



С. М. Шахов¹, А. І. Кодрик², О. Ф. Нікулін², О. М. Тітенко², С. А. Виноградов¹, І. Г. Стилик²

¹ Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

² Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

Проведено теоретичне обґрунтування залежності експлуатаційних характеристик компресійної піни залежно від геометричних розмірів та однорідності бульбашок, що її утворюють. Введено поняття умовної відносної міцності бульбашки як величини відношення площі центрального поперечного перетину бульбашки до її маси бульбашки та наведено формули для його вирахування. Наведено експериментальні залежності експлуатаційних характеристик компресійної піни від геометричних розмірів та гомогенності міхурів, що її утворюють, що дає змогу створювати ефективні системи з утворення КП та здійснювати управління процесами піноутворення та пожежогасіння. Результати досліджень підтверджують, що величини діаметрів міхурів КП та їхня гомогенність, що характеризується полідисперсністю піни, визначають її кратність, яка визначає стійкість та адгезійні властивості піни. У разі збільшення кратності піни, полідисперсність зменшується, тобто гомогенність зростає. Доведено, що існує прямий зв'язок між експлуатаційними характеристиками компресійної піни, такими як: стійкість піни, адгезійна властивість піни, вогнегасна здатність піни та її геометричними характеристиками – розмірами бульбашок та їхня гомогенність, при чому розміри міхурів та їх гомогенність (полідисперсність) є визначальними параметрами компресійної піни щодо її експлуатаційних характеристик. Технологічні рішення, спрямовані на зменшення розміру бульбашок піни та підвищення її однорідності призведуть до покращення експлуатаційних характеристик компресійної піни та її подальшого впровадження для підвищення ефективності гасіння лісних пожеж.

Ключові слова: компресійна піна; розміри бульбашок; однорідність; стійкість піни; лісові пожежі.

Вступ. Відомо, що одним із важливих чинників, який надає збиток лісовим ресурсам, є виникнення пожеж. Переважно під час гасіння твердих горючих речовин, а саме деревини, часто використовують воду, через її дешевизну і простоту використання. Цей вогнегасний засіб має низку недоліків і одним з перспективних напрямів підвищення ефективності боротьби з вогнем у лісових масивах пропонується застосування компресійної піни (Zalesov, Godovalov & Krektunov, 2014). Технологія використання такої піни значно поширена за кордоном і застосовують вже протягом кількох десятків років. На відміну від звичайної піни, вона має особливі, які не характерні для звичайної піни властивості, а саме: підвищену стійкість, посилену адгезію та вогнегасну здатність під час одночасного зменшення витрат води і піноутворювача (Taylor, 1998; CAFS, 2008; Neal Brooks). Це пов'язують зі зменшення діаметрів бульбашок компресійної піни, порівняно з повітряно-механічною

піною, та підвищенням однорідності. Відомо, що розміри бульбашок КП та їхня однорідність (Adamson, 1997; Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018) залежать від методів їх утворення, типу і концентрації піноутворювача (далі ПУ), наявності стабілізаційної речовини, співвідношення витрат водного розчину ПУ і повітря, зміна яких повинна забезпечувати створення піни, яка має належні властивості для боротьби з горінням певного класу пожеж і залишається стабільною.

Мета дослідження – виявити залежність експлуатаційних характеристик компресійної піни від геометричних розмірів та однорідності бульбашок, що її утворюють, що дасть змогу створювати ефективні системи з утворення КП та здійснювати управління процесами піноутворення та пожежогасіння з метою їх подальшого застосування для гасіння пожеж у лісних масивах України.

Наукові передумови для роботи – згідно з (GOST R 50588, 2012), середній розмір бульбашок піни серед-

Інформація про авторів:

Шахов Станіслав Михайлович, ад'юнкт, кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки.

Email: lophenns@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3914-2914>

Кодрик Анатолій Іванович, канд. техн. наук, начальник відділу інноваційних технологій.

Email: kodrik@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-3787-5674>

Нікулін Олександр Федорович, д-р техн. наук, начальник науково-дослідного центру інноваційних технологій.

Email: a.f.nikulin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9126-0681>

Тітенко Олександр Миколайович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, відділ інноваційних технологій.

Email: titenkoalex1954@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4950-8580>

Виноградов Станіслав Андрійович, канд. техн. наук, доцент, кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки.

Email: vynogradovs@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2569-5489>

Стилик Ігор Геннадійович, інженер, сектор метрології. Email: stilik_i@undiczs.dns.gov.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8474-2014>

Цитування за ДСТУ: Шахов С. М., Кодрик А. І., Нікулін О. Ф., Тітенко О. М., Виноградов С. А., Стилик І. Г. Визначення залежності характеристик компресійної піни. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 5. С. 103–106.

