

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>
УДК 614.844.5:614.844.2Оригинальная статья**А. Н. Камлюк^{*}, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор***Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь***ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НИЗКОКРАТНЫХ ПЕН
ОТ ИХ КРАТНОСТИ**

Аннотация. Проведен анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований характеристик воздушно-механической пены, получаемой на розеточных оросителях и в пеногенерирующих устройствах с сетками, при использовании трех марок пенообразователей общего назначения, одной марки пенообразователя специального назначения и одной марки пенообразователя, применяемого для тушения пожаров в качестве смачивателя. В результате анализа установлена линейная зависимость объемной устойчивости пены от ее кратности, а также определено влияние физических характеристик (показателя смачивающей способности, поверхностного натяжения и динамической вязкости) и скорости струи раствора пенообразователя на коэффициент пропорциональности установленной зависимости. Данная зависимость связывает устойчивость и кратность пены не только при использовании розеточных оросителей, применяемых в автоматических установках пожаротушения, но и насадков на пожарные стволы и иных пеногенерирующих устройств, позволяющих генерировать воздушно-механическую пену низкой кратности, а также не зависит от геометрических размеров используемых устройств. Полученное уравнение позволяет определять устойчивость пен через значение их кратности, что сократит время и денежные затраты на экспериментальное определение устойчивости.

Ключевые слова: объемная устойчивость пены, кратность пены, капиллярное число, 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 Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>. E-mail: kan@ucp.by; Лихоманов Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем безопасности Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>. E-mail: alexlikh20@gmail.com; Говор Эдуард Геннадьевич – ведущий научный сотрудник отдела научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>. E-mail: govor-098@mail.ru

Вклад авторов: Камлюк Андрей Николаевич – постановка целей и задач исследования, анализ полученных экспериментальных данных, закономерностей и зависимостей характеристик пены и физических свойств пенообразователей, из которых она получена, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; Лихоманов Алексей Олегович – проведение экспериментальных исследований по определению кратности и объемной устойчивости пены, а также влияния концентрации пенообразователя в растворе на показатель смачивающей способности и кратность пены, работа с графическим материалом; Говор Эдуард Геннадьевич – проведение экспериментальных исследований по определению кратности и объемной устойчивости пены, экспериментальное определение физических свойств исследуемых пенообразователей, набор текста статьи.

Для цитирования: Камлюк, А. Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>

Поступила в редакцию: 21.06.2024

Доработанный вариант: 09.09.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

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

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

DEPENDENCE OF THE VOLUME STABILITY ON THE EXPANSION RATE OF LOW-EXPANSION FOAM

Abstract. In this work, we analyzed and summarized the results of experimental studies of the characteristics of air-mechanical foam generated on the deflector type sprinklers and in the foam generating devices with mesh using three brands of general purpose foam concentrates, one brand of special purpose foam concentrate and one brand of foam concentrate used to extinguish fires as a wetting agent. As a result of the analysis, a linear dependence of the volume stability on the expansion rate of the foam was established, and the influence of physical characteristics (wetting ability, surface tension and dynamic viscosity) and the jet speed of the foam concentrate solution on the proportionality coefficient of the established dependence was determined. This dependence relates the stability and expansion rate of foam not only when using deflector type sprinklers for automatic extinguishing systems, but also using nozzles of fire barrels and other foam-generating devices that allow the generation of low-expansion air-mechanical foam, and does not depend on the geometric dimensions of the devices used. The resulting equation makes it possible to determine the stability of foams using the value of their expansion rate. It will help to reduce the time and money spent on experimental determination of the foam stability.

Keywords: foam volume stability, foam expansion rate, Capillary number, 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 Chief on Scientific and Innovative Activity 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; *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; *Eduard G. Govor* – Leading Researcher of the Department of Scientific and Innovation Activity 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.

Contribution of the authors: *Andrei N. Kamluk* – the determination of the aims and objectives of the study, 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; *Alexey O. Likhomanov* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate and volume stability of foam, as well as the influence of the concentration of the foaming agent in the solution on the wetting ability and foam expansion rate, working with graphic; *Eduard G. Govor* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate and volume stability of foam, experimental determination of the physical properties of the foam concentrates, writing the text of the manuscript.

For citation: Kamluk A. N., Likhomanov A. O., Govor E. G. Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh nauk = 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>

Received: 21.06.2024

Modified: 09.09.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Наиболее широко применяемыми огнетушащими веществами при ликвидации пожаров являются вода и воздушно-механическая пена низкой кратности (далее – пена) [1]. Последнее вещество обладает лучшей огнетушащей эффективностью, а в случае тушения пожаров с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями – единственным эффективным средством. В свою очередь огнетушащая эффективность пен в значительной степени зависит от устойчивости C (время, в течение которого пена способна сохранять свой объем и препятствовать

вытеканию жидкости (синерезису)) и кратности K (величина, равная отношению объема пены к объему водного раствора пенообразователя (ПО), содержащегося в ней) [2, 3].

Следует отметить, что высокая устойчивость объема пены необходима не только при тушении пожаров, но и при покрытии взлетно-посадочной полосы пеной при аварийной посадке самолета без шасси, а также для предотвращения испарения легковоспламеняющихся жидкостей и химически опасных веществ при их разливе. Данный параметр важен и при покрытии пеной площадки резервуара для изоляции жидкости после тушения [4].

По кратности пены делятся на три группы в зависимости от условий применения (способа тушения, вида горючего материала, типа пенообразователя и др.): низкой (от 3,6 до 20), средней (21–200) и высокой (более 200) кратности [3]. Авторами статьи исследовалась пена низкой кратности, так как она обладает большей проникающей способностью, лучшей растекаемостью по поверхности и эффективнее охлаждает горячие поверхности по сравнению с другими группами пен. В работах разных авторов отмечается, что чем выше значение кратности [5, 6] или устойчивости [6] пен, тем быстрее будет ликвидирован пожар при наименьшем расходе огнетушащего вещества. Повлиять на значения данных характеристик можно изменением как состава огнетушащего вещества (использование пенообразователей различных типов и марок), так и гидродинамических характеристик струи огнетушащего вещества (скорость, давление), и даже геометрии устройств, предназначенных для генерирования пены. До настоящего времени не было проведено обобщение результатов исследований кратности и объемной устойчивости пены с учетом перечисленных факторов, с помощью которых можно изменять данные характеристики пены.

