: пузырьковый ($Re < 1000$; $We \leq 15$; $\varphi_{ср}^{min} = 0,769$; $\varphi_{ср}^{max} = 0,997$; $Ca_{max} = 0,018$; $M_{max} = 0,075$); гирляндовый ($1000 \leq Re \leq 2000$; $3 \leq We \leq 45$; $\varphi_{ср}^{min} = 0,954$; $\varphi_{ср}^{max} = 0,998$; $Ca_{max} = 0,031$; $M_{max} = 0,129$); струйный ($Re > 2000$; $We \geq 80$; $\varphi_{ср}^{min} = 0,998$; $Ca_{min} = 0,029$; $M_{min} = 0,123$). Отмечено, что даже в пузырьковом режиме с большими скоростями воздушного потока ($v_r^{min} = 0,66$ м/с) на затопленном отверстии в растворе с ПАВ генерируются деформированные пузырьки: $Bo > 1$; $Re > 1,1 Mo^{-1/5}$.

С целью углубленного изучения струйного режима, который оказался наиболее эффективным для генерирования компрессионной пены, следует провести экспериментальные исследования с большими скоростями воздушного потока ($v > 100$ м/с) и изучить влияние природы пенообразователя на характеристики пузырьков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с возможностью изменения расхода огнетушащего средства: от моделирования до огневых испытаний: монография / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, В.В. Пармон. – Мн.: УГЗ, 2024. – 189 с.
2. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2023. – 244 с.
3. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2019. – 224 с.

4. Алешков, М.В. Применение компрессионной пены при тушении пожаров в зданиях повышенной этажности / М.В. Алешков, В.М. Ройтман, С.С. Воевода [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 3. – С. 59–62. – DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62. – EDN: RLEBRV.
5. Архипов, В.А. Анализ механизма потери устойчивости одиночного пузырька при малых значениях числа Рейнольдса / В.А. Архипов, И.М. Васенин, А.С. Усанина // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 3 (307). – С. 51–60. – EDN: OHLFSJ.
6. Воробьев, М.А. Формирование мелкодисперсной газовой фазы в восходящем и опускном потоке жидкости / М.А. Воробьев, О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.В. Чинак // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2012. – № 4. – С. 75–81. – EDN: PFDBCX.
7. Воробьев, М.А. Режимы генерации пузырей в потоке вязкой жидкости / М.А. Воробьев, О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.В. Чинак // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 70–75. – DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-3-70-75. – EDN: VHLIKR.
8. Лисицын, А.Н. Гидрогазодинамика всплывания пузырей перегретого водяного пара в подсолнечном масле в процессе барботажа / А.Н. Лисицын, А.А. Федоров, С.М. Волков [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2022. – № 4 (54). – С. 11–24. – DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24. – EDN: YACUXW.
9. Хентов, В.Я. Барботаж. Барботажный аэрозоль. Проблемы и решения: монография / В.Я. Хентов, Е.Г. Семинов, Ю.В. Власов, В.М. Гасанов. – Изд. 2-е, стер. – СПб.: Химиздат, 2024. – 193 с.
10. Чанцев, В.Ю. Анализ вертикального движения воздушно-пузырьковой завесы в воде / В.Ю. Чанцев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 46. – С. 64–70. – EDN: YNFMMD.
11. Волков, П.К. Динамика жидкости с пузырьками газа / П.К. Волков // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 1996. – № 3. – С. 75–88.
12. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
13. Козелков, А.С. Численное моделирование свободного всплывания пузырька воздуха / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. – № 6. – С. 3–14. – DOI: 10.7868/S0568528116060074. – EDN: YSXLCL.
14. Лабунцов, Д.А. Механика двухфазных систем: учеб. пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Издательский дом НЭИ, 2016. – 383 с. – ISBN 978-5-383-00964-2.
15. Шакирзянов, Ф.Н. Что век грядущий нам готовит? / Ф.Н. Шакирзянов, П.А. Бутырин, С.А. Абдулкеримов, Д.В. Михеев // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 9. – С. 1226–1229. – DOI: 10.31857/S0367676522090265. – EDN: AMRNOC.
16. 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.
17. Кобызев, С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива / С.В. Кобызев // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 11. – С. 49–59. – EDN: OKIHLL.
18. Акимов, В.В. Определение газосодержания на барботажных тарелках / В.В. Акимов, А.М. Трушин, Е.А. Дмитриев // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 22, № 2 (82). – С. 38–42. – EDN: QZVMDH.
19. Сафронова, Е.В. Массообмен в струйном аппарате / Е.В. Сафронова, Г.Н. Абаев // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 6. – С. 84–88. – EDN: PGLDEF.
20. Камлюк, А.Н. Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости воздушно-механических пен низкой кратности / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 54–65. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-1.54. – EDN: EXXZPA.
21. Анохина, Е.В. Исследование аналогии процессов испарения и кипения жидкостей / Е.В. Анохина // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2008. – № 4 (146). – С. 43–45. – EDN: JUPYLF.
22. Носырев, М. А. Определение скоростей и концентраций дисперсных частиц при стесненном движении на основе минимума интенсивности диссипации энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Носырев Михаил Андреевич; Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева. – М., 2016. – 112 с. – EDN: JICNVD.