Citation APA: Shakhov, S. M., Kodryk, A. I., Nikulin, O. F., Titenko, O. M., Vinogradov, S. A., & Stylyk, I. G. (2019). Determination of the dependence of compression foam characteristics. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(5), 103–106. <https://doi.org/10.15421/40290520>

ньої та низької кратності піноутворювачів загального призначення знаходиться у межах від 2 до 5 мм. Використовуючи спеціальні ПУ, можливо отримувати таку піну з розмірами бульбашок від 1,8 до 2,5 мм. Щодо однорідності бульбашок – інформація не надається. Згідно з інформацією в іноземних джерелах, орієнтовний розмір бульбашок КП повинен бути не більше ніж 0,6–0,8 мм. Автори (Dogaç, 2012) стверджують, що "піна хорошої якості є однорідна, складається з дуже маленьких бульбашок, які, наприклад, мають середній еквівалентний діаметр в інтервалі від 0,5 до 1 мм". У попередніх дослідженнях (Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018) отримана нами КП складалася з бульбашок діаметром від 0,08 до 0,2 мм, (рис. 1), що значно менше від зазначених вище і що повинно позитивно впливати на характеристики якості піни, наприклад на її стійкість. Стійкість такої компресійної піни повинна зростати під час зменшення діаметра бульбашки.



Рис. 1. Загальний вигляд компресійної піни, діаметр бульбашок від 0,08 до 0,2 мм

Підвищення стійкості пов'язано з особливістю фізичних процесів самої технології утворення піни і переважно пояснюємо двома причинами: зміною розмірів бульбашок та їх однорідністю.

Розміри бульбашок. Дрібні бульбашки мають більшу механічну міцність, з меншою "рихлістю". Для теоретичного обґрунтування цього факту було введено поняття умовної відносної міцності бульбашки як величину відношення площі центрального поперечного перетину бульбашки до її маси бульбашки ($\text{кг}^{-1}\text{м}^2$)

$$k_m = \frac{S}{m} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)}{\rho \cdot \frac{\pi}{6} \cdot (D^3 - d^3)} = \frac{3 \cdot (D^2 - d^2)}{\rho \cdot 2 \cdot (D^3 - d^3)} = \frac{3 \cdot (D + d) \cdot (D - d)}{\rho \cdot 2 \cdot (D^2 + Dd + d^2) \cdot (D - d)} = \frac{3 \cdot (D + d)}{2 \cdot \rho \cdot (D^2 + Dd + d^2)}, \quad (1)$$

де: S – площа центрального поперечного перетину бульбашки, м^2 ; m – маса бульбашки, кг ; D, d – зовнішній та внутрішній діаметр бульбашки, м ; ρ – густина суміші води з піноутворювачем, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Виходячи з визначення поняття коефіцієнта кратності, отримуємо рівняння:

$$k_{FER} = \frac{V_{foam}}{V_{liq}} = \frac{D^3}{D^3 - d^3}, \quad (2)$$

де: V_{foam} – об'єм піни, м^3 , V_{liq} – об'єм суміші води з піноутворювачем, м^3 .

Розв'язуючи систему цих двох рівнянь, отримуємо формулу для величини умовної відносної міцності бульбашки

$$k_m = \frac{3 \cdot \left(1 - \left(\frac{k_{FER} - 1}{k_{FER}}\right)^{2/3}\right)}{2 \cdot D \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{k_{FER} - 1}{k_{FER}}\right)} \approx \frac{3}{2 \cdot D \cdot \rho}, \quad \text{кг}^{-1}\text{м}^2. \quad (3)$$

Оскільки значення діаметра бульбашки знаходиться у знаменнику, то стає очевидно, що досліджувана умовна міцність бульбашки збільшується зі зменшенням діаметра бульбашки. Однорідність піни, тобто мала різниця розмірів бульбашок, що її утворюють, є другою характеристикою механічних властивостей піни. Відповідно до рівняння Юнга-Лапласа (Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018), величина тиску повітря всередині бульбашки обернено пропорційна її діаметра, тому під час контакту бульбашок різного розміру відбувається перетікання повітря з малої бульбашки у більшу з утворенням нової збільшеної бульбашки, яка внаслідок збільшення діаметра має меншу стійкість. Ми стверджували (Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018), що розміри бульбашок КП та її однорідність для кожної конкретної установки залежать від методів утворення КП, типу і концентрації піноутворювача (далі ПУ), наявності в ньому стабілізаційних речовин, а також від співвідношення витрат водного розчину ПУ і повітря, повітряного тиску у системі подачі КП. Завдання дослідження – перевірити наведені вище припущення та встановити зв'язок між зміною розмірів бульбашок КП і їх однорідністю з експлуатаційними показниками піни, наприклад її стійкістю. Як зазначено у (Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018), стійкість КП (y) пропорційна її кратності (x):