Цель исследования – обобщить результаты исследований авторов статьи, установить влияние физических характеристик растворов пенообразователей различных типов и марок на объемную устойчивость и кратность пены, а также их взаимосвязь при нормальных условиях.

Обзор исследований характеристик пен. Первые попытки установить связь между устойчивостью (C) и кратностью (K) пены были предприняты еще в 1940-е годы. В частности Г. Д. Майлс вывел следующее выражение [7]:

$$C = \frac{8\eta}{\rho g r^2} (V + a \cdot \lg V + b), \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость раствора пенообразователя; ρ – плотность раствора пенообразователя; g – ускорение свободного падения; r – средний радиус пузырька; V – объем жидкости, оставшийся в пене к моменту времени, соответствующему разрушению 25 % ее объема; a и b – коэффициенты, которые зависят от начального объема жидкости в пене и ее высоты.

Учитывая, что кратность (K) – это отношение объема пены (V_n) к объему жидкости (V), уравнение (1) можно представить в виде

$$C = \frac{8\eta}{\rho g r^2} \left(\frac{V_n}{K} + a \cdot \lg \frac{V_n}{K} + b \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) не получило широкого применения на практике прежде всего из-за того, что в него входит неизвестная величина – средний радиус пузырька пены, значение которого зависит от множества факторов. Кроме того, константы a и b существенно зависят от начальных условий пенообразования. Принимая во внимание обратно-пропорциональную зависимость среднего радиуса пузырька пены от ее кратности $r = f(1/K)$ [8], выражение (2) можно представить в виде $C = f(K)$.

Пропорциональность устойчивости пены ее кратности была предсказана К. Б. Канном [9], однако коэффициент пропорциональности установлен не был. Сам факт определения данного коэффициента имеет большое значение и позволяет без проведения экспериментальных исследований установить значение устойчивости пены, зная ее кратность, и наоборот. Это подтверждает актуальность и значимость изучения природы такой пропорциональности при проведении текущих исследований.

Более сложную зависимость между устойчивостью и кратностью пены можно встретить в исследовании Т. Е. Шавниной [10]. В данной работе в рамках фрактально-перколяционной модели удалось установить зависимость устойчивости пены от свойств раствора пенообразователя и ее

кратности. Но, к сожалению, на практике пользоваться полученной зависимостью крайне неудобно по причине ее громоздкости. Кроме того, в [10], как и в уравнении (2), не удалось выразить зависимость устойчивости пены от ее кратности без среднего радиуса пузырька пены.

Следует отметить, что в [7–10] исследования устойчивости пены осуществлялись при нормальных условиях без термического воздействия на пену. Для определения эффективности пожаротушения пенами выполняются сравнительные натурные испытания, которые требуют не только больших материальных затрат, но и строгого выполнения требований безопасности и экологичности. Такие исследования целесообразны только после детального анализа лабораторных испытаний при нормальных условиях. При невозможности выполнить натурные испытания допускаются исследования термической устойчивости пены в лабораторных условиях. Так, в [11] приводятся результаты таких исследований для пен различной кратности. А. В. Кокшаров с соавторами установили, что пена низкой кратности разрушается медленнее, чем пены средней и высокой кратности. Кроме того, скорость термического разрушения низкократных пен не зависит от численного значения кратности ($v_p \approx 0,15$ см/с) и соизмерима со скоростью разрушения таких пен при нормальных условиях ($v_p \approx 0,12$ см/с) [12]. Ранее такой эффект наблюдался авторами [13] при стабилизации пены натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы, когда из-за повышенной вязкости жидкой фазы она не успевала пройти по пенным каналам при разрушении пены, в результате чего скапливалась на поверхности пены, защищая ее от разрушения.

Исходя из результатов анализа различных исследований термической устойчивости авторами настоящей статьи определена важность исследований объемной устойчивости пены при нормальных условиях.

Исследование кратности и объемной устойчивости пены. Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены водные растворы различных марок пенообразователей, отличающихся как химическим составом, так и назначением. Авторы отобрали наиболее широко используемые пенообразователи общего назначения (тип S¹) трех марок: ПО-6РЗ (6 %), Синтек-6НС (6 %) и Люкс S (6 %). При этом для оценки влияния типа пенообразователя в дополнение к пенообразователям общего назначения были взяты: пенообразователь специального назначения (фторсодержащий пленкообразующий типа AFFF¹) марки Люкс AFFF (6 %) и пенообразователь, применяемый для тушения пожаров в качестве смачивателя (тип WA¹) марки ОПС-0,4 (1 %). Как правило, в скобках в названии марки пенообразователя указывается рекомендуемая производителем рабочая объемная концентрация данного вещества в растворе для эффективного пожаротушения.

Водные растворы пенообразователей для исследований приготавливались с рекомендуемой производителем рабочей концентрацией пенообразователя. В табл. 1 представлены основные физические характеристики рабочих растворов отобранных пенообразователей. Значения коэффициента поверхностного натяжения (σ), плотности (ρ) и динамической вязкости (η) водного раствора каждого пенообразователя были определены экспериментально при использовании сертифицированного и поверенного в установленном порядке лабораторного оборудования: автоматического тензиометра Kruss K20, весов лабораторных МАССА-К ВК-1500, колбы мерной 1000 мл (ГОСТ 1770-74)², капиллярного вискозиметра ВПЖ-4 1.47 и секундомера механического СОСпр-2а-3-000.

