



# **Information and Innovation Technologies in the Life of Society**

edited by Aleksander Ostenda  
and Nataliia Svitlychna

**Series of monographs Faculty  
of Architecture, Civil Engineering  
and Applied Arts**

Katowice School of Technology

Monograph 28

Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach, 2019



**Information and Innovation Technologies  
in the Life of Society**

edited by Aleksander Ostenda  
and Nataliia Svitlychna

**Series of monographs Faculty  
of Architecture, Civil Engineering  
and Applied Arts**

Katowice School of Technology

Monograph 28

### **Scientific editors**

prof. WST, dr Aleksander Ostenda and dr Nataliia Svitlychna

### **Editorial board**

*Larysa Abyzova (Ukraine), Natalia Afanasieva (Ukraine),  
Michał Ekkert, Magdalena Gawron-Łapuszek,  
Paweł Mikos, Tetyana Nestorenko (Ukraine),  
Oleksandr Nestorenko (Slovakia), Aleksander Ostenda,  
Anna Panasiewicz, Sylwia Pawlikowska-Musiewicz,  
Olena Senderuk (Ukraine), Olha Shevchenko (Ukraine),  
Nataliia Svitlychna (Ukraine), Magdalena Wierzbik-Strońska*

### **Reviewers**

dr Yuliia Bilotserkivska (*Ukraine*)  
dr Tetyana Zubro (Slovakia)

Series of monographs Faculty of Architecture, Civil Engineering and  
Applied Arts Katowice School of Technology  
Monograph · 28

The authors bear full responsible for the text, quotations and illustrations

Copyright by Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, 2019

**ISBN: 978-83-955125-3-7**

### **Editorial compilation**

**Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej Katowice**

ul. Rolna 43 40-555 Katowice

tel. 32 202 50 34, fax: 32 252 28 75

[www.wst.pl](http://www.wst.pl) / [www.wydawnictwo.wst.pl](http://www.wydawnictwo.wst.pl)

2.8. Innovative development of the transport automobile system of Ukraine: problems and prospects	193
2.9. Organizational fundamentals of functioning of general education in UK and Ukraine: comparative analysis	201
2.10. Tutorial practice as an innovative model of educational communication in higher school	207
2.11. The paradigm of symbolic values of biblionyms with anthroponym component in the literacy of Ukrainian and Polish artists	213
2.12. Interdepartmental projects in the conditions of education content integration: experience of the A. S. Makarenko Sumy State Pedagogical University	221
2.13. Constructing structures of the quality assessment system and its study of neural-network means	232
2.14. Creative Hub ARTCOR – modern engine of innovation and creativity in Chisinau	247
2.15. Psychological and pedagogical aspects of organization of information interaction in the conditions of using electronic educational resources	258
2.16. Tourism in Kharkiv region: reality and perspectives	269
<b>Part 3. Modern Aspects of Realization of Security of a Person and Society</b>	<b>283</b>
3.1. Gender features of domestic violence	283
3.2. Formation of structure of protective clothing assortment and its elements on the basis of transformation principles	291
3.3. Innovative and military-industrial component of overcoming modern challenges of the Baltic-Black Sea region countries	310
3.4. Physical therapy and ergotherapy of children of the first year of life with hypoxic-ischemic lesions of the central nervous system	316
3.5. Psychological security of personality of cadets and students NUCDU	322
3.6. Innovative approaches to training rescuers for high-rescue operations	332
3.7. The use of information technology to control the mode of operation of biological wastewater treatment facilities	344
3.8. Innovative approaches to the revitalization of technogenic landscapes	351
3.9. Methodology of determination of characteristic of fireproof capability of coatings of hollow core metal deck slabs	362
3.10. Use of monitoring of buildings and structures for safety	377
3.11. The newest technologies and their role are in forming of safety of society	389
3.12. Innovative technologies in firefighting: compression foam	395
<b>Annotation</b>	<b>407</b>
<b>About the authors</b>	<b>420</b>

**3.10. Illia Rudenko, Yurii Otrosh, Mykola Udianskyi. Use of monitoring of buildings and structures for safety.**

One of the main causes of natural and man-made emergencies in Ukraine is the obsolescence of fixed assets and the state of emergency of a large part of utility networks. In recent years, the problem of environmental monitoring and operational activation of elements of buildings and structures, engineering networks has developed. The composition of the monitoring system is considered in the paper. The mathematical model of the building is considered as an example of one of the elements of the monitoring system. The mathematical model made it possible to perform rapid preliminary prediction of values of controlled parameters of building structures. It is advisable to determine the technical condition of the used structures of the buildings on the basis of the results of the performed survey, followed by the use of the obtained results to simulate the technical condition in the software and to check the calculation of the system «foundation-foundation-top structure».

**3.11. Alexander Sklyarenko. The newest technologies and their role are in forming of safety of society.**

The analysis of the experience and the situation in the aspects of new technologies (nanotechnologies and nanoindustry) of leading countries was completed. The first successful native steps in the nanoactivities were studied. The ways and mechanisms of commercialization of scientific and technological activities was proposed.

**3.12. Stanislav Shakhov, Nazariy Balaka. Innovative technologies in firefighting: compression foam.**

The analysis of foam compressed air foam systems and the studies on the properties of extinguishing compression air foam are analyzed. It was found that the research used patented units for the generation compression air foam with different technical parameters. The purpose of the study was to develop a method for designing technical parameters of such systems and for their further implementation in the rescue departments in Ukraine. The mathematical model is developed. The technical parameters of the installation have been calculated and the results obtained, which can be used by designers in the development of industrial designs of installations for the generation of extinguishing compression foam.

