

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-127-140>
УДК 532.694.1:614.842.615



Оригинальная статья

А. Н. Камлюк*, Э. Г. Говор, А. О. Лихоманов

*Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь*

**ЗАВИСИМОСТЬ ДИСПЕРСНОСТИ НИЗКОКРАТНЫХ ПЕН ОТ ПОЛОЖЕНИЯ
В СЛОЕ ПЕНЫ ПО ВЫСОТЕ**

Аннотация. Проведен комплексный анализ моделей структуры пен низкой кратности, используемых в системах пожаротушения. В качестве наиболее адекватной модели, приближенной к реальным пенам, была выбрана ячеистая модель, занимающая промежуточное положение между сферической и полиэдрической структурами. Основной целью исследования было установление зависимости среднего диаметра пузырьков пены от положения в слое пены по высоте, что является критически важным для понимания механизмов разрушения пены и прогнозирования ее эксплуатационных характеристик. Для сравнения полиэдрических пен, получаемых различными способами, введена новая классификация пен по дисперсному составу с использованием понятий минимального и максимального диаметра пузырьков. Разработана полуэмпирическая модель пен низкой кратности, включающая расчет объемной скорости истечения жидкости по каналам Плато–Гиббса (капиллярам) при установившемся режиме течения и такие характеристики пен, как кратность и устойчивость. Для верификации теоретической зависимости были проведены экспериментальные исследования с использованием пенообразователя «Синтек-6НС», в ходе которых зафиксировано отчетливое разделение пенного столба на зоны с различной дисперсностью и формой пузырьков. Полученная экспериментальная зависимость для среднего диаметра пузырьков пены хорошо согласуется с предложенным авторами уравнением.

Ключевые слова: средний диаметр пузырька, дисперсность пены, кратность пены, объемная устойчивость пены, показатель смачивающей способности, канал Плато–Гиббса, пеногенерирующее устройство

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Камлюк Андрей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель начальника по научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты, <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>, e-mail: kan@ucsp.by; Говор Эдуард Геннадьевич – ведущий научный сотрудник отдела научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты, <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>, e-mail: govor-098@mail.ru; Лихоманов Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем безопасности Университета гражданской защиты, <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>, e-mail: alexlikh20@gmail.com

Вклад авторов: Камлюк Андрей Николаевич – определение целей, задач исследования, формулировка введения и заключения, проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных, определение закономерностей и зависимостей характеристик пены и физических свойств пенообразователей, из которых она получена, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; Говор Эдуард Геннадьевич – проведение экспериментальных исследований по определению кратности, устойчивости и дисперсности пены, набор текста статьи; Лихоманов Алексей Олегович – проведение экспериментальных исследований по определению кратности и устойчивости пены, работа с графическим материалом, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Камлюк, А. Н. Зависимость дисперсности низкократных пен от положения в слое пены по высоте / А. Н. Камлюк, Э. Г. Говор, А. О. Лихоманов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 127–140. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-127-140>

Поступила в редакцию: 18.03.2025

Доработанный вариант: 17.07.2025

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Andrei N. Kamluk*, Eduard G. Govor, Alexey O. Likhomanov

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
25, Mashinostroiteley St., 220118, Minsk, Belarus*

DEPENDENCE OF DISPERSION OF LOW-EXPANSION FOAM ON THE POSITION IN THE FOAM LAYER BY HEIGHT

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of structural models for low-expansion foams used in fire suppression systems. The cellular model, which occupies an intermediate position between spherical and polyhedral structures, was selected as the most adequate one, closely approximating real foams. The primary research objective was to establish the dependence of the average foam bubble diameter on the position within the foam layer by height. This relationship is crucial for understanding foam breakdown mechanisms and predicting its operational performance. To facilitate the comparison of polydisperse foams produced by different methods, a new classification of foams by dispersion composition was introduced, utilizing the concepts of minimum and maximum bubble diameters. A semi-empirical model for low-expansion foams was developed, incorporating the calculation of the volumetric flow rate of liquid through the Plateau-Gibbs channels (capillaries) under steady-state flow conditions, as well as key foam characteristics such as expansion ratio and stability. Experimental studies using the “Sintek-6NS” foaming agent were conducted to verify the theoretical dependence, revealing a clear stratification of the foam column into zones with varying dispersion and bubble shapes. The obtained experimental dependence for average foam bubble diameter shows good agreement with the equation proposed by the authors.

Keywords: average diameter of foam bubbles, dispersion of foam, foam expansion, volume stability of foam, wetting ability, Plateau–Gibbs border, foam generating device

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the authors: *Andrei N. Kamluk* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Scientific and Innovation Activities at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>, e-mail: kan@ucp.by; *Eduard G. Govor* – Leading Researcher of the Department of Scientific and Innovation Activities at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>, e-mail: govor-098@mail.ru; *Alexey O. Likhomanov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automatic System Security at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>, e-mail: alexlikh20@gmail.com

Contribution of the authors: *Andrei N. Kamluk* – the determination of the aims and objectives of the study, formulation of the introduction and conclusion, carrying out experimental studies and analysis of the experimental data, determination of patterns and dependencies of the characteristics of the foam and the physical properties of the foaming agents, interpretation of the research results, editing the text of the manuscript; *Eduard G. Govor* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate, volume stability and dispersion of foam, writing the text of the manuscript; *Alexey O. Likhomanov* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate and volume stability of foam, working with graphic material, editing the text of the manuscript.

For citation: Kamluk A. N., Govor E. G., Likhomanov A. O. Dependence of dispersion of low-expansion foam on the position in the foam layer by height. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 127–140 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-127-140>

Received: 18.03.2025

Modified: 17.07.2025

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Пены являются чрезвычайно сложными неустойчивыми дисперсными системами. Изучением их фундаментальных свойств занимаются ученые, сфера исследовательских интересов которых находится на стыке химических, физико-математических и технических наук. Наибольшего внимания с точки зрения ликвидации пожаров заслуживают жидкие воздушно-механические низкократные пены (далее – пены) [1, с. 5–13, 275–285, 294–322], которые состоят

из пузырьков газа (размер около 10^{-3} м), разделенных прослойками жидкости [2; 3]. Для получения даже минимально устойчивой пены требуются стабилизаторы, которые будут адсорбироваться на границе раздела газ–раствор. В качестве стабилизаторов используются пенообразователи, основу которых составляют поверхностно-активные вещества (ПАВ). В большинстве случаев пены получаются взбиванием жидкости на поверхности (на оросителях в автоматических установках пенного пожаротушения), выдуванием через отверстия в металлической сетке (в насадках на пожарные стволы) либо насыщением жидкости газом под давлением (в установках генерирования компрессионной пены).

К основным характеристикам пен относят кратность, устойчивость и дисперсность. По кратности пены делятся на пены низкой (от 4 до 20), средней (от 21 до 200) и высокой (более 200) кратности. Под кратностью понимают отношение объема пены к объему водного раствора пенообразователя, из которого она получена [4, с. 20]. Присутствие пенообразователя сдерживает стекание жидкости, отчего процесс разрыва пленки замедляется, но не прекращается полностью. Стеkanie жидкости начинается с момента образования пены под действием гравитационных сил до момента достижения равновесия в дисперсной системе.