Т а б л и ц а 1. Физические характеристики водных растворов пенообразователей
 Table 1. Physical characteristics of aqueous solutions of foaming agents

Характеристика раствора пенообразователя	Марка пенообразователя				
	ПО-6РЗ (6 %)	Синтек-6НС (6 %)	Люкс S (6 %)	Люкс AFFF (6 %)	ОПС-0,4 (1 %)
Плотность, ρ , кг/м ³	1000,7 ± 0,1	1003,4 ± 0,1	1000,9 ± 0,1	1002,6 ± 0,1	1000,1 ± 0,1
Поверхностное натяжение, $\sigma \cdot 10^3$, Н/м	22,455 ± 0,054	29,045 ± 0,021	26,165 ± 0,013	16,637 ± 0,095	31,225 ± 0,105
Динамическая вязкость, $\eta \cdot 10^3$, (Н · с)/м ²	1,01 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,08 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,02 ± 0,01

¹ Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. Взамен СТБ ГОСТ Р 50 588-99; введ. 12.08.2016. Минск, Госстандарт, 2016. 50 с.

² Посуда мерная лабораторная стеклянная. Цилиндры, мензурки, колбы, пробирки. Общие технические условия: ГОСТ 1770-74. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294835/4294835121.htm>

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой представлена в [12]. Раствор подавался на ороситель, после чего сгенерированная пена собиралась в мерной емкости. Давление перед оросителем задавалось на уровне 0,1 МПа и контролировалось по показаниям манометра. Затем при помощи весов определялась масса пены в емкости и рассчитывалась ее кратность по формуле

$$K = V_{\text{емк}} \rho / (m_2 - m_1), \quad (3)$$

где $V_{\text{емк}}$ – объем емкости, м³; ρ – плотность раствора пенообразователя, кг/м³; m_1 – масса емкости, кг; m_2 – масса емкости, заполненной пеной, кг.

Для определения устойчивости пены открывался кран, смонтированный на сливном отверстии емкости, и с помощью секундомера определялось время разрушения 25 % объема пены по мерной шкале, намеченной на емкости.

Для изменения гидродинамических параметров использовались штуцеры оросителя с различным значением диаметра выходного отверстия D_h (рис. 1), которые позволяют обеспечить различную скорость струи v при постоянном давлении, создаваемом насосной установкой. Для обобщения экспериментальных данных использовались характеристические числа Вебера (We) и Рейнольдса (Re) [12].

Учесть геометрию пеногенерирующих устройств удалось путем использования конструкции сборно-разборного оросителя¹, которая позволяет использовать составные части оросителя (дужки и розетку) с различными геометрическими параметрами (L – длина дужек, d – внутренний диаметр розетки, D_y – проекция внешнего диаметра розетки на горизонтальную плоскость, a – длина лопасти розетки, τ – угол лопасти розетки; α – угол конусности лопастей розетки) (рис. 2). Для исследований основными параметрами геометрии оросителя были приняты: L – длина дужек, мм; α – угол конусности лопастей розетки, град; D – внешний диаметр розетки, мм; K_s – коэффициент рабочей поверхности розетки.

Внешний диаметр розетки выражается через внутренний диаметр и длину лопастей розетки следующим образом: $D = d + 2a$. Коэффициент рабочей поверхности розетки K_s представляет собой отношение площади поверхности розетки, взаимодействующей с потоком жидкости в процессе разбрызгивания раствора пенообразователя, и мнимой площади заполненной поверхности розетки (без пустых промежутков между лопастями розетки) и рассчитывается по формуле [12]

$$K_s = \frac{360d^2 \sin \alpha + \sum \tau (D_y^2 - d^2)}{360(d^2 \sin \alpha + D_y^2 - d^2)} \cdot 100\%. \quad (4)$$

При проведении экспериментальных исследований использовались конфигурации розеточного оросителя со следующими значениями параметров геометрии: $L = 30, 50$ и 150 мм; $K_s = 50, 64$ и 100 %; $D = 20, 50$ и 100 мм и $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ и 45° . Ранее авторами изучалось влияние геометрических параметров составных частей розеточного оросителя и гидродинамических параметров

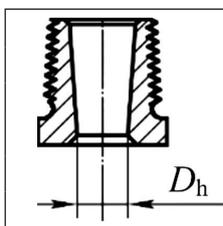
	Номер штуцера	D_h , мм	v , м/с	$v_{\text{сп}}$, м/с
	№ 1	10,0	14,9	10,7
	№ 2	11,0	13,8	
	№ 3	13,5	10,2	
	№ 4	15,7	8,5	
№ 5	17,6	6,2		

Рис. 1. Внешний вид экспериментальных образцов штуцера оросителя для автоматических установок пожаротушения с указанием диаметра выходного отверстия D_h [14]

Fig. 1. Appearance of experimental samples of a sprinkler fitting for automatic extinguishing systems, indicating the diameter of its outlet D_h [14]

¹ Сборно-разборный дренчерный ороситель: полез. модель ВУ 11801 / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор. Опубл. 30.10.2018.

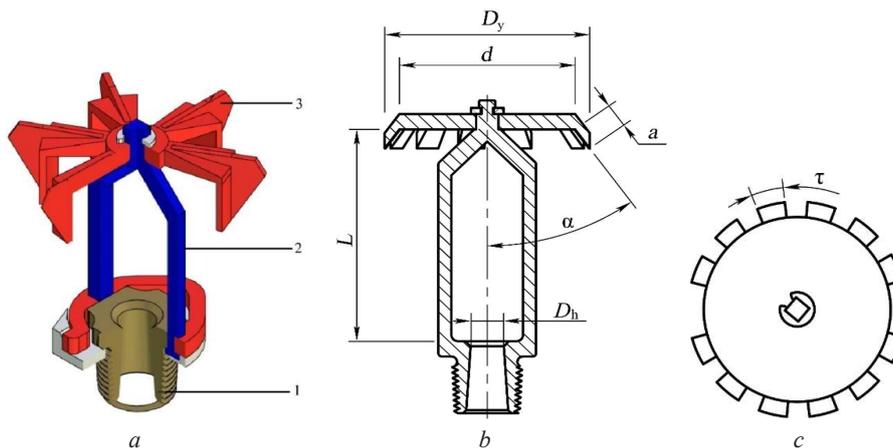


Рис. 2. Конструктивные элементы (а) и геометрические параметры (вид сбоку (b) и вид сверху (c)) сборно-разборного оросителя: 1 – штуцер; 2 – дужки; 3 – розетка; D_y – проекция внешнего диаметра розетки на горизонтальную плоскость; a – длина лопасти розетки; d – внутренний диаметр розетки; τ – угол лопасти розетки; α – угол конусности лопастей розетки; L – длина дужек