### 3.12. Innovative technologies in fire fighting: compression foam

#### 3.12. Інноваційні технології в пожежогасінні: компресійна піна

Основним вогнегасячим засобом на сьогодні є вода. Але лише 20% її бере участь у гасінні пожежі, крім цього використання води може тягти за собою значні матеріальні збитки.<sup>531,532</sup> Використання пін при пожежогасінні скорочує час для гасіння пожежі, зменшує кількість води, необхідну для ліквідації вогню, і є більш універсальним засобом. В даний час в США, Європі та інших провідних країнах поширені системи подачі компресійної піни. Особливість даних установок, на відміну від повітряно-механічних систем, полягають в можливості генерації піни за рахунок одночасної подачі в спеціальну камеру змішування повітря під тиском і водяного розчину піноутворювача, а не генерації розчину за допомогою ежектуючого повітря. До основних переваг компресійної піни можна віднести утворення піни, яке відбувається безпосередньо біля насосної установки, на відміну від звичайної вогнегасної піни, яка утворюється вже у приладі гасіння, що дозволяє зменшити енергетичні затрати на її доставку до місця пожежі, можливість подачі піни на великі відстані та гасіння електрообладнання. Пожежні рукави, заповнені компресійною піною, значно легші, а, отже, підвищується маневреність ствольщика.<sup>533,534,535,536,537</sup>

Основними складовими елементами системи CAFS є пожежний насос, компресор (або балони з повітрям) і система регулювання подачі піноутворювача.<sup>538,539,540</sup> З насосу виходить вода під тиском, до якої у необхідній пропорції додається піноутворювач. Можливо утворення водного розчину піноутворювача безпосередньо в насосі або перед ним. Далі до утвореної суміші додається повітря під тиском, за допомогою якого утворюється піна низької кратності, що надалі рухається рукавами. Найпростішу схему отримання газонаповненої піни наведено на Рис. 1.

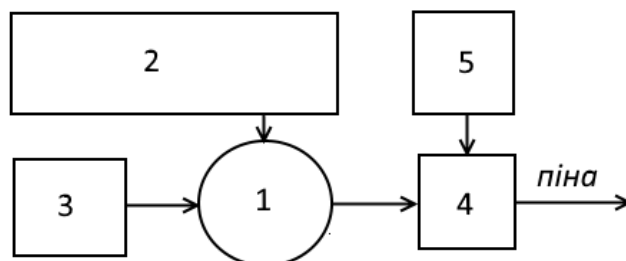


Рис. 1. Схема отримання газонаповненої піни: 1 – насос; 2 – цистерна для води; 3 – ємність з піноутворювачем; 4 – пінозмішувач; 5 – компресор

На сьогоднішній день в Україні використовуються повітряно-механічні системи подачі піни, і для того, щоб впровадити на наш ринок системи подачі компресійної піни, необхідно провести аналіз існуючих закордонних систем, експериментальних досліджень із застосування компресійної піни та розробити спосіб для технічного проектування параметрів відчизняних установок CAFS.

<sup>531</sup> Korolchenko A. Y. (2004). Pozhezhovybukhonebezpeka rehovyn i materialiv ta zasoby yikh hasinnia. 747.

<sup>532</sup> Terebnev V. V. (2004) Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi. Taktychni mozhlyvosti pozhezhnykh pidrozdiliv. 248.

<sup>533</sup> LaPolla J. A. (2012). Compressed Air Foam Fire Grounds Evolution Tests California Polytechnic State University.

<sup>534</sup> Li Huiqing. (2000). Experimental study of foam generated by compressed air foam system., 105-111

<sup>535</sup> Taylor R. G. (1998). Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions., 75-112.

<sup>536</sup> Murdock, J. I. (1997). Compressed air foam systems: A project pertaining to an adoption decision.

<sup>537</sup> Colletti D. J. (1994). Testing CAFS in live burns Fire Engineering, 147, 74-76.

<sup>538</sup> Hrytsyna I. M. (2016). Skhema otrymannia kompresii noi piny ta dysperhovanoi vodi, 78-83.

<sup>539</sup> Tytarenko A. V. (2015). Hazonapovnena pyna – efektyvnyi zasib pozhezhohasinnia lisovykh pozhez, 246-250.

<sup>540</sup> Michael A. (2002). U.S. Patent No. 6357532 B1.

Метою дослідження є розробка способу для проектування технічних параметрів систем подачі компресійної піни для подальшого їх впровадження у підрозділах ДСНС України. Для досягання поставленої мети був проведений аналіз існуючих закордонних систем CAFS, експериментальних досліджень із застосування копресійної піни.

Серед провідних світових виробників засобів протипожежного призначення системи газонаповненої піни (CAFS – compressed air foam system) набули значного поширення.

Можна виділити три основних напрямки застосування CAFS:

- стаціонарні автоматичні системи пожежогасіння;
- мобільні установки пожежогасіння;
- вбудовані системи в пожежні автомобілі.

Однією з найбільш відомих виробників систем газонаповненої піни є німецька фірма «One seven»<sup>541,542</sup>, яка володіє патентом на цю технологію та виготовляє стаціонарні та мобільні установки пожежогасіння. На Рис. 2 наведений пристрій для утворення компресійної піни, запатентований «One seven».