Ранее установлено, что устойчивость пены линейно связана с ее кратностью, то есть чем больше кратность, тем более устойчива пена к разрушению при прочих равных условиях. Такая связь объемной устойчивости низкократных пен с их кратностью исследована в [5].

В нашей работе рассмотрены вопросы по выявлению факторов, оказывающих влияние на дисперсность пен, под которой понимается величина, обратная среднему диаметру пузырька (d_{cp}):

$$D = \frac{1}{d_{cp}}. \quad (1)$$

По структуре, в зависимости от диаметра пузырьков, различают монодисперсные и полидисперсные пены, а в зависимости от их геометрической формы – сферические, ячеистые и полиэдрические [6, с. 24–39]. Деление полидисперсных пен на высокодисперсную и низкодисперсную очень условное. Так, в [7] низкодисперсная (малоустойчивая) пена имеет средний диаметр пузырьков $d_{cp} \approx 0,4 \div 1$ мм, а высокодисперсная (устойчивая) – $d_{cp} \approx 0,02$ мм (при кратности $K = 10$). В то же время в [8] под низкодисперсной пеной понимают пену со средним размером пузырьков более 1 мм, а под высокодисперсной – менее 1 мм. В [9] пены делятся уже на четыре вида: низкодисперсная с размером частиц в пределах нескольких миллиметров, высокодисперсная – средний диаметр пузырьков $d_{cp} > 0,1$ мм, мини-пена, у которой $0,05 \text{ мм} \leq d_{cp} \leq 0,1 \text{ мм}$, и микро-пена с $d_{cp} < 0,05$ мм.

В данном исследовании для удобства сравнения полидисперсных пен, получаемых различными способами, используются понятия минимального диаметра (d_{min}) и максимального диаметра (d_{max}) пузырьков:

$$d_{min} = 0,5d_{cp}, \quad d_{max} = 1,5d_{cp}, \quad (2)$$

а классификация ведется относительно значений d_{cp} (рис. 1).

Численные значения d_{cp} , а значит, и дисперсности (D) можно получить для случаев выдувания пузырьков на затопленных (генерирование компрессионной пены) и незатопленных (генерирование пены на сетках в насадках на пожарные стволы) отверстиях, а также при дезинтеграции потока раствора пенообразователя в момент удара о поверхность (генерирование пены на оросителях) на основании теории, представленной в [10]. При генерировании пен описанными выше способами получение монодисперсных пен в чистом виде практически невозможно, так как сразу после образования пена разрушается, жидкость начинает стекать (синерезис), а в результате диффузии воздух из разрушенных пузырьков переходит в соседние, увеличивая их размеры по сравнению с первоначальными, в связи с чем средний диаметр пузырька будет зависеть от положения в слое пены по высоте и меняться со временем. По этой причине строгое математическое описание процессов, протекающих в пенах, в настоящее время затруднено, а для их анализа используются различные модельные структуры, название которых чаще всего определяют

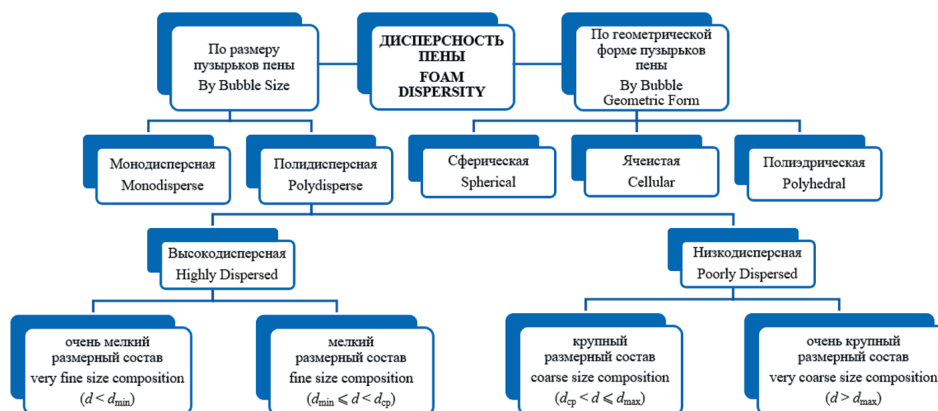


Рис. 1. Классификация пен по дисперсному составу; d – фактический диаметр пузырька, d_{cp} – средний диаметр пузырька, d_{min} – минимальный диаметр пузырька, d_{max} – максимальный диаметр пузырька

Fig. 1. The classification of foams by dispersion composition; d – actual diameter of the bubble, d_{cp} – average diameter of the bubble, d_{min} – minimum bubble diameter, d_{max} – maximum bubble diameter

по геометрической форме пузырьков. Непосредственно такие упрощенные модели позволяют связать важные характеристики пен – кратность, дисперсность и устойчивость, на уровне, достаточном для интерпретации экспериментальных данных.

Модели структуры пен и их анализ. В обзорных работах [2; 3] указывается на зависимость геометрической формы газовых пузырьков от газосодержания (ϕ). Например, пены, которые содержат более 95 % газа, преимущественно имеют форму многогранников – полиэдров, которые часто являются додекаэдрами, в то же время для монодисперсной сферической пены максимальное газосодержание составляет порядка $\phi \approx 0,74$ [11, с. 6]. Сферическая структура соответствует наиболее плотной упаковке газовых пузырьков, имеющих форму шара, что согласуется со значением кратности $K_{min} = 3,86 \approx 4$. Эта величина кратности показывает предел существования сферической структуры пены, ниже которой газожидкостная смесь представляет собой дисперсию не связанных между собой газовых пузырьков. Пены, газосодержание которых принимает промежуточное значение между газосодержанием полиэдрической и сферической структур, относятся к пенам с ячеистой структурой. Чтобы разобраться с процессами, протекающими с момента образования пены, и определить зависимость ее дисперсности от положения в слое пены по высоте и геометрической формы газовых пузырьков, рассмотрим несколько вариантов истечения жидкости из пены (основной фактор разрушения).

Так как синерезис (дренаж) начинается непосредственно в момент образования пены, можно предположить, что течение жидкости происходит по поверхности пленки пузырька под действием силы тяжести, тогда скорость течения будет равна [12, с. 11–13]

$$v_c = \frac{\rho g \delta^2}{6\eta}, \quad (3)$$

где ρ – плотность раствора пенообразователя; δ – толщина пленки пузырька; η – динамическая вязкость раствора пенообразователя.

При таком рассмотрении пенной структуры считается, что вся жидкость сосредоточена в пленках, из которых она постепенно стекает в каналы, поэтому первой моделью пенной структуры была именно пленочная модель, в которой пена представлена в виде системы тонких вертикальных пленок, протяженных на всю высоту пенного столба [6, с. 81].

Связь кратности отдельно взятого газового пузырька пены с его структурными параметрами можно получить из выражения [13, с. 1082]

$$K = \frac{V_B + V_{ж}}{f_1 V_{ж}} \approx \frac{V_B}{f_1 V_{ж}}, \quad (4)$$

где V_B – объем воздуха в пене; $V_{ж}$ – объем жидкости в пене, причем $V_B \gg V_{ж}$; $f_1 = 0,5$ – коэффициент, учитывающий долю вклада пленок для одной элементарной ячейки (пузырька пены).