Fig. 2. Structural elements (a) and geometric parameters (side view (b) and top view (c)) of a dismountable sprinkler: 1 is the fitting; 2 is the frame arm; 3 is the deflector; D_y is the projection of the outer diameter of the deflector onto the horizontal plane; a is the length of the deflector tine; d is the inner diameter of the deflector; τ is the angle of the deflector tine; α is the taper angle of the deflector tine; L is the length of frame arm

струй водных растворов различных пенообразователей на кратность и устойчивость пены [6, 12, 15]. Экспериментальные исследования проводились по плану полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ) [14]. При пяти факторах, каждый из которых имел три уровня, план ПФЭ состоял из 243 серий опытов для каждой марки пенообразователя (с целью уменьшения погрешности измерений каждая серия состояла из пяти экспериментов). Таким образом, общее количество экспериментов составило 6075.

В результате получены значения кратности (K) и устойчивости (C) пены для исследуемых пенообразователей [12, 14]. Установлена зависимость данных характеристик от марки используемого пенообразователя, гидродинамических характеристик струи огнетушащего вещества (We), а также от геометрических характеристик пеногенерирующих устройств. Графики полученных зависимостей для кратности и устойчивости пены имеют схожий вид и пропорциональны друг другу [14]. В итоге обработки значительного массива экспериментальных данных было установлено, что зависимости C от K имеют линейный вид (рис. 3) и отличаются только углом наклона к оси абсцисс:

$$C = \gamma \cdot K, \quad (5)$$

где γ – коэффициент пропорциональности, с.

Сопоставив результаты экспериментальных данных, полученных в [8], при использовании пенообразователя Синтек-6НС (6 %) прослеживается аналогичная зависимость устойчивости (C) пены от ее кратности (K) с коэффициентом $\gamma \approx 11$, что коррелирует с результатами экспериментальных исследований для пенообразователя Синтек-6НС (6 %), полученными в настоящей работе (рис. 3, график 2).

Разрушение пены, капиллярное число и смачивающая способность растворов пенообразователей. Очевидно, что коэффициент пропорциональности должен зависеть прежде всего от физических характеристик и свойств водных растворов используемых пенообразователей. Чтобы понять, что включает в себя коэффициент γ , необходимо рассмотреть причины разрушения пены. Нарушение устойчивости пены (C) на начальном этапе связано с процессом самопроизвольного стекания жидкости пены по каналам Плато–Гиббса, что приводит к утончению пленок пузырьков и впоследствии к их разрушению [2, 3, 16, 17]. Этот процесс вызван в основном действием сил гравитации и капиллярных сил всасывания.

В узком канале Плато–Гиббса граница раздела жидкости с газом принимает искривленную форму (мениск), вогнутую в случае смачивания жидкостью стенок капилляра. Вогнутый мениск

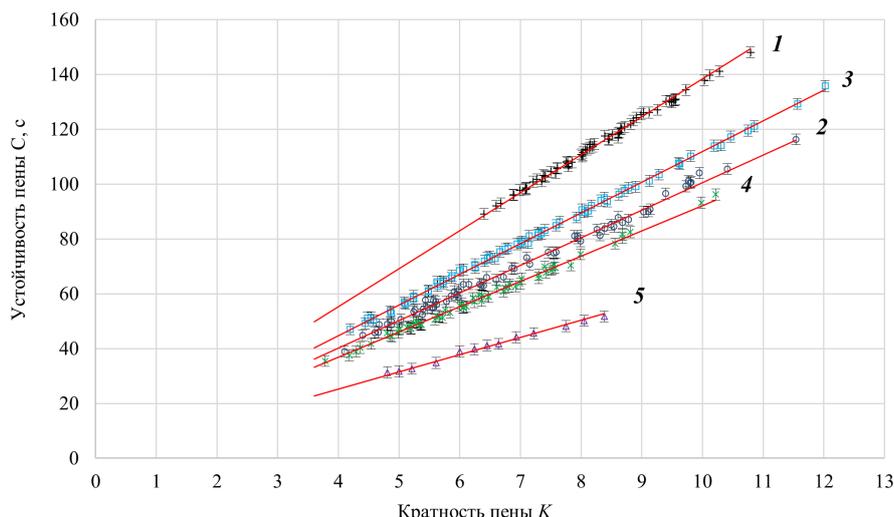


Рис. 3. Зависимость устойчивости пены C от ее кратности K [14]: 1 – ПО-6РЗ (6%), $\gamma = 13,84 \pm 0,24$; 2 – Синтек-6НС (6%), $\gamma = 10,05 \pm 0,24$; 3 – Люкс S (6%), $\gamma = 11,19 \pm 0,24$; 4 – Люкс АFFF (6%), $\gamma = 9,21 \pm 0,24$; 5 – ОПС-0,4 (1%), $\gamma = 6,30 \pm 0,24$

Fig. 3. The dependence of foam stability C on its expansion rate K : 1 – PO-6RZ (6%), $\gamma = 13,84 \pm 0,24$; 2 – Sintek-6NS (6%), $\gamma = 10,05 \pm 0,24$; 3 – Luks S (6%), $\gamma = 11,19 \pm 0,24$; 4 – Luks AFFF (6%), $\gamma = 9,21 \pm 0,24$; 5 – OPS-0.4 (1%), $\gamma = 6,30 \pm 0,24$

создает под своей поверхностью разрежение (отрицательное давление), которое заставляет жидкость затекать в капилляры со смачиваемыми стенками, в том числе против силы тяжести, что играет важную роль для сохранения устойчивости пены. Исходя из этого можно предположить, что коэффициент пропорциональности γ из формулы (5) связан с капиллярными силами и смачивающей способностью раствора пенообразователя.