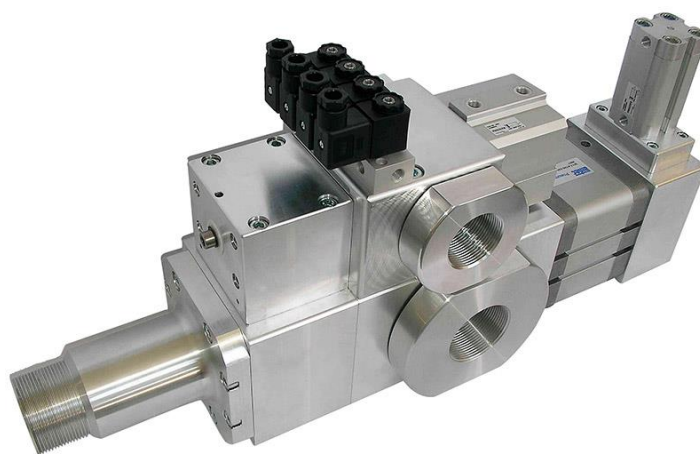


Рис. 2. Система утворення газонаповненої піни VDS-Approved One Seven

Системи One seven генерують газонаповнену піну з вмістом піноутворювача в розчині у діапазоні від 0,3 до 1 %. При цьому співвідношення об'єму розчину піноутворювача до об'єму повітря у готовій піні складає 1:7, що й набуло відображення у назві технології. На Рис. 3 наведено зображення стаціонарної установки пожежогасіння «One seven».<sup>543</sup>



Рис. 3. Стаціонарна установка пожежогасіння One seven

<sup>541</sup> Belova A. (2009). Narod, kotoryi yzobrel porokh, znaet, kak borotsia s ohne 18-19.

<sup>542</sup> Oneseven.

<sup>543</sup> Systeme, einfach, sicher und okonomisch.

На Рис. 4 наведено принцип роботи цієї системи. Водяний насос подає водний розчин піноутворювача до піногенератора, до якого в свою чергу компресор нагнітає повітря. Живлення елементів системи здійснює електричний блок, а блок керування відповідає за співвідношення води, піноутворювача та повітря. Від піногенератора вже готова піна рухається до споживачів.

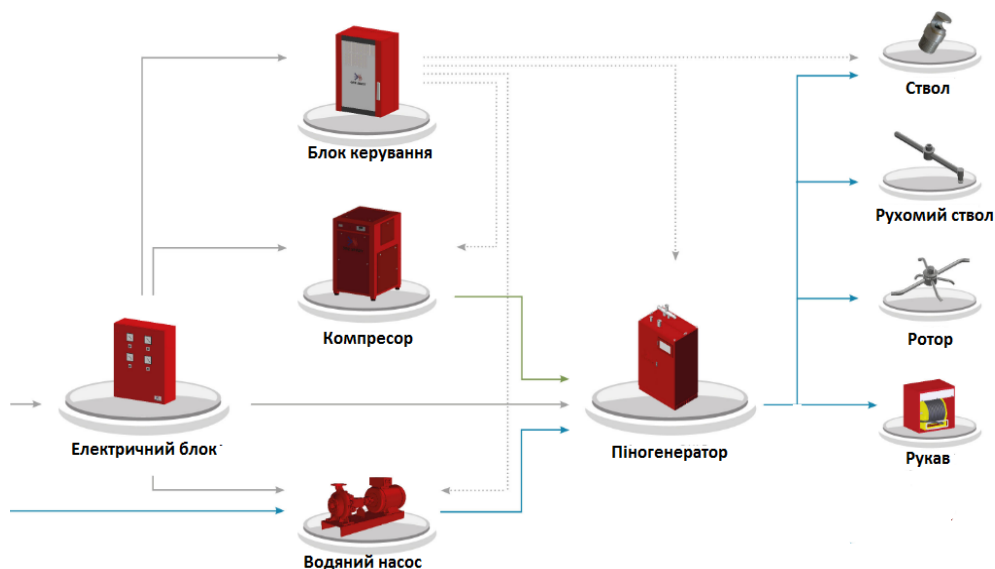


Рис. 4. Принцип роботи установки «One seven»

Окрім наведеного, компанія «One seven» виготовляє наступні установки пожежогасіння<sup>544</sup>:

- Stored-Energy-Systeme – замкнена система з запасом води, піноутворювача та повітря дозволяє працювати до 10 хвилин при гасінні пожежі;
- Maxi-Xtinguisher – мала стаціонарна система із заздалегідь підготовленим водним розчином піноутворювача, що знаходиться під тиском, має дуже малий час приведення в дію;
- Wandhydranten WXS – стаціонарна настінна система пожежогасіння, що може бути використана як альтернатива звичайним пожежним кранам, має рукав довжиною до 60 м та дальність подачі струменя піни до 15 м протягом 20 хвилин.

Французький виробник протипожежної техніки Gimaex, яку компанія One seven постачає автомобільними модулями пожежогасіння, виготовляє лінійку пожежних автомобілів з вбудованими системами газонаповненої піни (Рис. 5): автоцистерни, аеродромні автомобілі, лісові пожежні автомобілі, автомобілі для промислових підприємств.<sup>545</sup>

У Російській Федерації з 2012 року компанією «СпецАвтоТехника» розроблено та впроваджено у виробництво систему гасіння пожеж компресійною піною «NATISK».<sup>546,547,548,549</sup> Основними перевагами запропонованої системи виробники називають скорочення часу гасіння в 5-7 разів, та зниження витрати води у 5-15 разів за рахунок

<sup>544</sup> Systeme, Oneseven

<sup>545</sup> Firefighting Vehicles. Gimaex.

<sup>546</sup> Описанье технологий NATISK. (2011).