Для случая сферической монодисперсной пены, исходя из (4), можно записать

$$K = \frac{\pi d_{\text{ср}}^3}{0,5 \cdot 6 \pi d_{\text{ср}}^2 \delta} = \frac{d_{\text{ср}}}{3\delta}. \quad (5)$$

Уравнение (5) связывает такие важные характеристики пены, как кратность и дисперсность, через средний диаметр пузырька пены. Однако такая модель для анализа характеристик пен неудачна, так как объемная скорость течения жидкости по пленкам, имеющим размеры, характерные для реальных пен [14; 15], намного меньше скорости перемещения жидкости по пенным каналам, а значит, большая часть жидкости сосредоточена в каналах, а не в пленках. Поэтому пленочная модель в настоящее время не используется для интерпретации экспериментальных данных.

Лучше описывает синерезис пен каналовая (капиллярная) модель, в которой истечение жидкости происходит из системы вертикальных каналов, протяженных на всю высоту пенного столба [6, с. 83]. В этой модели пенные каналы сверху замкнуты газожидкостными менисками и повторяют форму каналов Плато. Поперечное сечение пенных каналов имеет вид треугольника с вогнутыми внутрь сторонами. Каналовые (капиллярные) модели являются более совершенными по сравнению с пленочными моделями. Однако как в пленочных, так и каналовых моделях пенной структуры отмечается общий недостаток: пенный столб, содержащий огромную сеть каналов, расположенных под различными углами друг к другу, независимо от своей высоты моделируется лишь группой параллельных пленок или каналов. Это приводит к тому, что в моделях не учитывается взаимосвязь механизмов разрушения со структурой пены и, как следствие, полученные зависимости не могут в полной мере отразить экспериментальные факты.

Структура реальных пен, состоящих из множества газовых пузырьков разнообразной формы (от сферической до полиэдрической), слабо похожа на систему вертикальных независимых каналов. Поэтому логичен переход от каналовой к полиэдрической модели пенной структуры – системе взаимосвязанных, беспорядочно ориентированных каналов с поперечным сечением в виде треугольника Плато [6, с. 29]. Газовые пузырьки в данной модели имеют форму одинаковых полиэдров с «затупленными» ребрами и вершинами, представляя собой усовершенствованную каналовую (капиллярную) модель.

Для полиэдрической пены уравнение для расчета скорости синерезиса имеет следующий вид [6, с. 83; 12, с. 7]:

$$v_c = \frac{\rho g r_k^2}{8\eta}, \quad (6)$$

где r_k – радиус канала (капилляра) Плато–Гиббса.

Для полиэдрической модели структуры пены, если принять в качестве элементарной ячейки пентагональный додекаэдр, уравнение (4) можно представить следующим образом:

$$K = \frac{7,66a^3}{f_1 n_r \cdot 1,72a^2 \delta + f_2 n_p \cdot 0,16r_{\text{кр}}^2 a}, \quad (7)$$

где a , n_p , n_r – длина ребра, количество ребер и количество граней пентагонального додекаэдра соответственно; $f_2 = 1/3$ – коэффициент, учитывающий долю вклада каналов для одной элементарной ячейки (пузырька пены) [13, с. 1082]; $r_{\text{кр}}$ – радиус кривизны каналов Плато–Гиббса.

С учетом коэффициентов f_1 и f_2 :

$$K = \frac{7,66a^2}{10,5a\delta + 1,6r_{\text{кр}}^2}. \quad (8)$$

Здесь $10,5a\delta$ и $1,6r_{\text{кр}}^2$ соответствуют части жидкости, находящейся в пленках и каналах соответственно.

Когда распределение жидкости в пене отвечает условию для канальной модели $10,5a\delta \ll 1,6r_{кр}^2$, тогда

$$K = 4,8 \frac{a^2}{r_{кр}^2}. \quad (9)$$

Выразив длину ребра пентагонального додекаэдра через средний диаметр пузырька (принят диаметр шара с объемом, равным объему пентагонального додекаэдра, $a \approx 0,41d_{ср}$), можно представить (9) в виде

$$K = 0,8 \frac{d_{ср}^2}{r_{кр}^2} \approx 3 \frac{r_{ср}^2}{r_{кр}^2}. \quad (10)$$

Полиэдрическая модель хорошо отражает реальную структуру высокочастотной пены, но практически не подходит для исследования пен низкой кратности, для которых возможен большой диапазон изменений $r_{кр}$. Полиэдрическая структура пены детально изучена в [16–18], а ее обновленная версия представлена в [14; 15], где получила название фрактально-перколяционной модели. Такая модель позволяет учесть изменения структуры пены по высоте ее пенного столба. Однако данную модель не представляется возможным использовать для описания пен низкой кратности.

Наиболее близкой к структуре реальных пен низкой кратности является ячеистая модель [6, с. 35]. Ячеистая структура является промежуточной между сферической и полиэдрической пенами. Газовые пузырьки в данной модели имеют форму «смятых» шариков, причем эта форма может меняться от сферической до полиэдрической в зависимости от капиллярного разрежения. Однако ввиду сложности формы деформированного газового пузырька и, соответственно, всей пенной структуры пока не получено простых и достаточно точных зависимостей, описывающих вытекание жидкости из пен. Попытки рассчитать скорость синерезиса для ячеистой пены были предприняты в [11, с. 8], а также при проведении настоящих исследований.

В уравнении (10) радиус кривизны поперечного сечения поверхности канала Плато–Гиббса может меняться в очень широких пределах: от значений, соизмеримых с $d_{ср}$, до значений, близких к δ . Поэтому для ячеистой модели пены удобно перейти от параметра $r_{кр}$ к радиусу самого канала (капилляра) r_k , который можно представить в виде цилиндра постоянного поперечного сечения. Тогда (7) примет вид

$$K = \frac{7,66a^3}{f_1 n_T \cdot 1,72a^2\delta + f_2 n_p \pi r_k^2 a} = \frac{7,66a^2}{10,5a\delta + 31,4r_k^2}. \quad (11)$$

С учетом того, что $10,5a\delta \ll 31,4r_k^2$, а также заменив a через $d_{ср}$, выражение (11) представим следующим образом:

$$K = 4,1 \cdot 10^{-2} \frac{d_{ср}^2}{r_k^2}. \quad (12)$$

Уравнения (5) и (10) связывают кратность пены (K) с ее дисперсностью через $d_{ср}$ и $r_{кр}$ для полиэдрической модели пенной структуры и через δ – для пленочной. Уравнение (12) может применяться для ячеистой пены, где вместо параметра $r_{кр}$ используется r_k .