В гидродинамике капиллярное число – это критерий подобия, выражающий соотношение между силами вязкого трения и поверхностного натяжения, действующими на границе раздела жидкость – газ. Этот критерий широко применяется для описания поведения пористых сред [18, 19], а при рассмотрении однофазных потоков является отношением We к Re [20]:

$$Ca = \frac{v_{cp} \cdot \eta}{\sigma} = \frac{We}{Re}, \quad (6)$$

где v_{cp} – средняя скорость струи водного раствора пенообразователя, м/с.

Так, пузырек воздуха имеет тенденцию деформироваться трением потока жидкости в капиллярах из-за эффектов вязкости, а силы поверхностного натяжения стремятся минимизировать площадь поверхности. В настоящей работе значение капиллярного числа находилось в диапазоне $0,350 \leq Ca \leq 0,662$ (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициента γ и капиллярного числа Ca в зависимости от используемого пенообразователя

Table 2. The values of coefficient γ and capillary number Ca depending on the foaming agent

Характеристика раствора пенообразователя	Пенообразователь				
	ПО-6РЗ (6%)	Синтек-6НС (6%)	Люкс S (6%)	Люкс АFFF (6%)	ОПС-0,4 (1%)
Коэффициент пропорциональности γ, c	$13,84 \pm 0,24$	$10,05 \pm 0,24$	$11,19 \pm 0,24$	$9,21 \pm 0,24$	$6,30 \pm 0,24$
Капиллярное число Ca	$0,481 \pm 0,006$	$0,383 \pm 0,004$	$0,442 \pm 0,004$	$0,662 \pm 0,010$	$0,350 \pm 0,005$

Смачивающая способность характеризуется, как правило, углом смачивания (или краевым углом смачивания), который образуется касательными плоскостями к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, а его вершина лежит на линии раздела трех фаз. Однако при определении смачивающей способности жидкостей, имеющих в своем составе поверхностно-

активные вещества (ПАВ), которые обеспечивают полное или практически полное растекание (смачивание) по гидрофильной поверхности, данный метод не дает высокую степень воспроизводимости. В связи с этим для исследования смачивающей способности водных растворов пенообразователей используется показатель смачивающей способности. Данный показатель определяется с помощью общепринятого метода, суть которого сводится к определению времени смачивания образца из хлопковой ткани, то есть с момента его погружения в испытуемый раствор пенообразователя с определенной объемной концентрацией до момента, когда образец ткани начинает тонуть (SN NS-EN 1772:2000¹, [21]).

Для определения показателя смачивающей способности авторами выполнены дополнительные эксперименты. Перед проведением исследований были подготовлены образцы круглой формы из неотбеленной хлопковой ткани диаметром (30 ± 1) мм, выдержанные при относительной влажности воздуха около 65 % в течение 3 сут. При температуре воды (28 ± 2) °С были приготовлены экспериментальные образцы водных растворов пенообразователей с рабочей концентрацией согласно паспорту: ПО-6РЗ – 6 %; Синтек-6НС – 6 %; Люкс S – 6 %; Люкс АFFF – 6 %; ОПС-0,4 – 1 %. Растворы затем охлаждались до достижения температуры (20 ± 1) °С. Образец из хлопковой ткани, помещенный в зажимное приспособление, вертикально погружали в стакан вместимостью 1000 мл и диаметром дна 95 мм, в который предварительно заливался раствор пенообразователя в объеме 700 мл. Одновременно с погружением образца из ткани в раствор фиксировалось время с момента погружения и до момента, когда образец из хлопковой ткани свободно начинал тонуть. Полученное время принималось за показатель смачивающей способности. Эксперимент проводился 5 раз с раствором каждого из исследуемых пенообразователей. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициента γ в зависимости от используемого пенообразователя
 Table 3. The values of coefficient γ depending on the foaming agent

Характеристика раствора пенообразователя	Марка пенообразователя				
	ПО-6РЗ (6 %)	Синтек-6НС (6 %)	Люкс S (6 %)	Люкс АFFF (6 %)	ОПС-0,4 (1 %)
Коэффициент пропорциональности, γ, c	$13,84 \pm 0,24$	$10,05 \pm 0,24$	$11,19 \pm 0,24$	$9,21 \pm 0,24$	$6,30 \pm 0,24$
Показатель смачивающей способности, τ_{cm}, c	$6,67 \pm 0,01$	$3,43 \pm 0,01$	$4,03 \pm 0,01$	$5,29 \pm 0,01$	$2,41 \pm 0,01$
Отношение $\tau_{cm}/Ca, c$	13,86	8,96	9,12	7,99	6,9
Отклонение τ_{cm}/Ca от $\gamma, \%$	+0,14%	-10,85%	-18,50%	-13,25%	+9,52%

Влияние физических характеристик растворов пенообразователей на коэффициент пропорциональности. Важно отметить, что исследуемый в работе коэффициент пропорциональности γ , как и параметры, которые его определяют, зависит от концентрации раствора пенообразователя. Поэтому здесь следует пояснить, почему для проведения исследований используется именно рабочая концентрация пенообразователя, рекомендуемая производителем. Известно, что при изменении объемной концентрации пенообразователя показатель смачивающей способности может существенно варьироваться. Так, в стандарте ASTM D2 281-10(2016)² приведен график зависимости показателя смачивающей способности от концентрации пенообразователя, из которого видно, что при изменении объемной концентрации пенообразователя от 0,2 до 6,0 % показатель смачивающей способности может изменяться от 2 до 87 с, что является существенной разницей.

Для изучения влияния концентрации пенообразователя в растворе на показатель смачивающей способности авторами были проведены собственные экспериментальные исследования с применением растворов различной концентрации и получены зависимости $\tau_{cm} = f(c)$. При анализе результатов было учтено требование¹, согласно которому минимально допустимая объемная концентрация пенообразователя в растворе должна быть не менее концентрации, при которой

¹ Surface active agents – Determination of wetting power by immersion: SN NS-EN 1772:2000 (ISO 8022:1990 modified). URL: <https://docs.cntd.ru/document/431948578> (date of application: 10.12.2023).