<sup>547</sup> Zalesov S. V. (2014). Novi sposob sozdaniya zahradytelnykh y opornykh protyvopozharnykh polos, 90-94.

<sup>548</sup> Zalesov S. V. (2014). Sistema pozharotusheniya NATISK dlia ostanovky y lokalizatsyy lesnykh pozharov.

<sup>549</sup> Zalesov S. V. (2016). Yspolzovanye systemy pozharotusheniya NATISK pry lykvitatsyy torfianykh pozharov, 4-10.



скорочення часу роботи ствола. Кратність готової піни – 5-15. Повітря нагнітається від балонів під тиском.

З систем NATISK слід виділити мобільні установки пожежогасіння «NATISK-50M BL», «NATISK-100M BL» та «NATISK-300M BL».<sup>550,551</sup>

Також «СпецАвтоТехника» виготовляє пожежні автомобілі, що реалізують систему NATISK [18]. Це пожежні автоцистерни та автомобілі першої допомоги, які можуть бути виготовлені на базі автомобілів Урал, КамАЗ, ГАЗ, УАЗ, SILANT.

Санкт-Петербурзькою фірмою «Сталт» розроблена та впроваджена технологія компресійної піни STALT-fireflex, що реалізована (Рис. 5) в установках автоматичного пожежогасіння.<sup>552</sup> У цих системах використовується 2%-вий розчин піноутворювача, кратність готової піни – 10.



Рис. 5. Установка автоматичного пожежогасіння STALT-fireflex

Застосування компресійної піни є новим способом пожежогасіння. Тому кількість наукових робіт, що присвячено цій тематиці значна менша у порівнянні з іншими напрямками пожежогасіння. Найбільша кількість відомих досліджень присвячено використанню компресійної піни для гасіння рідких горючих речовин.

Так, у роботі<sup>553</sup> оцінювалась вогнегасна ефективність системи подачі компресійної піни при різних співвідношеннях кількості стисненого повітря і водного розчину піноутворювача для гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням плівкоутворюючого піноутворювача AFFF 3%. У дослідженні<sup>554</sup> порівнювалась ефективність гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням піноутворювачів класу А (змочувачі) і AFFF

<sup>550</sup> Zalesov S. V., Hodovalov H. A., (2014). Systema pozharotusheniya NATISK dlia ustanovky y lokalyzatsyy lesnykh pozharov. Sovremennyye problemy nauky y obrazovaniya

<sup>551</sup> Zalesov S. V., Hodovalov H. A., Krekturnov A. A. (2016). Yspolzovanye systemy pozharotusheniya NATISK pry lykvydatsyy torfianykh pozharov. Lesa Rossyy y khoziaistvo v nykh, 1 (56), 4-10.

<sup>552</sup> Zalesov S. V., Hodovalov H. A., Krekturnov A. A. (2016). Yspolzovanye systemy pozharotusheniya NATISK pry lykvydatsyy torfianykh pozharov. Lesa Rossyy y khoziaistvo v nykh, 1 (56), 4-10.

<sup>553</sup> Dong-Ho R. (2016). Class B Fire-Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air-to-Aqueous Foam Solution Mixing Ratios, 2-12.

<sup>554</sup> Crampton G. (2007). Comprasion of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Sopution, 1-25.

(плівкоутворюючий). У роботі <sup>555</sup> вивчено вплив типу пінних бульбашок системи CAFS на час гасіння пожежі. Як джерело загорання використовували бензин. Щодо застосування компресійної піни для гасіння твердих горючих речовини, то в дослідженні <sup>556</sup> проведено порівняння ефективності гасіння таких пожеж компресійною піною та повітряно-механічною піною низької кратності. Автором <sup>557</sup> проведено експериментальні дослідження, в результаті чого отримані дані по значенням струмів витоку по струменю компресійної піни для різних показників від ствола до мішені, при різних значеннях напруги і показників кратності. Ряд досліджень було спрямовано на пошук оптимальних способів змішування компонентів в УКП. Так, у роботі <sup>558</sup> проаналізовано існуючі способи вводу повітря в камеру змішування CAFS.

Таким чином, усі відомі дослідження спрямовані, в основному, на експериментальне визначення ефективності застосування компресійної піни для гасіння пожеж різних речовин. При цьому в експериментальних дослідженнях застосовуються УКП з різними технічними параметрами, аналіз яких проведений вище. Спосіб розробки та проектування вищезазначених систем запатентовані виробниками та відсутній у відкритому доступі. Тому важливою проблемою для впровадження систем подачі компресійної піни у підрозділах ДСНС України на сьогодні, є відсутність змоги самостійної розробки, проектування та визначення технічних параметрів таких систем, для подальшого їх застосування для боротьби з пожежами.

На сьогодні загальною тенденцією при проектуванні різноманітних конструкцій є розробка математичних моделей. Розробка таких моделей передувє конструктивним рішенням та часто є розрахунковою основою для них. Така математична модель дозволить аналітично отримати та спроектувати оптимальні технічні параметри установки для генерації компресійної піни для конкретного випадку її застосування під час гасіння пожежі.

*Розробка математичної моделі установки для генерації компресійної піни.* Досить часто математична модель є багатовимірною системою рівнянь алгебраїчних, диференціальних, яку можна вирішувати, як правило, тільки чисельними методами. Тому для побудови математичної моделі було обране графічне середовище імітаційного моделювання Simulink (інтегроване в програмне середовище MatLab), що дозволяє за допомогою окремих блоків у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі. Використання Simulink є зручним інструментом для вирішення таких проблем при описанні стаціонарних та перехідних процесів при проектуванні конструкцій.