Так как пена начинает разрушаться с момента образования, то к моменту наступления гидростатического равновесия в ней распределение пузырьков по высоте пенного столба будет определяться характерным соотношением. Такое уравнение получено в ряде работ и имеет схожую структуру, отличающуюся коэффициентами, которые, в свою очередь, зависят от выбранной структурной модели пузырька пены [6, с. 94–99]:

$$K(z) = K(0) \left(\frac{\rho g r_{cp} z}{\sigma \sqrt{K(0)} \cdot \sqrt{C_k}} + 1 \right)^2, \quad (13)$$

где $K(0)$ – кратность пены на расстоянии $z=0$ от жидкой фазы; C_k – коэффициент полиэдричности; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

В работах других исследователей, например [19, с. 163; 20; 21], уравнение (13) аналогичное, но со своими значениями $K(0)$ и C_k . Исходя из полученной зависимости кратности от положения в слое пены по высоте (13), средний диаметр пузырька можно определить по формуле

$$d_{cp} = \frac{2\sigma\sqrt{C_k}\sqrt{K(0)}}{\rho g z} \left(\sqrt{\frac{K(z)}{K(0)}} - 1 \right). \quad (14)$$

Для анализа уравнения (14) получены значения d_{cp} для различных диапазонов $K(z)$ и z (табл. 1). При проведении численных расчетов приняты средние значения величин, характерных для реальных пен и растворов пенообразователей для их получения: $K(0) = 4$; $C_k = 0,33$; $\sigma = 0,022$ Н/м; $\rho = 103$ кг/м³, показатель смачивающей способности $\tau_{cm} = 4$ с, средняя скорость струи водного раствора пенообразователя в момент генерирования пены $v_{cp} = 10$ м/с [6, с. 31].

Таблица 1. Значения d_{cp} по формуле (14) для различных диапазонов значений z и $K(z)$
 Table 1. Values of the average diameter of the bubble (d_{cp}) according to formula (14) for different ranges of values of z and $K(z)$

Диапазоны значений z и $K(z)$, values Ranges of z and $K(z)$, values	Соответствующий диапазон значений d_{cp} , мм The corresponding range of d_{cp} values, mm
$z = 0,2-0,5$ м; $K(z = 0,2-0,5 \text{ м}) = 50-150$	0,01–0,07
$z = 0,05-0,2$ м; $K(z = 0,05-0,2 \text{ м}) = 10-50$	0,008–0,040
$z = 0,01-0,05$ м; $K(z = 0,01-0,05 \text{ м}) = 50-10$	0,007–0,030

Анализируя результаты расчетов d_{cp} по (14), можно сделать вывод, что абсолютные значения среднего диаметра пузырька, представленные в табл. 1, на несколько порядков отличаются от экспериментальных значений для реальных пен [6, с. 31]. Уравнение (14), предположительно, пригодно для пен высокой кратности. Так, для случая $z = 0,01$ м, если кратность будет достигать значений $K(z = 0,01 \text{ м}) = 4000$, то средний диаметр пузырька по (14) $d_{cp} = 1,55$ мм. Несмотря на это вопрос о получении зависимости для d_{cp} , которая удовлетворительно смогла бы описать результаты экспериментальных исследований для пен низкой кратности, остается актуальным.

Полуэмпирическая модель пен низкой кратности. Расчет объемной скорости истечения жидкости по капилляру (каналу) можно провести, используя уравнение Пуазейля [6, с. 83; 22, с. 38, 57] при установившемся режиме течения

$$Q_0 = \frac{\pi r_k^4 \Delta p}{8 \eta z}, \quad (15)$$

где r_k – радиус канала Плато–Гиббса длиной z ; Δp – давление, приводящее жидкость в движение.

Можно выразить Δp следующим выражением:

$$\Delta p = p_\Gamma - p_k, \quad (16)$$

где p_Γ – гидростатическое давление, способствующее стеканию жидкости, p_k – капиллярное давление, способствующее всасыванию жидкости вверх по капилляру. Считается, что капилляры вертикально расположены по всей высоте пенного столба, тогда

$$p_\Gamma = \rho g z, \quad (17)$$

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k}, \quad (18)$$

где θ – краевой угол смачивания.

Так как $p_k \ll p_\Gamma$, капиллярным давлением можно пренебречь и уравнение (15) примет вид

$$Q_0 = \frac{\pi r_k^4 \rho g}{8\eta}, \quad (19)$$

что согласуется с формулой (6) для линейной скорости течения.

Объемную скорость истечения жидкой фазы пены по каналам Плато–Гиббса можно выразить иным образом:

$$Q_c = Q_0 N, \quad (20)$$

где N – количество каналов Плато–Гиббса.

Если принять, что в горизонтальной плоскости пенного столба пузырьки имеют форму правильных шестиугольников (форма сечения пентагонального додекаэдра, как правило, в виде шестиугольника), стыки вершин которых являются сечениями каналов Плато–Гиббса, а диаметр такого пузырька – это диаметр круга площадью, равной площади шестиугольника, то количество каналов можно определить по формуле

$$N = \frac{8S_{м.е}}{\pi d_{ср}^2}, \quad (21)$$

где $S_{м.е}$ – площадь горизонтального сечения емкости с пеной.

В таком случае (20) с учетом (21) примет вид

$$Q_c = \frac{r_k^4 \rho g S_{м.е}}{\eta d_{ср}^2}. \quad (22)$$

Объемную скорость истечения жидкой фазы пены также можно выразить через устойчивость пены C (время выделения из пены 50 % жидкой фазы):

$$Q_c = \frac{V_{р-ра}}{2C}, \quad (23)$$

где $V_{р-ра}$ – объем раствора пенообразователя, из которого получена пена.

Выразив объем раствора пенообразователя через кратность пены в начальный момент времени ($t = 0$) и размеры емкости для пены, формула приобретает следующий вид:

$$Q_c = \frac{S_{м.е} \cdot z}{2KC}, \quad (24)$$

где K – кратность пены, равная отношению объема пены (емкости с пеной) к объему раствора пенообразователя, из которого она получена.

Преобразуя формулы (22) и (24), можно обозначить средний диаметр пузырька пены выражением

$$d_{ср} = \sqrt{\frac{2KCr_k^4 \rho g}{z\eta}}. \quad (25)$$

Согласно [5] устойчивость можно выразить следующим образом:

$$C = \frac{\sigma \tau_{см}}{\eta v_{ср}} K, \quad (26)$$

где $v_{ср}$ – средняя скорость струи водного раствора пенообразователя в момент генерирования пены.

С учетом (26) выражение (25) примет вид

$$d_{cp} = \frac{Kr_k^2}{\eta} \sqrt{\frac{2\tau_{cm}\sigma\rho g}{zv_{cp}}}. \quad (27)$$

Согласно (12) средний радиус каналов Плато–Гиббса для ячеистой структуры пены можно определить по формуле

$$r_k = \frac{d_{cp}}{4,94\sqrt{K}}. \quad (28)$$

В итоге с учетом (28) средний диаметр пузырька в начальный момент времени вычислим по выражению

$$d_{cp} = 17,3\eta \sqrt{\frac{zv_{cp}}{\tau_{cm}\sigma\rho g}}. \quad (29)$$

Для анализа полученного уравнения построен график зависимости среднего диаметра пузырька d_{cp} от положения в слое пены по высоте z (рис. 2).

Таким образом, средний диаметр пузырька, а следовательно, и дисперсность пены можно оценить через свойства раствора пенообразователя, среднюю скорость струи при пенообразовании на поверхности и высоту столба полученной пены. В выражении (29) исключена кратность пены в явном виде, что хорошо согласуется с выражениями для d_{cp} при пенообразовании на поверхности, сетке и при барботаже [10], в которых также отсутствует кратность.