² Standard Test Method for Evaluation of Wetting Agents by the Skein Test: ASTM D2 281-10(2016). 2016. Vol. 15.04. 3 p. <https://doi.org/10.1520/D2281-10R16>

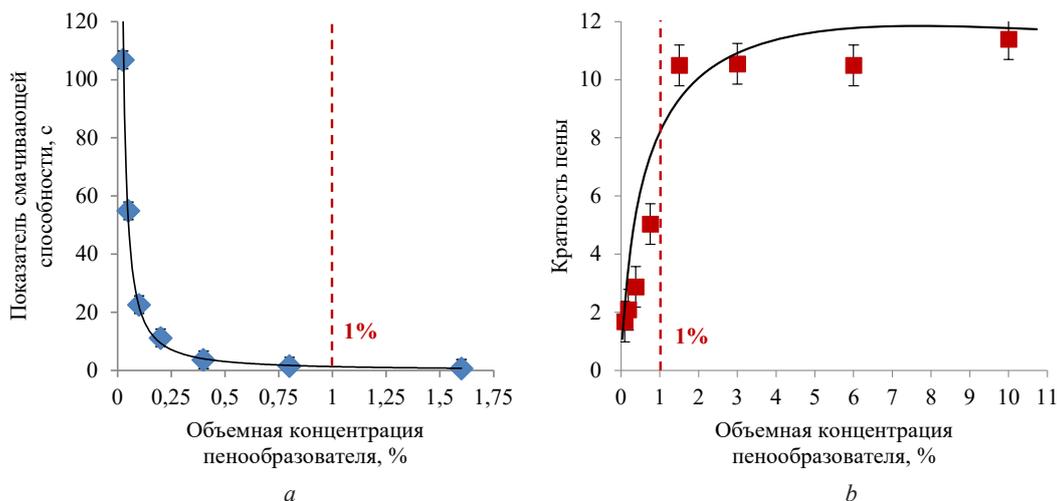


Рис. 4. Зависимость показателя смачивающей способности (а) и кратности образующейся пены (b) от объемной концентрации пенообразователя ОПС-0,4 в растворе

Fig. 4. The dependence of the wetting ability index (a) and the expansion rate of the foam (b) on the volume concentration of the OPS-0.4 foaming agent

значение показателя смачивающей способности составляет 45 с. При этом не менее важным критерием является поддержание более высокого значения кратности пены. В ходе эксперимента по определению зависимости кратности пены от объемной концентрации пенообразователя в растворе $K = f(c)$ использовалась специальная установка [21]. Эксперимент проводился по стандартной методике (см. SN NS-EN 1772:2000).

На рис. 4 представлены графики зависимости показателя смачивающей способности и кратности пены от объемной концентрации пенообразователя ОПС-0,4. Рабочая концентрация данного пенообразователя, установленная производителем для получения пены низкой кратности, составляет 1 %.

Видно, что повышение концентрации пенообразователя в растворе выше рекомендуемой производителем не будет оказывать значительного влияния на смачивающую способность раствора и кратность получаемой из него пены, однако приведет к существенному перерасходу дорогостоящего пенообразователя. График зависимости при использовании других исследуемых пенообразователей имеет аналогичный вид: до значений концентрации растворов пенообразователей, рекомендованных их производителями, показатель смачивающей способности резко падает, а кратность быстро растет, после чего падение $\tau_{см}$ и рост K замедляются. Как установлено в [22, 23], повышение концентрации пенообразователя выше значения, установленного производителем, может приводить даже к снижению значения кратности пены, что крайне нежелательно при тушении пожаров. Поэтому в настоящем исследовании авторами использовалась только рабочая концентрация пенообразователей, установленная производителем.

Значения капиллярного числа Ca и показателя смачивающей способности $\tau_{см}$ при нормальных условиях окружающей среды, а также отношение $\tau_{см}$ к Ca представлены в табл. 3. Как уже упоминалось, коэффициент пропорциональности γ в формуле (5) в первую очередь зависит от физических характеристик водных растворов используемых пенообразователей ($\tau_{см}$, σ , η), а также от скорости струи ($v_{сп}$) данных растворов для генерирования пены:

$$\gamma = \frac{\tau_{см}}{Ca}, \quad (7)$$

при этом взаимосвязь объемной устойчивости и кратности пены:

$$C = \frac{\tau_{см}}{Ca} \cdot K \quad \text{либо} \quad C = \frac{\sigma \cdot \tau_{см}}{\eta \cdot v_{сп}} \cdot K. \quad (8)$$

Для исключения влияния способа получения пены на зависимость (7) авторы провели исследования устойчивости и кратности при генерировании пены на сетке с использованием пенообразователя

Люкс S (6 %). Выбор пенообразователя обусловлен тем, что для него наблюдается наибольшее отклонение теоретического коэффициента пропорциональности по формуле (7) от экспериментального в формуле (5) – 18,5 %. Вместо розеточного оросителя (см. рис. 2) в экспериментальной установке размещалось специальное пеногенерирующее устройство с сеткой, представленное на рис. 5 [24]. Данное пеногенерирующее устройство позволяет производить замену сетки (использовались сетки с размером ячеек $0,5 \times 0,5$; $1,0 \times 1,0$ и $3,2 \times 3,2$ мм) и устанавливать ее на различном расстоянии от выходного отверстия штуцера (50, 100 и 200 мм). Результаты генерирования пены на сетке представлены в табл. 4.

Отличия значений экспериментально определенного коэффициента пропорциональности γ при использовании розеточных оросителей и пеногенерирующих устройств с сеткой составили не более 8 %, что подтверждает вывод о том, что указанный коэффициент зависит только от физических характеристик водных растворов используемых пенообразователей и скорости их истечения для генерирования пены. Также следует отметить, что в эксперименте с генерированием пены на сетках отклонение теоретического значения ($\tau_{см}/Ca$) от экспериментального значения γ по аналогии с оросителями составило около 18 % ($\tau_{см}/Ca = 9,12$; $\gamma = 10,6$).