Математична модель установки для генерації компресійної піни створена таким чином, що вона є об'єднанням окремих блоків, кожний з яких являє собою автономну математичну модель зі своїми входом та виходом, за допомогою яких здійснюється взаємодія між блоками в процесі виконання загальної задачі моделювання:

- блоку подачі газу (БПГ);
- блоку подачі суміші води та піноутворювача (БПВП);
- блоку піногенеруючої вставки (БПВ);
- блоку вихідного сопла (БВС).

---

<sup>555</sup> Jing-yuan C. (2014). Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel, 44-56.

<sup>556</sup> Kamlyuk A. (2017). Tusheniya pozharov penogeneriruyuschimi sistemami so szhatyim vozduhom. 44-53.

<sup>557</sup> Fadyaev V. D. (2017). Primenenie kompressionnoy penyі v nasosno-rukavnyih sistemah pri tushenii pozharov elektrooborudovaniya pod napryazhenim.

<sup>558</sup> Feng D. (2013). Analysis on Influencing Factors of the Gas-liquid Mixing Effect of Compressed Air Foam Systems, 105-111.

Ці окремі блоки можна змінювати відповідно до змін конструкції установки, залишаючи тільки сталю зовнішню оболонку (кількість входів, виходів, розмірність) окремого блока.

В математичному сенсі ця математична модель є еволюційна система диференційно-алгебраїчних рівнянь, що виконує задачу опису перехідного процесу (для певних заданих параметрів) при подачі тиску на вхідний отвір 2 установки на Рисунку 6.

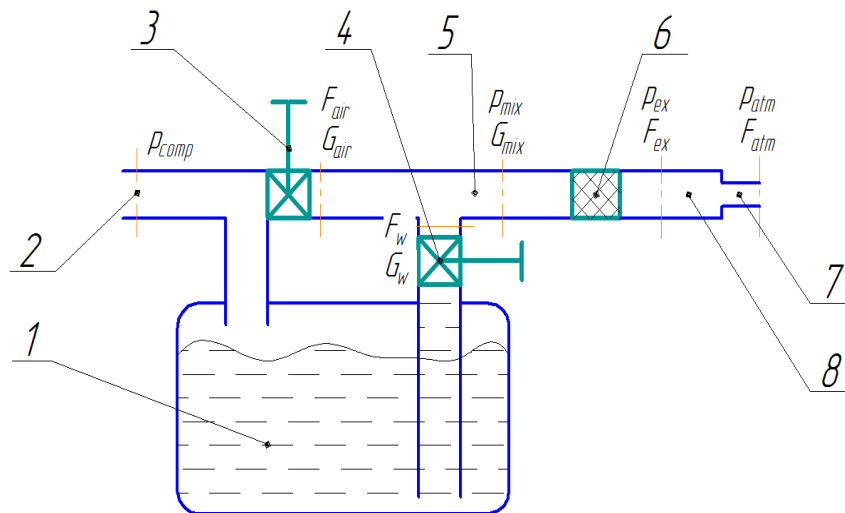


Рис. 6. Функціонально-фізична схема установки для генерації компресійної піни: 1 – ємність з сумішшю, 2 – вхід для високого тиску, 3 – дросель газовий, 4 – дросель рідинній, 5 – камера змішування, 6 – піногенеруюча вставка, 7 – вихідне сопло, 8 – передкамера.

Проведемо моделювання кожного з функціональних блоків УКП.

Вхідними параметрами для блоку подачі газу є:

- $p_{comp}$  – тиск на вході 2 рис. 6 в УКП, Па;
- $p_{mix}$  – тиск у камері змішування, 5 рис. 6, Па;
- $d_a$  – діаметр отвору сопла подачі газу, м.
- $T$  – температура гальмування газу, К
- $\kappa, R_{air}$  – характерні сталі для обраного робочого газу, Дж/(кг·К).

Вихідним параметром є:

- $G_a$  – потік газу (масової витрати) через отвір сопла подачі газу, кг/с.

Тобто алгоритм обчислення потоку газу (масової витрати), що реалізує роботу блоку подачі газу має вид

$$G_a = G_a(d_a, p_{comp}, p_{mix}, \kappa, R_{air}, T). \quad (1)$$

Для вирішення задачі моделювання блоку подачі газу використаний метод гідродинамічних функцій.<sup>559</sup> Потік газу (масова витрата) через сопло, що утворюється при дроселюванні буде обчислюватися за формулою:

<sup>559</sup> Abramovich G. (1976). Prikladnaya gazovaya dinamika, 600.

$$G_a = \frac{\pi \cdot d_{air}^2 \cdot m_{const} \cdot p_{comp} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}}{4 \cdot \sqrt{T}}, \text{ кг/с}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – приведена швидкість газу;  $T$  – температура гальмування газу, К;  $m_{const}$  – характерна стала для газу.<sup>560</sup>

Для блоку подачі суміші води та піноутворювача вхідними параметрами є:

- $p_{comp}$  – тиск в ємності суміші 1 Рис. 6, Па;
- $p_{mix}$  – тиск у камері змішування 5 Рис. 6, Па;
- $d_w$  – діаметр отвору сопла подачі суміші, м.

Вихідними даними є:

- $G$  – потік суміші (масової витрати) через отвір сопла подачі, кг/с.

Алгоритм обчислення цього блоку:

$$G_w = G_w(\rho_w, d_w, p_{comp}, p_{mix}), \text{ кг/с}. \quad (3)$$

Виходячи з рівності потенційної енергії тиску в ємності суміші 1 Рис. 6 та кінетичної енергії струменя води, що виходить з рідинного дроселя, 4 Рис. 6, напишемо рівняння:

$$v_w = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_{comp} - p_{mix})}{\rho_w}}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

де  $\rho_w$  – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м<sup>3</sup>.