**О режимах генерирования пузырьков в растворе с ПАВ
для получения компрессионной пены**

On bubble generation regimes in a surfactant solution for producing compression foam

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», ученый секретарь

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»,
Scientific Secretary

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

Гусаров Игорь Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, начальник лаборатории

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

Email: igor.gusarov.2000@mail.ru

Igor' S. Gusarov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific Education,
Head of Laboratory

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

Email: igor.gusarov.2000@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0665-8212

Масюк Станислав Артемович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, инженер

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

Email: stas.masyuk18@gmail.com

Stanislav A. Masyuk

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific Education,
Engineer

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

Email: stas.masyuk18@gmail.com

ORCID: 0009-0002-4289-1676

ON BUBBLE GENERATION REGIMES IN A SURFACTANT SOLUTION FOR PRODUCING COMPRESSION FOAM

Kamlyuk A.N., Gusarov I.S., Masyuk S.A.

Purpose. To investigate the regimes of bubble generation in a surfactant solution for producing compression foam and their geometric characteristics at a submerged orifice. Based on the obtained experimental data, to identify and describe the principal regimes of bubble generation in a surfactant solution for producing compression foam. To determine the characteristic Reynolds, Weber, Froude, Mach, capillarity, Bond and Morton numbers that can be used to assess the bubble generation regimes in a surfactant solution for producing compression foam and their geometric characteristics at a submerged orifice.

Methods. The general methodology of the work involved the use of theoretical (analysis, synthesis, comparison) and experimental research methods. The methods of visualization and photography, digital image processing, and a computational method were applied.

Findings. Three successively alternating modes of bubble generation in a surfactant solution at a submerged orifice were experimentally established: bubble, garland (transitional), and jet. The criteria for these modes were determined: for bubble: Reynolds number – $Re < 1000$, Weber – $We \leq 15$, capillarity – $Ca_{\max} = 0.018$, Mach – $M_{\max} = 0.075$, and the average gas content – $\varphi_{\text{av}}^{\min} = 0.769$, $\varphi_{\text{av}}^{\max} = 0.997$; for garland: $1000 \leq Re \leq 2000$, $3 \leq We \leq 45$, $Ca_{\max} = 0.031$, $M_{\max} = 0.129$, $\varphi_{\text{av}}^{\min} = 0.954$, $\varphi_{\text{av}}^{\max} = 0.998$; for jet: $Re > 2000$, $We \geq 80$, $Ca_{\min} = 0.029$, $M_{\min} = 0.123$, $\varphi_{\text{av}}^{\min} = 0.998$. It is shown that even at low air velocities, deformed (elliptical) bubbles are generated in a solution with surfactants as confirmed by the Bond number values $Bo > 1$ and $Re > 1,1Mo^{-1/5}$. Geometric characteristics are defined for each mode: for the bubble mode, the equivalent bubble diameter and the interbubble pitch; for the garland mode, the distance between the garland and the bubbles and the garland height; and for the jet mode, the torch height and its opening angle. The jet mode is considered the most effective in terms of gas saturation and bubble dispersion.

Application field of research. Research of the modes of bubble generation in a surfactant solution for obtaining compression foam and their geometric characteristics at a submerged orifice can be used to optimize barbotage processes for fire extinguishing, flotation, food production, and the production of porous materials.

Keywords: surfactant, compression foam, bubbles, barbotage, Reynolds number, Weber number, Froude number, Mach number, capillarity number, Bond number, Morton number.

(The date of submitting: March 12, 2026)

REFERENCES

1. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Parmon V.V. *Stvol pozharnyy ruchnoy universal'nyy kombinirovannyi s vozmozhnost'yu izmeneniya raskhoda ognetchashchego sredstva: ot modelirovaniya do ognevyykh ispytaniy* [Universal combined hand fire nozzle with the ability to change the flow rate of extinguishing agent: from modeling to fire tests]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2024. 189 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennye orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing systems]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus)
3. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressiomaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus)
4. Aleshkov M.V., Roitman V.M., Voevoda S.S., Molchanov V.P., Sharipkhanov S.D., Fedyaev V.D. Prime-nenie kompressionnoy peny pri tushenii pozharov v zdaniyakh povyshennoy etazhnosti [The use of compression foam in extinguishing fires in high-rise buildings]. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2019. Pp. 59–62. (rus). DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62. EDN: RLEBRV.
5. Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Usanina A.S. Analiz mekhanizma poteri ustoychivosti odinochnogo puzyr'ka pri malykh znacheniyakh chisla Reynol'dsa [Analysis of the stability loss mechanism of a single bubble at low Reynolds numbers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2011. Vol. 52, No. 3 (307). Pp. 51–60. (rus). EDN: OHLFSJ.
6. Vorob'ev M.A., Kashinskiy O.N., Lobanov P.D., Chinak A.V. Formirovanie melkodispersnoy gazovoy fazy v voskhodyashchem i opusknom potoke zhidkosti [Formation of fine gas phase in ascending and descending liquid flow]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2012. No. 4. Pp. 75–81. (rus). EDN: PFDBCX.