В отличие от теоретической модели (14) полуэмпирическая модель пены (29) позволяет оценить значения d_{cp} по высоте пенного столба (удовлетворительно описывает экспериментальные данные), а значит, и дисперсность пены в зависимости от физико-химических свойств раствора пенообразователя, из которого она получена.

Экспериментальные исследования дисперсности пенного столба и обсуждение результатов. Для проверки полученных зависимостей были спланированы и проведены экспериментальные исследования по определению дисперсности пен в лабораторных условиях. В качестве пенообразователя применялся «Синтек-6НС» (6 %, ТУ РБ 101114857.049-2004), придающий следующие характеристики раствору: $\rho = 1003,4 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 29,045 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $\eta = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ (Н·с)/м}^2$ и $\tau_{cm} = 3,2 \text{ с}$. Начальный объем жидкой фазы до момента генерирования пены составлял $V_0 = 82,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, средняя скорость струи водного раствора пенообразователя в момент генерирования пены – $v_{cp} = 10,7 \text{ м/с}$. В раствор пенообразователя был добавлен природный краситель, не влияющий на его свойства, для получения более контрастного изображения структуры пены. Фотографирование производилось через $120 \pm 20 \text{ с}$ после образования пены. В период проведения эксперимента было зафиксировано, что этого времени достаточно, чтобы из пены выделилось 50 % жидкой фазы. Важно отметить, что это значение хорошо коррелирует со временем разрушения 25 % объема пены (отличие не превысило 20 %), которое фиксировалось в экспериментальных работах [5; 23], где применялись растворы трех марок пенообразователей общего назначения, одной марки пенообразователя специального назначения и одной марки пенообразователя, применяемого для тушения пожаров в качестве смачивателя.

На рис. 3 представлена фотография пенного столба в цилиндрической мерной емкости объемом $V_{м.е} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ и высотой $h_{м.е} = 0,28 \text{ м}$, сделанная через $120 \pm 20 \text{ с}$ после образования пены. Результаты экспериментальных исследований с другими пенообразователями, характеристики которых представлены в [5; 23], были идентичны представленным на рис. 3. На рисунке введены обозначения высот, которые поясняются в табл. 2 для двух моментов времени. В ходе исследования структуры пены по высоте было выделено пять зон: I – зона жидкой фазы, II – зона сферической пены, III – зона ячеистой пены, IV – зона полиэдрической пены, V – зона газовой фазы. Значения усредненной кратности пены для зон II–IV также представлены в табл. 2.

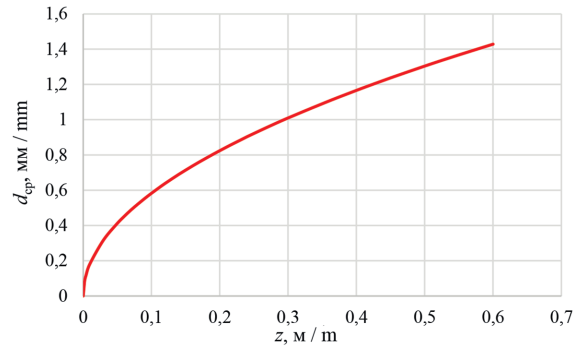


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра пузырька (d_{cp}) от положения в слое пены по высоте (z) в соответствии с (29) в начальный момент времени ($t = 0$)

Fig. 2. The dependence of the average diameter of foam bubbles d_{cp} on the position in the foam layer by height z in accordance with (29) at the initial moment of time ($t = 0$)

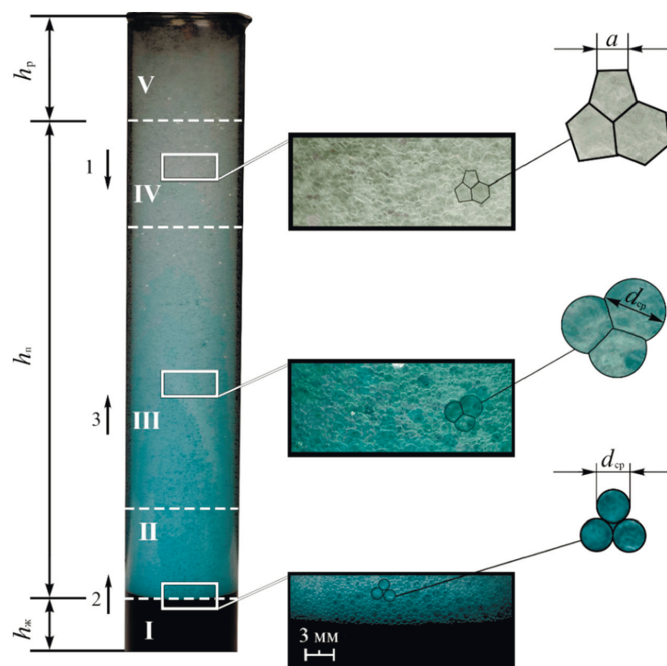


Рис. 3. Структура пенного столба через 120 ± 20 с; $h_{\text{ж}}$ – высота жидкой фазы; $h_{\text{п}}$ – высота пенного слоя; h_{p} – высота разрушенного участка пены, a – длина ребра; I – зона жидкой фазы, II – зона сферической пены, III – зона ячеистой пены, IV – зона полиэдрической пены, V – зона газовой фазы. Стрелками обозначены направления протекания следующих процессов: 1 – дренаж (истечение жидкой фазы), 2 – капиллярное всасывание, 3 – диффузия газа

Fig. 3. The structure of the foam column after 120 ± 20 s; $h_{\text{ж}}$ is the height of the liquid phase, $h_{\text{п}}$ is the height of the foam layer, h_{p} is the height of the destroyed foam section, a – rib length; I is the liquid phase zone, II is the spherical foam zone, III is the cellular foam zone, IV is the polyhedral foam zone, V is the gas phase zone. The arrows indicate the directions of the following processes 1 – drainage (outflow of the liquid phase), 2 – capillary suction, 3 – gas diffusion

Т а б л и ц а 2. Характеристики высотных зон сразу после образования пены и через промежуток времени $t = 120 \pm 20$ с

Table 2. Characteristics of altitude zones immediately after foam formation and after a time interval $t = 120 \pm 20$ s

Время Time	Параметры, характеризующие столб пены Parameters characterizing the foam column	Кратность, характерная для высотных зон Multiplicity typical for high-altitude zones	Диаметр пузырька, усредненный по высотным зонам Bubble diameter, averaged over altitude zones
$t = 0$ с	$h_{\text{ж}0} = h_{\text{ж}} / 2 = 14$ мм; $h_{\text{п}0} = h_{\text{max}} = h_{\text{ж}} / 2 + h_{\text{п}} + h_{\text{p}} = 266$ мм; $h_{\text{p}0} = 0$	$K_0 = 9,5$	$d_{\text{cp}} = d_0 \approx 1$ мм
$t = 120 \pm 20$ с (рис. 3)	$h_{\text{ж}} = 28$ мм, $V_{\text{ж}} = 55 \cdot 10^{-6}$ м ³ ; $h_{\text{п}} = 210$ мм, $V_{\text{п}} = 412,5 \cdot 10^{-6}$ м ³ ; $h_{\text{p}} = 42$ мм, $V_{\text{p}} = 82,5 \cdot 10^{-6}$ м ³	$K_{\text{II}} = 4-10$; $K_{\text{cpII}} = 7$; $K_{\text{III}} = 11-20$; $K_{\text{cpIII}} = 15$; $K_{\text{IV}} = 21-200$; $K_{\text{cpIV}} = 110$	$d_{\text{cpII}} = 1,4$ мм $d_{\text{cpIII}} = 2,2$ мм $d_{\text{cpIV}} = 2,4$ мм