Тоді потік суміші води з піноутворювачем можна обчислити за формулою:

$$G_w = \frac{\pi}{4} \cdot v_w \cdot \rho_w \cdot d_w^2, \text{ кг/с}. \quad (5)$$

Розглядаючи блок піногенеруючої вставки, позначимо його вхідні параметри:

- $p_{mix}$  – тиск на вході 2 рис. 6, в установку, Па;
- $p_{ex}$  – тиск у камері змішування 5 рис. 6, Па;
- $d_{ex}$  – діаметр отвору виходу суміші газу та рідини (води та піноутворювача), м;
- $T$  – температура гальмування газу, К;
- $\kappa, R_{air}$  – характерні сталі для обраного робочого газу, Дж/(кг·К);
- $k_m$  – кратність одержаної піни;
- $\varepsilon_{gr}$  – порозність пористого тіла;
- $d_{gr}$  – середня товщина стінки пористого тіла, м;
- $D_{gr}$  – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- $H_{gr}$  – довжина піногенеруючої вставки, м;

Вихідним параметром є:

- $G$  – потік суміші газу та рідини (масової витрати) у передкамеру 8 рис. 6, кг/с.

Виходячи з фізики процесів, прийняте допущення, при якому піногенеруюча вставка розглядається як осесиметричне пористе тіло з одновимірною течією газу. Тоді, згідно з<sup>561</sup>:

<sup>560</sup> Там само.

<sup>561</sup> Kutateladze S. (1976). *Gidrodinamika gazozhidkostnyih sistem*, 143.

$$dp(h) = \frac{\lambda_{fr}(p) \cdot \rho_{mix}(p) \cdot \omega_e^2(p)}{2 \cdot D_{eff}(\varepsilon)} \cdot dh, \text{ Па}, \quad (6)$$

де  $dp(h)$  – диференціал тиску як функція координати вздовж осі тіла, Па;  $dh$  – диференціал координати вздовж осі тіла, м;  $\lambda_{fr}(p)$  – коефіцієнт аеродинамічного опору;  $\rho_{mix}(p)$  – густина суміші газу та рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega_e(p)$  – швидкість руху суміші газу та рідини у мікроканалах тіла, м/с;  $D_{eff}(\varepsilon)$  – ефективний діаметр тіла, м.

Під час проходження потоку через цей блок відбувається активне перемішування та контактування всіх фаз, що формують газорідинну суміш. Внаслідок більш значної витрати по масі води (при типових значеннях кратності), встигає відбутися обмін тепла між окремими фазами. Тому даний процес вважаємо ізотермічним термодинамічним процесом, тоді, з урахуванням перетворень, отримаємо:

$$\rho_{mix}(p) = \frac{G_a + G_w}{\frac{G_a}{\rho_{air\_NC} \cdot \frac{p}{p_a}} + \frac{G_w}{\rho_w}} = \frac{\rho_{air\_NC} + \frac{\rho_w}{k_m - 1}}{\frac{p_{NC}}{p} + \frac{1}{k_m - 1}}, \quad (7)$$

де  $G_a, G_w$  – масова витрата газу та суміші води з піноутворювачем, відповідно, кг/с;  $\rho_{air\_NC}$  – густина робочого газу при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>;  $p_{NC}$  – нормальний атмосферний тиск, Па;  $\rho_w$  – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м<sup>3</sup>;  $k_m$  – кратність отриманої піни.

Вважаючи, що динамічна в'язкість суміші газу та рідини пропорційна об'ємним долям компонентів, а також те, що суміш знаходиться в умовах ізотермічного процесу, отримаємо формулу залежності в'язкості суміші газу та рідини від тиску:

$$\mu(p) = \frac{\mu_{air\_NC} \cdot k_m \cdot V_w \cdot \left(\frac{p_a}{p}\right) + \mu_w \cdot V_w}{V_w + k_m \cdot V_w \cdot \left(\frac{p_a}{p}\right)} = \frac{\mu_{air\_NC} \cdot k_m \cdot \left(\frac{p_a}{p}\right) + \mu_w}{1 + k_m \cdot \left(\frac{p_a}{p}\right)}, \quad (8)$$

де  $\mu_{air\_NC}$  – динамічна в'язкість робочого газу при нормальних умовах, Па·с;  $\mu_w$  – динамічна в'язкість суміші води з піноутворювачем, Па·с.

Використовуючи формули <sup>562</sup> для визначення  $\omega_e(p)$  – швидкості руху суміші газу та рідини у мікроканалах тіла і  $\lambda_{fr}(p)$  – коефіцієнта аеродинамічного опору, виконавши відповідні підстановки у формулу (6) та вирішуючи це диференціальне рівняння методом розділення змінних ( $p$  та  $h$ ) отримаємо:

$$0.113 \cdot d_{ch}^{\frac{1}{4}} \cdot D_{gr}^{4\frac{1}{2}} \cdot \varepsilon^{2\frac{1}{4}} \cdot \left(\rho_{air\_NC} + \frac{\rho_w}{k_m - 1}\right) \times \\ \times \int_{p_{ex}}^{p_{mix}} \frac{1}{\frac{p_a}{p} + \frac{1}{k_m - 1}} \cdot \left(\frac{1 + k_m \cdot \left(\frac{p_a}{p}\right)}{\mu_a \cdot k_m \cdot \left(\frac{p_a}{p}\right) + \mu_w}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot dp = B, \quad (9)$$

де  $H$  – довжина піногенеруючої вставки, м;  $B$  – проміжна змінна величина.