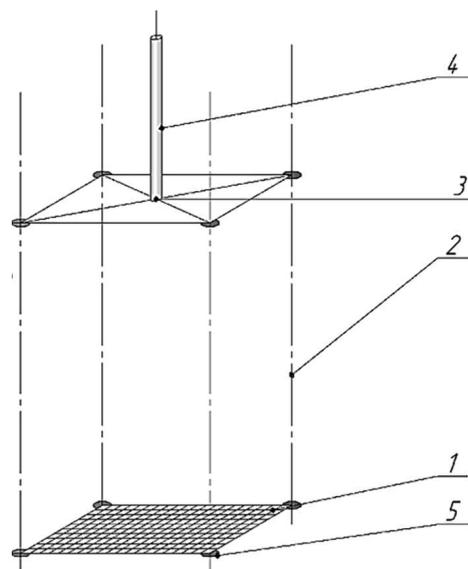


Рис. 5. Пеногенерирующее устройство с использованием сеток: 1 – сетка; 2 – металлические вертикальные ребра; 3 – держатель; 4 – трубопровод; 5 – фиксатор

Fig. 5. Foam generating device with mesh: 1 is the mesh; 2 is the metal vertical ribs; 3 is the holder; 4 is the pipeline; 5 is the retainer

Таблица 4. Результаты определения кратности и устойчивости при генерировании пены на сетке

Table 4. The results of determining expansion rate and stability of the foam using device with mesh

Линейные размеры ячейки сетки, мм	Расстояние установки сетки от выходного отверстия штуцера, мм	Экспериментальное значение K	Экспериментальное значение $K_{ср}$	Экспериментальное значение C , с	Экспериментальное значение $C_{ср}$, с	Экспериментальное значение γ для сеток	Экспериментальное значение γ для оросителей	Отклонение значений в столбцах 7 и 8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5 × 0,5	50	10,18	9,45	108,00	101,31	10,72	11,19	4,19 %
	100	9,89		106,33				
	200	8,28		89,60				
1,0 × 1,0	50	9,91	9,58	107,00	103,28	10,78	11,19	3,69 %
	100	9,49		101,50				
	200	9,35		101,33				
3,2 × 3,2	50	9,62	9,07	93,67	93,47	10,31	11,19	7,9 %
	100	9,17		96,50				
	200	8,42		90,25				

Заключение. В работе установлена линейная зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности с коэффициентом пропорциональности, равным отношению показателя смачивающей способности к капиллярному числу. Указанная зависимость справедлива как для пенообразователей общего (тип S), так и специального назначения (тип AFFF), а также для пенообразователей, применяемых для тушения пожаров в качестве смачивателя (тип WA) в исследованном в данной работе диапазоне изменения чисел We и Re и геометрических параметров пеногенерирующих устройств, применяемых для целей пожаротушения.

Полученное авторами выражение (7) связывает устойчивость и кратность пены не только при использовании розеточных оросителей, применяемых в автоматических установках пожаро-

тушения, но и насадков на пожарные стволы и иных пеногенерирующих устройств, позволяющих генерировать воздушно-механическую пену низкой кратности, а также не зависит от геометрических размеров используемых устройств.

Установленная зависимость позволяет определять устойчивость пен через значение их кратности, что сократит время и денежные затраты на экспериментальное определение устойчивости.

Список использованных источников

1. Романцов, И. И. Эффективность использования жидкофазных огнетушащих составов на объектах энергетики / И. И. Романцов, Е. И. Чалдаева // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф., 2–4 дек. 2015 г., Томск: в 2 т. – Томск: СКАН, 2015. – Т. 2. – С. 160–164.
2. Вилкова, Н. Г. Свойства пен и методы их исследования / Н. Г. Вилкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.
3. Камлюк, А. Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин. – Минск: Ун-т граждан. защиты, 2019. – 224 с.
4. Осипенко, С. И. Увеличение устойчивости противопожарной пены путем восполнения жидкой фазы при орошении / С. И. Осипенко, А. В. Кокшаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 4. – С. 65–73. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.04.65-73>
5. Изучение процессов тушения пламени нефтепродуктов низкократными пенами / В. М. Кучер [и др.] // Пожаротушение: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1984. – С. 29–37.
6. Kamluk, A. N. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers / A. N. Kamluk, A. O. Likhomanov, A. V. Grachulin // Fire Saf. J. – 2020. – Vol. 116. – P. 103177-1–103177-10. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103177>
7. Miles, G. D. Foam drainage / G. D. Miles, L. Shedlovsky, J. Ross // J. Phys. Chem. – 1945. – Vol. 49, № 1. – P. 93–101. <https://doi.org/10.1021/j150440a006>
8. Качанов, И. В. Установки автоматического пожаротушения с предварительной аэрацией огнетушащей рабочей среды / И. В. Качанов, И. В. Карпенчук, С. Ю. Павлюков. – Минск: БНТУ, 2018. – 149 с.
9. Канн, К. Б. Капиллярная гидродинамика пен / К. Б. Канн. – Новосибирск: Наука. Сибир. отд-ние, 1983. – 167 с.
10. Шевнина, Т. Е. Фрактально-перколяционный механизм разрушения пены: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.04 / Т. Е. Шевнина; Тюмен. госуд. ун-т. – Тюмень, 2004. – 26 с.
11. Кокшаров, А. В. Исследование термической устойчивости пены различной кратности / А. В. Кокшаров, С. И. Осипенко, Е. В. Гайнуллина // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 103–110. <https://doi.org/10.22227/PV.2020.29.03.103-110>
12. Камлюк, А. Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, А. В. Грачулин. – Минск: Ун-т граждан. защиты, 2023. – 244 с.
13. Стабилизация пены низкой кратности натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы / А. В. Кокшаров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 10. – С. 79–83.
14. Говор, Э. Г. Исследование ключевых классификационных характеристик пены и влияния на них параметров розеточного оросителя / Э. Г. Говор, А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов // Вестн. Фонда фундамент. исслед. – 2024. – № 1 (107). – С. 86–96.
15. Kamluk, A. N. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry / A. N. Kamluk, A. O. Likhomanov // Fire Saf. J. – 2019. – Vol. 109. – P. 102862-1–102862-8. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102862>
16. 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.
17. 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.
18. Попков, В. И. Гидродинамическое моделирование фильтрации при малых значениях капиллярного числа / В. И. Попков, С. В. Зацепина, В. П. Шакшин // Вестн. Самар. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. – 2005. – № 34. – С. 163–170.
19. Скрипкин, А. Г. Экспериментальные исследования кривой капиллярного осушения при ПАВ-полимерном заводнении / А. Г. Скрипкин, И. Н. Кольцов, С. В. Мильчаков // PRONEFT. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 40–46.
20. Günther, A. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis / A. Günther, K. F. Jensen // Lab on a Chip. – 2006. – Vol. 6. – P. 1487–1503. <https://doi.org/10.1039/b609851g>
21. Влияние концентрации пенообразователя на смачивающую способность и кратность пены при дозировании в автоматических спринклерных установках пожаротушения / А. О. Лихоманов [и др.] // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 2. – С. 156–167. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.156>
22. Попов, А. Л. Влияние природы пенообразователей на физико-технические свойства пен / А. Л. Попов, В. В. Нелюбова, Д. Д. Нецвет // Вестн. Белгород. госуд. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 3. – С. 5–12. https://doi.org/10.12737/article_5abfc9b7ce94e3.70688983
23. Горбач, П. С. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона / П. С. Горбач, С. А. Щербин // Вестн. Томск. госуд. архитектур.-строит. ун-та. – 2014. – № 5. – С. 126–132.
24. Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла на дисперсность пены / А. Н. Камлюк [и др.] // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Беларуси – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 441–450. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>