П р и м е ч а н и я. K_0 , d_0 – кратность пены и средний диаметр пузырьков в момент времени $t = 0$; $h_{\text{ж}0}$, $h_{\text{п}0}$, $h_{\text{p}0}$ – высота жидкой фазы, пены и разрушенного участка пены в момент времени $t = 0$; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{п}}$, V_{p} – объем жидкой фазы, пены и разрушенного участка пены в момент времени $t = 120 \pm 20$ с.

Диапазоны значений кратности в зонах II–IV (K_{II} , K_{III} и K_{IV}) не рассчитывались, а оценивались визуально в зависимости от того, к какой классификационной группе их можно отнести ($K = 4-10$ – пена низкой кратности (мокрая), $K = 11-20$ – пена низкой кратности (сухая), $K = 21-200$ – пена средней кратности). Для расчета принимались средние значения из указанных диапазонов.

N o t e s. K_0 , d_0 is the multiplicity of foam and the average diameter of bubbles at time $t = 0$; $h_{\text{ж}0}$, $h_{\text{п}0}$, $h_{\text{p}0}$ is the height of the liquid phase, foam and the destroyed foam section at time $t = 0$; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{п}}$, V_{p} is the volume of the liquid phase, foam and the destroyed foam section at time $t = 120 \pm 20$ s.

The ranges of multiplicity values in zones II–IV (K_{II} , K_{III} and K_{IV}) were not calculated, but evaluated visually, depending on which classification group they could be attributed to ($K = 4-10$ – low-multiplicity foam (wet), $K = 11-20$ – low-multiplicity foam (dry), $K = 21-200$ – foam of medium multiplicity). The average values from the specified ranges were used for the calculation.

Разделение на зоны I–V выполнено в зависимости от типа дисперсной системы. В зоне I находится жидкость, которая представляет собой раствор пенообразователя «Синтек-6НС» (6 %) в воде (жидкая фаза), а в зоне V – воздух (газовая фаза), который заполнил верхнюю часть открытой цилиндрической мерной емкости после разрушения некоторого объема пены. В зонах II–IV содержится пена, отличающаяся по высоте кратностью, размерами и формой пузырьков. Следует отметить, что на фотографии пенного столба зоны IV (пена) и V (воздух) слабо различимы. Это связано с тем, что после разрушения пузырьков на поверхности стекла мерной емкости остается их каркас (отпечаток), создающий иллюзию присутствия пены. При этом в ходе визуального осмотра (сверху и вблизи емкости) фиксировалось отсутствие пены в зоне V. Во время экспериментов стекло емкости не очищалось, так как любое внешнее вмешательство приводило к ускорению процесса разрушения пенного столба. По окончании каждого эксперимента емкость проходила стадии промывки и сушки. Разделение столба пены на зоны II, III и IV было основано, как уже было упомянуто, на форме пузырьков в них. Так, во II зоне пузырьки имели строго сферическую форму, в то время как в III зоне форма пузырьков напоминала смятые шарики (ячеистая пена), а в зоне IV четко прослеживалась многогранная (полиэдрическая) структура пузырьков (рис. 3, справа).

Сразу после образования пены, то есть в начальный момент времени, ее кратность составляла $K_0 = 9,5$, а неоднородная структура пузырьков была равномерно распределена по высоте всего пенного столба. Низко- и высокодисперсная пена случайным образом находилась как в верхней, так и в нижней частях мерной емкости, а средний диаметр пузырьков $d_{cp} = d_0$, определенный по методике, приведенной в [24], составлял около 1 мм. Затем в нижней части емкости постепенно стали формироваться пузырьки с мелким размерным составом ($d_{min} \leq d < d_{cp}$), а в верхней части – с крупным ($d_{cp} < d \leq d_{max}$). Это свидетельствует о том, что процессы обезвоживания (синерезис) пены, коалесценции (укрупнение пузырьков за счет разрушения разделяющих их пленок) и коволюции (укрупнение пузырьков за счет диффузии газа через разделяющие пленки) [6, с. 46] начались практически сразу после образования пены ($t = 0$). За время $t = 120 \pm 20$ с пузырьки пены распределились по высоте таким образом, что образовали зоны II, III и IV с характерными размерами и формой пузырьков, имеющие следующее процентное соотношение по объему: 19, 59 и 22 % соответственно. В системе наступило гидростатическое квазиравновесное состояние.

Средняя кратность пены через время $t = 120 \pm 20$ с может быть определена как

$$K_{cp} = \frac{V_{п}}{V_0 - V_{ж}} = \frac{412,5 \cdot 10^{-6}}{(82,5 - 55,0) \cdot 10^{-6}} = 15, \quad (30)$$

что согласуется со значениями характерной кратности для зон II–IV, указанными в табл. 2:

$$K_{cp} = \frac{V_{п}}{\left(\frac{V_{п}\omega_{II}}{K_{cpII}} + \frac{V_{п}\omega_{III}}{K_{cpIII}} + \frac{V_{п}\omega_{IV}}{K_{cpIV}} \right)} = \left(\frac{\omega_{II}}{K_{cpII}} + \frac{\omega_{III}}{K_{cpIII}} + \frac{\omega_{IV}}{K_{cpIV}} \right)^{-1} = \left(\frac{0,19}{7} + \frac{0,59}{15} + \frac{0,22}{110} \right)^{-1} = 14,6, \quad (31)$$

а средний диаметр пузырька пены:

$$d_{cp} = \frac{d_{cpII}N_{II} + d_{cpIII}N_{III} + d_{cpIV}N_{IV}}{N_{II} + N_{III} + N_{IV}} = \left(\frac{\omega_{II}}{d_{cpII}^2} + \frac{\omega_{III}}{d_{cpIII}^2} + \frac{\omega_{IV}}{d_{cpIV}^2} \right) \cdot \left(\frac{\omega_{II}}{d_{cpII}^3} + \frac{\omega_{III}}{d_{cpIII}^3} + \frac{\omega_{IV}}{d_{cpIV}^3} \right)^{-1} = 1,83 \text{ мм}, \quad (32)$$

где ω_{II} – ω_{IV} – соотношение между зонами II–IV по объему в долях; N_{II} – N_{IV} – количество пузырьков в соответствующей зоне, определяемое как отношения объема зоны к объему пузырька.