<sup>562</sup> Planovskiy A. (1961). Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologi, 848.

При цьому

$$B = \int_0^H G^{1\frac{3}{4}} \cdot dh = G^{1\frac{3}{4}} \cdot H. \quad (10)$$

Тоді

$$G = \left[ \frac{1}{H} \cdot 0.113 \cdot d_{ch}^{\frac{1}{4}} \cdot D_{gr}^{4\frac{1}{2}} \cdot \varepsilon^{2\frac{1}{4}} \cdot \left( \rho_{air\_NC} + \frac{\rho_w}{k_m - 1} \right) \times \right. \\ \left. \times \int_{p_{ex}}^{p_{mix}} \frac{1}{\frac{p_a}{p} + \frac{1}{k_m - 1}} \cdot \left( \frac{1 + k_m \cdot \left( \frac{p_a}{p} \right)}{\mu_a \cdot k_m \cdot \left( \frac{p_a}{p} \right) + \mu_w} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot dp \right]^{\frac{4}{7}}, \text{ кг/с.} \quad (11)$$

В результаті отримано алгоритм обчислення потоку газо-рідинної суміші (масової витрати), що реалізує роботу блоку подачі газу:

$$G = G(p_{mix}, p_{ex}, k, k_m, D_{gr}, \varepsilon, \mu_a, \mu_w, H). \quad (12)$$

Щодо блоку вихідного сопла, то його вхідними параметрами є

- $p_{ex}$  – тиск на вході, у передкамері 8 рис. 6, в сопло, Па;
- $p_a$  – статичний тиск навколишнього середовища, 0,1 МПа;
- $d_j$  – діаметр отвору сопла, м.
- $\kappa$ ,  $R_{air}$  – характерні сталі для обраного робочого газу (показник адіабати та газова стала для повітря), Дж/(кг·К)..

Вихідними даними є:

- $G$  – потік суміші газу та рідини (масової витрати) через отвір сопла, кг/с.

Процес руху суміші газу та рідини (стискаєма рідина) вздовж сопла є швидкоплинним процесом, тому можна вважати, що не встигає відбутися обмін тепла між окремими фазами, тому даний процес вважаємо адіабатним термодинамічним процесом для газової фази.

Згідно рівняння Бернуллі<sup>563</sup>:

$$\int_{p_{ex}}^{p_a} \frac{1}{\rho_{mix}(p)} dp = \frac{\omega_{ex}^2 - \omega_{atm}^2}{2}, \quad (13)$$

де  $p_{ex}$  – тиск у передкамері 8 рис. 1, Па;  $p_a$  – нормальний атмосферний тиск на виході з сопла, Па;  $\omega_{ex}$ ,  $\omega_{atm}$  – швидкості на вході та виході сопла, м/с,

Маючи на увазі, що:

$$G = \omega_{ex} \cdot \rho_{mix}(p_{ex}) \cdot F_{ex} = \omega_{atm} \cdot \rho_{mix}(p_a) \cdot F_{atm}, \text{ кг/с,} \quad (14)$$

<sup>563</sup> Abramovich G. (1976). Prikladnaya gazovaya dinamika, 600.

де  $F_{ex}$ ,  $F_{atm}$  – площа перерізу на вході та виході сопла, м<sup>2</sup>, та вирішуючи рівняння (13) та (14) з урахуванням прийнятих припущень, отримуємо величину потоку суміші газу та рідини (масової витрати)  $G$  через отвір сопла:

$$G = \left[ \frac{\left( -k \cdot p_a^{\frac{1}{k}} \cdot (k_m - 1) \cdot p_{ex}^{\frac{k-1}{k}} + (k_m \cdot p_a - p_{ex}) \cdot k + p_{ex} - p_a \right)}{(k-1) \cdot \left( k_m^2 \cdot F_{ex}^2 - \left( F_{atm} \cdot (k_m - 1) \cdot \left( \frac{p_a}{p_{ex}} \right)^{\frac{1}{k}} + F_{atm} \right)^2 \right)} \times \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ кг/с.} \quad (15)$$

$$\times (\rho_{air\_NC} \cdot k_m + \rho_w - \rho_{air\_NC}) \cdot F_{ex} \cdot F_{atm}$$

В результаті отримано алгоритм обчислення потоку суміші газу та рідини (масової витрати), що реалізує роботу блоку вихідного сопла:

$$G = G(p_{ex}, k, k_m, F_{ex}, F_{atm}), \text{ кг/с.} \quad (16)$$

Для проведення розрахунків за допомогою розробленої математичної моделі, з урахуванням перехідних процесів та контролю помилки, розгляд яких виходить за межі даної статті, необхідно задати вхідні параметри. Вони задаються довільно, та для отримання бажаних вихідних параметрів установки, підбираються шляхом ітерацій. У випадку незадовільної точності необхідно збільшувати значення “Simulation Stop Time” (панель інструментів).

Початковими умовами для змінних величин є:

$p_{mix} = 0,1$  МПа;

$p_{ex} = 0,1$  МПа.

Вхідні параметри:

$p_{comp}$  – тиск компресора, МПа,

$d_a$  – діаметр отвору сопла подачі газу, м.

$d_w$  – діаметр отвору сопла подачі суміші, м.