References

1. Romantsov I. I., Chaldaeva E. I. Efficiency of use of liquid-phase fire extinguishing compositions at power engineering facilities. *Materialy XXI Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'". T. 2* [Proceedings of the 21st All-Russian Scientific and Technical Conference "Power Engineering: Efficiency, Reliability, Safety". Vol. 2]. Tomsk, 2015, pp. 160–164 (in Russian).
2. Vilkova N. G. *Properties of Foams and Methods of Their Investigation*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2013. 120 p. (in Russian).
3. Kamluk A. N., Grachulin A. V. *Compression Foam for the Needs of Fire Brigades*. Minsk, University of Civil Protection, 2019. 224 p. (in Russian).
4. Osipenko S. I., Koksharov A. V. Increasing the stability of the fire extinguishing foam by replenishing the liquid phase during sprinkling. *Fire and Explosion Safety*, 2021, vol. 30, no. 4, pp. 65–73 (in Russian). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.04.65-73>
5. Kucher V. M., Merkulov V. A., Zhukov V. V., Kucher V. N., Ponimasov V. M. Study of oil products flame extinguishing processes by low-reddened foams. *Pozharotushenie: sbornik nauchnykh trudov* [Firefighting: a Collection of Scientific Papers]. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Fire Protection, 1984, pp. 29–37 (in Russian).
6. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Grachulin A. V. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers. *Fire Safety Journal*, 2020, vol. 116, pp. 103177-1–103177-10. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103177>
7. Miles G. D., Shedlovsky L., Ross J. Foam drainage. *Journal of Physical Chemistry*, 1945, vol. 49, no. 1, pp. 93–101. <https://doi.org/10.1021/j150440a006>
8. Kachanov I. V., Karpenchuk I. V., Pavlyukov S. Yu. *Automatic Fire Extinguishing Installations with Preliminary Aeration of the Fire Extinguishing Working Environment*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2018. 149 p. (in Russian).
9. Kann K. B. *Capillary Hydrodynamics of Foam*. Novosibirsk, Nauka Publ. Siberian branch, 1983. 167 p. (in Russian).
10. Shevnina T. E. *Fractal Percolation Mechanism of Foam Destruction*. Tyumen, 2004. 26 p. (in Russian).
11. Koksharov A. V., Osipenko S. I., Gaynullina E. V. Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio. *Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 3, pp. 103–110 (in Russian). <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.03.103-110>
12. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Grachulin A. V. *Foam Sprinklers for Automatic Fire Extinguishing Systems*. Minsk, University of Civil Protection, 2023. 244 p. (in Russian).
13. Koksharov A. V., Markov V. F., Buchelnikov D. Yu., Terentyev V. V. Stabilization of high density foams sodium salt of carboxymethylcellulose. *Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 10, pp. 79–83 (in Russian).
14. Govor E. G., Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O. Investigation of key foam classification characteristics and the influence of rosette sprinkler parameters on them. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2024, no. 1 (107), pp. 86–96 (in Russian).
15. Kamluk A. N., Likhomanov A. O. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry. *Fire Safety Journal*, 2019, vol. 109, pp. 102862-1–102862-8. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102862>
16. 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).
17. 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).
18. Popkov V. I., Zatsepina S. V., Shakshin V. P. Hydrodynamic modeling of filtration at low capillary number values. *Journal of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*, 2005, no. 34, pp. 163–170 (in Russian).
19. Skripkin A. G., Kol'tsov I. N., Mil'chakov S. V. Experimental studies of the capillary desaturation curve in polymer-surfactant flooding. *PRONEFT. Professionally About Oil*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 40–46 (in Russian).
20. Günther A., Jensen K. F. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis. *Lab on a Chip*, 2006, vol. 6, pp. 1487–1503. <https://doi.org/10.1039/b609851g>
21. Likhomanov A. O., Navrotskii O. D., Zhukovskii S. A., Kamluk A. N. The influence of foaming agent concentration on the wetting ability and foam expansion rate when dosing in automatic sprinkler systems. *Journal of Civil Protection*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 156–167 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.156>
22. Popov A. L., Nelyubova V. V., Netsvet D. D. The influence of the foaming agents nature on physical and technical properties of foam. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2018, no. 3, pp. 5–12 (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5abfc9b7ce94e3.70688983
23. Gorbach P. S., Shcherbin S. A. The effect of the foaming agent on the properties of foam and foam concrete. *Journal of Construction and Architecture*, 2014, no. 5, pp. 126–132 (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. *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>