$$y = 2,4732x - 15,538. \quad (4)$$

Враховуючи простоту визначення величини кратності піни, приймаємо її надалі показник якості піни. У роботі використовували методики та обладнання, викладені (Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018). Для визначення реальних розмірів міхурів було проведено калібрування мікроскопа та цифрової камери залежно від кратності збільшення. Для калібрування використовували об'єкт-мікрометр, який є прозорим склом, на якому нанесено шкалу 1 мм (1000 мкм), з ціною поділки 0,01 мм (10 мкм).

Результати дослідження. Провели три серії дослідів для піни різної кратності: Серія №1 – за кратності піни 20; Серія № 2 – за кратності піни 12; Серія № 3 – за кратності піни 6. Результати вимірів та оброблення даних навели у табл. 1 та 2 відповідно.

При цьому під \bar{D}_v приймаємо такий діаметр краплин, для якого частка f загального об'єму рідини перебуває у вигляді краплин меншого діаметра. Як чисельну інтерпретацію полідисперсності приймали величину відносного стандартного відхилення, яку обчислювали за формулою

$$S_{rel} = \frac{1}{D_{10}} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (D_i - \bar{D}_{10})^2}, \quad (5)$$

де: \bar{D}_{10} – величина середнього лінійного діаметра, мм ; D_i – результат оцінки величини діаметра i -го міхура, мм ; N – кількість міхурів певної серії дослідів (об'єм вибірки).

За результатами проведених досліджень побудували гістограми вибірок реальних розмірів бульбашок піни залежно від кратності піни, які навели на рис. 2.

Табл. 1. Результати вимірів геометричних характеристик КП

№ з/п	Кратність 20			Кратність 12,5			Кратність 5			
	діапазон діаметрів, мм		кількість у виборці	діапазон діаметрів, мм		кількість у виборці	діапазон діаметрів, мм		кількість у виборці	
	min	max		min	max		min	max		
1	0,089	0,091	3	0,090	0,094	5	0,045	0,060	1	
2	0,091	0,093	1	0,094	0,099	4	0,060	0,075	5	
3	0,093	0,095	9	0,099	0,103	12	0,075	0,090	13	
4	0,095	0,097	11	0,103	0,108	15	0,090	0,105	24	
5	0,097	0,100	23	0,108	0,112	29	0,105	0,120	26	
6	0,100	0,102	20	0,112	0,116	15	0,120	0,135	13	
7	0,102	0,104	21	0,116	0,121	7	0,135	0,150	9	
8	0,104	0,106	7	0,121	0,125	10	0,150	0,165	11	
9	0,106	0,108	10	0,125	0,130	4	0,165	0,180	5	
10	0,108	0,111	2	0,130	0,134	1	0,180	0,196	1	
Всього бульбашок у мм ² для серії №1			110	Всього бульбашок у мм ² для серії №2			102	Всього бульбашок у мм ² для серії №3		

Табл. 2. Результати розрахунків статистичних характеристик КП

№	Серія № 1	Серія № 2	Серія № 3
Середній лінійний діаметр \bar{D}_{10} , мм	0,1	0,11	0,115
Дисперсія, мм	0,0046	0,0089	0,0284
Похибка оцінки середнього лінійного діаметра, мм	0,00044	0,00088	0,00273
Відносна похибка у відображенні	1,2 %	1,7 %	3,8 %
Середній діаметр за площею поверхні \bar{D}_{20} , мм	0,108	0,112	0,109
Середній діаметр за об'ємом \bar{D}_{30} , мм	0,12	0,127	0,127
Середній діаметр Соутера SMD, \bar{D}_{32} , мм	0,013	0,014	0,016
Коефіцієнт полідисперсності S_{rel} , %	4,6	8,1	24,6
Діаметр \bar{D}_{vf} , мм	$f=0,1$	0,0949	0,1004
	$f=0,5$	0,1007	0,134
	$f=0,9$	0,1066	0,1683