Динамику изменения высоты пенного столба можно представить в виде графика (рис. 4). Впервые подобный график был получен в Институте коллоидов и поверхностей Макса Планка, обсуждение этого графика представлено в [25]. Последние достижения в данной области (например,

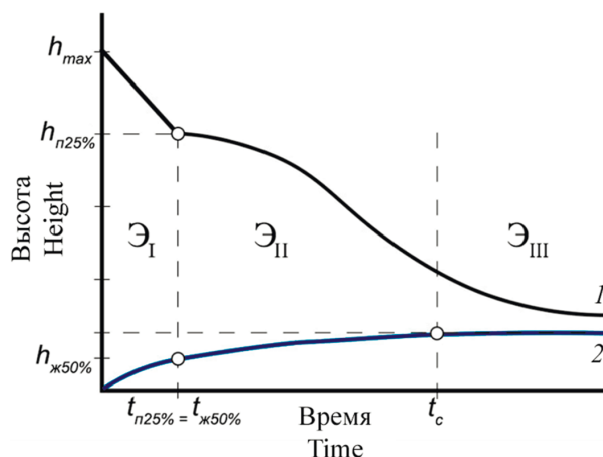


Рис. 4. Изменение высоты слоев пены и жидкости с течением времени (ось абсцисс совмещена с высотой столба жидкости $h_{ж0}$ в момент времени $t = 0$). Э_I и Э_{II} – этапы быстрого и медленного истечения жидкой фазы; Э_{III} – этап разрушения пены без выделения жидкости; $h_{ж50\%}$ – высота столба жидкости после выделения 50 % жидкой фазы из пенного слоя; $h_{n25\%}$ – высота столба пены после разрушения 25 % объема; h_{max} – максимальная высота пенного столба; $t_{ж50\%}$ – время выделения 50 % жидкой фазы из пенного слоя; $t_{n25\%}$ – время разрушения 25 % объема пены; t_c – время, после которого пена разрушается без выделения жидкости; кривая 1 показывает изменение высоты пенного слоя, кривая 2 – изменение уровня жидкости

Fig. 4. Change in the height of foam and liquid layers over time (X-axis is aligned with the height of the liquid phase column $h_{ж0}$ at $t = 0$). Э_I and Э_{II} are the stages of rapid and slow liquid phase release; Э_{III} is the stage of foam destruction without liquid; $h_{ж50\%}$ is the height of the liquid column after release of 50 % of the liquid phase from the foam layer; $h_{n25\%}$ is the height of foam column after destruction of 25 % of its volume; h_{max} is the maximum height of foam column; $t_{ж50\%}$ is the time of release of 50 % of the liquid phase from the foam layer; $t_{n25\%}$ is the time of destruction of 25 % of foam volume; t_c is the time after which the foam destructs without releasing liquid; curve 1 shows a change in the height of the foam layer, curve 2 shows a change in the liquid level

[26]) хорошо согласуются с результатами описанных нами экспериментов. На графике, представленном на рис. 4, в отличие от работы [25], имеется точка перегиба, по которой процесс синерезиса можно разделить на два этапа: быстрого (Э_I) и медленного (Э_{II}) истечения жидкой фазы. Кроме того, можно выделить этап III – разрушение пены без выделения жидкости (Э_{III}).

Закключение. В результате анализа экспериментальных данных, представленных в данной работе, установлено, что структура пены зависит от положения в слое пены по высоте: снизу располагаются пузырьки сферической формы, в центре форма пузырьков имеет ячеистый вид, а сверху находятся полиэдрические пузырьки. Наибольший объем занимает пена с пузырьками ячеистой формы – до 60 % от общего объема пенного столба. Предложенная для расчета среднего диаметра пузырька пен низкой кратности формула (29) хорошо согласуется с результатами экспериментов. Средний диаметр пузырька, а значит, и дисперсность пены зависят от характеристик раствора пенообразователя, а также от положения в слое пены по высоте.

Знание среднего диаметра пузырьков в слое пены критически важно в ряде промышленных и технологических процессов, где размер пузырьков напрямую влияет на эффективность процесса и качество конечного продукта: горно-обогатительная промышленность, производство пищевых продуктов, очистка газов и жидкостей, химическая и нефтяная промышленность, пожаротушение. В последнем случае (пожаротушение) размер пузырьков определяет кратность и устойчивость пены, что влияет на ее огнетушащую эффективность. Например, пена с мелкими пузырьками лучше растекается по поверхности и перекрывает доступ кислорода при тушении горючих жидкостей, а пена высокой кратности с более крупными пузырьками заполняет большие объемы закрытых помещений.

Таким образом, контроль и знание диаметра пузырьков позволяют управлять физическими свойствами пены, такими как вязкость, плотность, устойчивость и эффективность взаимодействия с другими фазами, что критично для достижения целевых показателей при пожаротушении.

Список использованных источников

1. Шароварников, А. Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение / А. Ф. Шароварников, С. А. Шароварников. – М.: Пожнаука, 2005. – 335 с.
2. Мухамедиев, Ш. А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость. Ч. 1 / Ш. А. Мухамедиев, В. А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 10. – С. 22–26.
3. Мухамедиев, Ш. А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость. Ч. 2 / Ш. А. Мухамедиев, В. А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 11. – С. 2–5.
4. Камлюк, А. Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин. – Мн.: Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси, 2019. – 224 с.
5. Камлюк, А. Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>
6. Канн, К. Б. Капиллярная гидродинамика пен: монография / К. Б. Канн. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1983. – 167 с.
7. Манжай, В. Н. Дисперсность и устойчивость пены, полученной из раствора поливинилового спирта, и свойства сформированных пенокриогелей / В. Н. Манжай, М. С. Фуфаева // Коллоидный журнал. – 2014. – Т. 76, № 4. – С. 495–499. <https://doi.org/https://doi.org/10.7868/S0023291214040090>
8. Оценка эффективности механических методов разрушения пен / А. Н. Пахомов, Д. С. Пекшев, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Вестник ТГТУ. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 292–299.
9. Пенная склеротерапия: история развития и современные данные / А. А. Бешко, С. Н. Тихон, Е. В. Крыжова [и др.] // Новости хирургии. – 2012. – Т. 20, № 4. – С. 101–110.
10. 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. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.54>
11. Ветошкин, А. Г. Физические основы и техника процессов сепарации пены / А. Г. Ветошкин. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 404 с.
12. Баштовой, В. Г. Специальные течения жидкостей и газов / В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс. – Мн.: БНТУ, 2020. – 45 с.
13. Кротов, В. В. Теория синергиза пен и концентрированных эмульсий. Локальная кратность полиэдрических дисперсных систем / В. В. Кротов // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 6. – С. 1081–1091.
14. Пахаруков, Ю. В. Фрактально-перколяционная модель устойчивости пены / Ю. В. Пахаруков, Т. Е. Шевнина // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 12. – С. 900–903.
15. Пахаруков, Ю. В. Стабилизация пены поверхностно-активными веществами во фрактально-перколяционной модели разрушения / Ю. В. Пахаруков, Т. Е. Шевнина // Письма в Журнал технической физики. – 2001. – Т. 27, вып. 3. – С. 85–88.
16. Кротов, В. В. Теория синергиза пен и концентрированных эмульсий. Локальная гидропроводимость полиэдрических дисперсных систем / В. В. Кротов // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 6. – С. 1092–1101.
17. Кузнецова, Л. Л. Исследование закономерностей течения растворов ПАВ по каналам Плато – Гиббса пены / Л. Л. Кузнецова, П. М. Кругляков // Доклады Академии наук СССР. – 1981. – Т. 260, вып. 4. – С. 928–932.
18. Кротов, В. В. Структура, синергиз и кинетика разрушения полиэдрических дисперсных систем / В. В. Кротов // Вопросы термодинамики гетерогенных систем и теории поверхностных явлений: сб. науч. ст. / Ленинград. ун-т им. А. А. Жданова; под ред. А. В. Сторонкина. – Ленинград, 1982. – Вып. 6. – С. 110–191.
19. Кругляков, П. М. Пена и пенные пленки / П. М. Кругляков, Д. Р. Ексерова. – М.: Химия, 1990. – 432 с.
20. Капиллярные эффекты и гидростатическая устойчивость пен / А. В. Перцов, В. Н. Чернин, Б. Е. Чистяков, Е. Д. Щукин // Доклады Академии наук СССР. – 1978. – Т. 238, вып. 6. – С. 1395–1398.
21. Канн, К. Б. Некоторые закономерности синергиза пен. Вытекание / К. Б. Канн // Коллоидный журнал. – 1978. – Т. 40, № 5. – С. 858–864.
22. Вилкова, Н. Г. Свойства пен и методы их исследования: монография / Н. Г. Вилкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.
23. Говор, Э. Г. Исследование ключевых классификационных характеристик пены и влияния на них параметров розеточного оросителя / Э. Г. Говор, А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2024. – № 1 (107). – С. 86–96.
24. 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. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>
25. Шаповалова, Е. А. Экспериментальные исследования по подбору оптимальных концентраций ПАВ в водных растворах с целью повышения производительности газовых скважин / Е. А. Шаповалова, В. А. Огай // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – Вып. 1. – С. 373–387. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-373-387>
26. Probing foams from the nanometer to the millimeter scale by coupling small-angle neutron scattering, imaging, and electrical conductivity measurements / J. Lamolinarie, B. Dollet, J.-L. Bridot [et al.] // Soft Matter. – 2022. – Vol. 18, iss. 46. – P. 8733–8747. <https://doi.org/10.1039/d2sm01252a>