7. Vorob'ev M.A., Kashinskiy O.N., Lobanov P.D., Chinak A.V. Rezhimy generatsii puzyrey v potoke vyazkoy zhidkosti [Regimes of bubble generation in the flow of viscous liquid]. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015. Vol. 10, No. 3. Pp. 70–75. (rus). DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-3-70-75. EDN: VHLIKR.
8. Lisitsyn A.N., Fedorov A.A., Volkov S.M., Fedorov A.V., Romanov N.N. Gidrogazodinamika vsplytiya puzyrey peregretoogo vodyanogo para v podsolnichnom masle v protsesse barbotazha [Hydro-gas dynamics of bubbles of superheated water vapor in sunflower oil during bubbling]. *Processes and Food Production Equipment*, 2022. No. 4. Pp. 11–24. (rus). DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24. EDN: YACUXW.
9. Khentov V.Ya., Semin E.G., Vlasov Yu.V., Gasanov V.M. *Barbotazh. Barbotazhnyy aerazol'. Problemy i resheniya* [Barbotage. Barbotage aerosol. Problems and solutions]: monograph. 2nd ed. Saint Petersburg: Khimizdat, 2024. 193 p. (rus)
10. Chantsev V.Yu. Analiz vertikal'nogo dvizheniya vozdušno-puzyr'kovoy zavesy v vode [The vertical motion of air-bubble curtain analysis]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2017. No. 46. Pp. 64–70. (rus). EDN: YNFMMD.
11. Volkov P.K. Dinamika zhidkosti s puzyr'kami gaza [Dynamics of liquid with gas bubbles]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1996. No. 3. Pp. 75–88. (rus)
12. Kutateladze S.S., Styrkovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Energiya, 1976. 296 p. (rus)
13. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Lashkin S.V., Tarasova N.V., Tyatyushkina E.S. Numerical modeling of the free rise of an air bubble. *Fluid Dynamics*, 2016. Vol. 51, No. 6. P. 709–721. DOI: 10.1134/S0015462816060016. EDN: YUVOYB.
14. Labuntsov D.A., Yagov V.V. *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]: tutorial for universities. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2016. 383 p. (rus). ISBN 978-5-383-00964-2.
15. Shakirzyanov F.N., Butyrin P.A., Abdulkerimov S.A., Mikheev D.V. What does the next century have in store for us? *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022. Vol. 86, No. 9. Pp. 1015–1018. DOI: 10.3103/s106287382209026x. EDN: KDGfVA.
16. Kamlyuk A.N. Kolichestvennoe opisanie mekhanizmov obrazovaniya vozdušno-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.
17. Kobzyev S.V. Metodika rascheta koeffitsientov massootdachi pri osushke uglevodorodnogo raketnogo topliva [Method of calculating mass transfer coefficients during drying of hydrocarbon rocket fuel]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2011. No. 11. Pp. 49–59. (rus). EDN: OKIHLT.
18. Akimov V.V., Trushin A.M., Dmitriev E.A. Opredelenie gazosoderzhaniya na barbotazhnykh tarelkakh [Determination of gas content on barbotage trays]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2008. Vol. 22, No. 2 (82). Pp. 38–42. (rus). EDN: QZVMDH.
19. Safronova E.V., Abaev G.N. Mass transfer in a jet device. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005. Vol. 78, No. 6. Pp. 1133–1137. DOI: 10.1007/s10891-006-0044-y. EDN: XKBHMB.
20. Kamlyuk A.N. Podkhody k raschetu kratnosti, dispersnosti i ustoychivosti vozdušno-mekhanicheskikh pen nizkoy kratnosti [Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability of low expansion air-mechanical foams] *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 1. Pp. 54–65. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-1.54. EDN: EXXZPA.
21. Anokhina E.V. Issledovanie analogii protsessov ispareniya i kipeniya zhidkostey [Comparison of evaporation with pool boiling of the liquids]. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2008. No. 4 (146). Pp. 43–45. (rus). EDN: JUPYLF.
22. Nosyrev M.A. *Opredelenie skorostey i kontsentratsiy dispersnykh chastits pri stesnenom dvizhenii na osnove minimuma intensivnosti dissipatsii energii* [Determination of velocities and concentrations of dispersed particles under hindered motion based on the minimum of energy dissipation intensity]: PhD tech. sci. diss. 05.17.08. D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia. Moscow, 2016. 112 p. (rus). EDN: JICNVD.

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N., Gusarov I.S., Masyuk S.A.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.