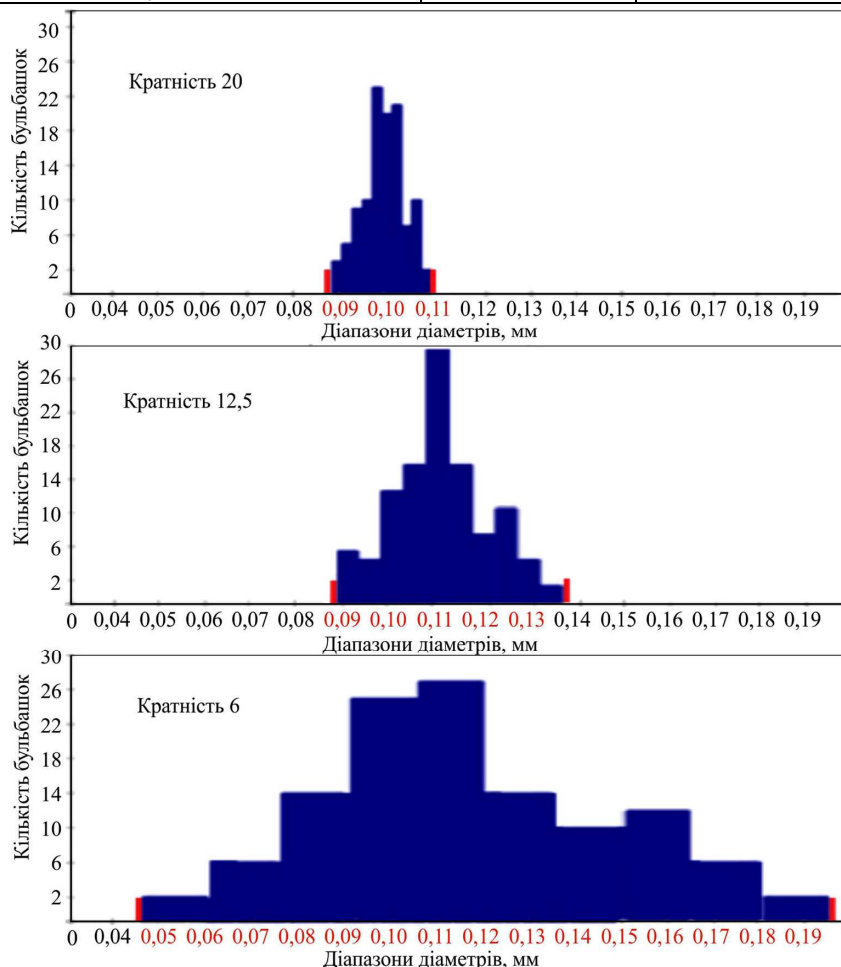


Рис. 2. Гістограми вибірок реальних розмірів бульбашок від кратності піни

Наведені гістограми підтверджують, що величини діаметрів бульбашок КП та їхня гомогенність, яка в нашому випадку характеризується полідисперсністю, виз-

начають її кратність, яка (Nikulin, Kodrik & Titenko, 2018) визначає стійкість та адгезійні властивості піни. У разі збільшення кратності піни, полідисперсність

зменшується, тобто однорідність зростає. Графік залежності полідисперсності піни від її кратності наведено на рис. 3.

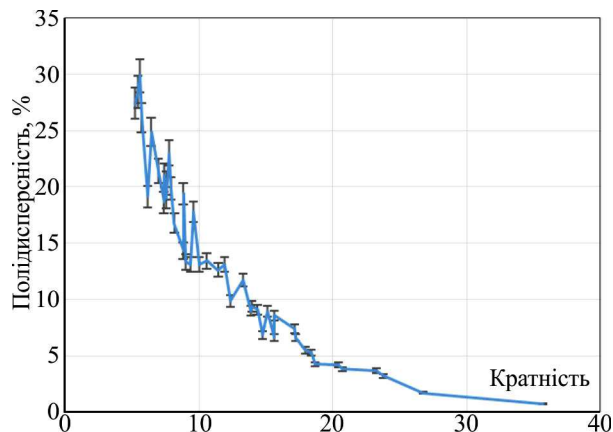


Рис. 3. Залежність полідисперсності піни від її кратності

Висновки. Аналізуючи викладений матеріал, можна зробити такі висновки:

1. Існує прямий зв'язок між експлуатаційними характеристиками КП, такими як: стійкість піни, адгезійна властивість піни, вогнегасна здатність піни та, її геометричними характеристиками – розмірами бульбашок та їх однорідністю, при чому розміри бульбашок та їхня гомогенність (полідисперсність) є визначальними параметрами компресійної піни щодо її експлуатаційних характеристик.
2. Аналізуючи графічний матеріал, зазначимо, що однорідність, яка характеризується полідисперсністю піни, визначає її кратність. У разі збільшення кратності піни, полідисперсність зменшується, тобто однорідність зростає.
3. Технологічні рішення, спрямовані на зменшення розміру бульбашок піни та підвищення її однорідності приз-

ведуть до покращення експлуатаційних характеристик компресійної піни та її подальшого впровадження для боротьби з пожежами в лісних масивах на території України.