References

1. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov A. F. *Foaming Agents and Foams for Extinguishing Fires. Composition, Properties, Application*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005. 335 p. (in Russian).
2. Mukhamediev Sh. A., Vas'kina V.A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. Part 1. *Masla i zhiry* [Oils and Fats], 2008, no. 10, pp. 22–26 (in Russian).
3. Mukhamediev Sh. A., Vas'kina V.A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. Part 2. *Masla i zhiry* [Oils and Fats], 2008, no. 11, pp. 2–5 (in Russian).
4. Kamlyuk A. N., Grachulin A. V. *Compression Foam for the Needs of Fire Brigades*. Minsk, University of Civil Protection, 2019. 224 p. (in Russian).
5. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Govor E. G. Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 194–205 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>
6. Kann K. B. *Capillary Hydrodynamics of Foam*. Novosibirsk, Nauka, Siberian Branch Publ., 1983. 167 p. (in Russian).
7. Manzhay V. N., Fufayeva M. S. Dispersity and stability of foams obtained from poly(vinyl alcohol) solution and the properties of resulting foamed cryogels. *Colloid Journal*, 2014, vol. 76, no. 4, pp. 455–458. <https://doi.org/10.1134/s1061933x14040097>
8. Pakhomov A. N., Pekshev D. S., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V. Evaluation of the effectiveness of mechanical methods of foam destruction. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 292–299 (in Russian).
9. Baeshko A. A., Tikhon S. N., Kryzhova E. V., Markautsan P. V., Vartanyan V. F., Dechko V. M., Kovalevich K. M., Shestak N. G. Foam-form sclerotherapy: history of the development and present-day findings. *Novosti Khirurgii*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 101–110 (in Russian).
10. Kamlyuk A. N. Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability of low expansion air-mechanical foams. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 54–65 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.54>
11. Vetoshkin A. G. *Physical Basis and Technique of Foam Separation Processes*. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2016. 404 p. (in Russian).
12. Bashtovoy V. G., Reks A. G. *Special Flows of Liquids and Gases*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2020. 45 p. (in Russian).
13. Krotov V. V. Syneresis theory of foams and concentrated emulsions. Local multiplicity of poly-hedral disperse systems. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 6, pp. 1081–1091 (in Russian).
14. Pakharukov Yu. V., Shevnina T. E. Fractal-percolation model of the stability of foam. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1999, vol. 69, iss. 12, pp. 954–958. <https://doi.org/10.1134/1.568119>
15. Pakharukov Yu. V., Shevnina T. E. Foam stabilization by surfactants: A fractal-percolation fracture model. *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, pp. 127–128. <https://doi.org/10.1134/1.1352769>
16. Krotov V. V. Syneresis theory of foams and concentrated emulsions. Local hydroconductivity of poly-hedral disperse systems. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 6, pp. 1092–1101 (in Russian).
17. Kuznetsova L. L., Kruglyakov P. M. Investigation of the flow patterns of surfactant solutions through Plateau–Gibbs foam channels. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1981, vol. 260, no. 4, pp. 928–932 (in Russian).
18. Krotov V. V. Structure, syneresis and destruction kinetics of polyhedral disperse systems. Storonskin A. V. (ed.). *Voprosy termodinamiki geterogennykh sistem i teorii poverkhnostnykh yavlenii: sbornik nauchnykh statsei* [Problems of Thermodynamics of Heterogeneous Systems and Theory of Surface Phenomena: Collection of Scientific Articles]. Leningrad, A. A. Zhdanov Leningrad University Publ., 1982, iss. 6, pp. 110–191 (in Russian).
19. Kruglyakov P. M., Yekserova D. R. *Foam and Foam Films*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 432 p. (in Russian).
20. Pertsov A. V., Chernin V. N., Chistyakov B. E., Shchukin E. D. Capillary effects and hydrostatic stability of foams. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1978, vol. 238, no. 6, pp. 1395–1398 (in Russian).
21. Kann K. B. Some patterns of pen syneresis. Leakage. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1978, vol. 40, no. 5, pp. 858–864 (in Russian).
22. Vilkova N. G. *Properties of Foams and Methods of Their Investigation*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2013. 120 p. (in Russian).
23. Govor E. G., Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O. Experimental study of main classification characteristics of foam and the influence of deflector type sprinkler parameters on them. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*, 2024, vol. 107, no. 1, pp. 86–96 (in Russian).
24. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Titovets A. F., Polochanin N. S., Grachulin A. V. 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. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 441–450 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>
25. Shapovalova E. A., Ogai V. A. Experimental studies on the selection of optimal surfactant concentrations in aqueous solutions to improve gas well productivity. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*, 2022, iss. 1, pp. 373–387 (in Russian). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-373-387>
26. Lamolinarie J., Dollet B., Bridot J.-L., Bauduin P., Diat O., Chiappisi L. Probing foams from the nanometer to the millimeter scale by coupling small-angle neutron scattering, imaging, and electrical conductivity measurements. *Soft Matter*, 2022, vol. 18, iss. 46, pp. 8733–8747. <https://doi.org/10.1039/d2sm01252a>