Перелік використаних джерел

- Adamson, A. W., & Alice P. Gast. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces*. A Wiley-Interscience Publication.
- CAFS. (2019). *CAFS – straight answers for the beginner or the experienced*. Retrieved from: <http://www.cafsinfo.com> (accessed 05.03.2009)
- Dorau, G., & Kryuger, T. (2012). RU Patent № 2456037.
- GOST R 50588. (2012). *Penobrazovateli dlya tusheniya pozharov. Penobrazovateli dlya tusheniya pozharov*. [In Russian].
- Navrotskiy, O. D., et al. (2012). *Penogeneriruyuschie sistemy so szhatyim vozduhom – sredstvo pennogo pozharotusheniya novogo pokoleniya. Bulletin of the Command Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 1(15), 22–31*. [In Russian].
- Neal Brooks. (2019). *Neal Brooks – compressed Air Foam Systems*. Retrieved from: <http://compressedairfoamsystem.com> (accessed 12.03.2017).
- Nikulin, O. F., Kodrik, A. I., & Titenko, O. M. (2018). *Provesti poshukovi doslidzhennya z vidpratsyuvannya skladu vognegasnoyi rehovini u viglyadi kompresiyanoi pini. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu, UkrNDITsZ, DSNS Ukraini*. [In Ukrainian].
- Nikulin, O. F., Kodrik, A. I., Titenko, O. M., & Prisyazhnyuk, V. V. (2018). *Rozroblennya eksperimentalnogo laboratornogo zrazka sistemi pinnogo pozhezhogasinnya, scho spozhivae stisnene povitrya. Naukoviy visnik: Tsivilniy zahist ta pozhezhna bezpeka, 2(6), 4–9*. [In Ukrainian].
- Taylor, R. G. (1997). *Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions*. (Executive Development Research paper). Morristown, MD: National Fire Academy.
- Zalesov, S. V., Godovalov, G. A., & Krektunov, A. A. (2014). *Sistema pozharotusheniya NATISK dlya ostanovki i lokalizatsii lesnyih pozharov. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, 3*. [In Russian].

S. M. Shakhov¹, A. I. Kodryk², O. F. Nikulin², O. M. Titenko², S. A. Vinogradov¹, I. G. Stylyk²

¹ National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² Ukrainian Scientific Research Institute of Civil Defence, Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF COMPRESSION FOAM CHARACTERISTICS

One of the promising ways to combat forest fires is considered. The authors suggest using compression foam as an extinguishing agent instead of ordinary water, which has several advantages. Unlike conventional foam, it has special properties that are not characteristic of the ordinary foam, such as increased stability, enhanced adhesion and fire extinguishing ability while reducing the flow of water and foaming agent. In order to increase the effective use of this extinguishing medium, we performed the theoretical substantiation of the dependence of operational characteristics of the compression foam depending on the geometric dimensions and homogeneity of the bubbles it is made up of. The notion of conditional relative strength of the bubble as a value of the ratio of the area of the central transverse section of the bubble to its bubble mass is introduced and the formulas for its deduction are given. The experimental dependences of the operational characteristics of the compression foam on the geometrical sizes and the homogeneity of the bubbles forming it, which will allow creating effective systems for the formation of a compressive foam, and controlling the processes of foaming and fire extinguishing, are presented. The results of the studies confirm that the values of the diameters of the bubbles of the compression foam and their homogeneity, characterized by the polydispersity of the foam, determine its multiplicity, which in turn determines the stability and adhesion properties of the foam. With an increase in the frequency of foam, the polydispersity decreases, i.e., homogeneity increases. It has been proved that there is a direct relationship between the operational characteristics of the compression foam such as the foam stability, the adhesive property of the foam, the fire-extinguishing ability of the foam and its geometric characteristics – the size of the bubbles and their homogeneity, in which the size of the bubbles and their homogeneity (polydispersity) are the determining parameters of compression foam for its performance. Technological solutions aimed at reducing the size of foam bubbles and enhancing their uniformity will lead to improved performance of the compression foam in order to increase the fire-extinguishing capabilities of the compression foam in the fight against forest fires.

Keywords: compression foam; bubble sizes; uniformity; foam stability; forest fires.