$\epsilon_{gr}$  – порозність пористого тіла;

$d_{gr}$  – середня товщина стінки пористого тіла, м;

$D_{gr}$  – діаметр піногенеруючої вставки, м;

$H_{gr}$  – довжина піногенеруючої вставки, м;

$d_j$  – діаметр отвору сопла, м.

Вихідні параметри:

$G_a$  – потік (масова витрата) газу через вихідний отвір сопла установки (в суміші), кг/с,

$G_w$  – потік (масова витрата) суміші води та піноутворювача через вихідний отвір сопла установки (в суміші), кг/с,

$G$  – потік (масова витрата) суміші газу та рідини (масової витрати) через отвір сопла, кг/с,

$k_m$  – кратність піни,

$Error$  – величина відносної помилки ММ при обчисленні вихідних параметрів.

Найбільш важливим результатом розробки математичної моделі установки для генерації компресійної піни є можливість проведення технічного розрахунку її параметрів з урахуванням потреб. Авторами проведено відповідні оцінкові розрахунки, результати яких наведено в Табл. 1.

Таблиця 1. Результати чисельного моделювання роботи установки для генерації компресійної піни

$P_{comp}$ , МПа	$P_{mix}$ , МПа	$P_{ex}$ , МПа	$d_w$ , $10^{-3}$ м	$d_a$ , $10^{-3}$ м	$d_j$ , $10^{-3}$ м	$k_m$	Витрата суміші води та ПУ $Q_w$ , л/с	Витрата повітря $Q_a$ , л/с	Час спорожнення газового балону 7 л $t_a$ , хв	Необхідна ємність суміші води та ПУ $V_w$ , л
Піногенератор: e_gr=0.25-D25-L80										
0,6	0,58	2,3	4,6	5	8	82	0,12	9,95	2,2	7,2
0,6	0,58	2,3	5	5	8	82	0,13	9,1	2,4	7,8
0,8	0,78	2,9	5	5	8	81	0,15	12,4	1,7	9
0,8	0,76	2,9	5	4	8	51	0,19	9,7	2,35	11,4
Піногенератор: e_gr=0.25-D25-L60										
0,8	0,8	2,4	8	9	10	104	0,17	18	1,3	10,2
0,8	0,8	2,4	9	9	10	82	0,2	16	1,5	11,4
0,8	0,8	2,4	12	9	10	47	0,26	12	2	17
0,8	0,8	2,4	15	9	10	30	0,33	10	2,4	18,3
Піногенератор: e_gr=0.25-D25-L120										
0,8	0,8	1,7	20	7	10	11	0,4	4,1	5,7	99,1
0,8	0,8	1,7	15	7	10	19	0,3	5,4	4,3	65
0,8	0,8	1,7	12	7	10	29	0,25	6,7	3,5	52
0,8	0,8	1,8	8	7	10	63	0,16	10	2,4	18,3

Оцінюючи результати розрахунків, можна зробити висновки, що розроблена математична модель УКП дозволяє розв'язувати наступні прикладні та наукові завдання:

- 1) проводити розрахунки параметрів УКП в залежності від очікуваного часу її роботи, що визначається особливостями гасіння різних видів пожеж;
- 2) проводити розрахунки параметрів УКП в залежності від кратності компресійної піни, яку необхідно отримати;
- 3) досліджувати вплив параметрів піногенеруючої вставки УКП на кратність компресійної піни.

*Висновки.* Таким чином, математична модель УКП може використовуватись під час проектування технічних параметрів ситсем подачі компресійної піни для гасіння пожеж різних класів генерації компресійної впливу фізичних параметрів установки на якість компресійної піни. Проведено оцінкові розрахунки параметрів установки для генерації компресійної піни з використанням розробленої математичної моделі. Отримані результати можуть бути використані проектувальниками при розробці промислових зразків установок для генерації вогнегасної компресійної піни на території України для їх подальшого впровадження в підрозділах ДСНС.

#### Література:

1. Korolchenko A. Y., Korolchenko D. A. (2004). Pozhezhovybukhonebezpeka rehovyn i materialiv ta zasoby yikh hasinnia. Dovidnyk, Pozhnauka, 747.
2. Terebnev V. V. (2004) Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi. Taktychni mozhlyvosti pozheznykh pidrozdiliv. Pozhnauka, 248.
3. LaPolla J. A., Morano A. L. (2012). Compressed Air Foam Fire Grounds Evolution Tests. California Polytechnic State University.
4. Li Huiqing. (2000). Experimental study of foam generated by compressed air foam system. Beijing Forestry University, 105-111
5. Taylor R. G. (1998). Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions. Technical report 98. Morristown Fire Bureau, New Jersey, 75-112.



6. Murdock, J. I. (1997). Compressed air foam systems: A project pertaining to an adoption decision. Executive Development Research Paper. Emmitsburg, MD, National Fire Academy.
7. Colletti D. J. (1994). Testing CAFS in live burns Fire Engineering, 147, 74-76.
8. Hrytsyna I. M., Lievtierov O. A. (2016). Skhema otrymannia kompresiinoi piny ta dysperhovanoi vodi. Problemy pozharnoi bezopasnosti, 39, 78-83.
9. Tytarenko A. V. (2015). Hazonapovnena pina – efektyvnyi zasib pozhezhohasinnia lisovykh pozhezh. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 25 (9), 246-250.
10. Michael A. (2002). U.S. Patent No. 6357532 B1. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
11. Belova A. (2009). Narod, kotoryi yzobrel porokh, znaet, kak borotsia s ohne. Pozharnoe delo, 5, 18-19.
12. Oneseven. Retrieved from: <http://www.oneseven.com>.
13. Systeme, einfach, sicher und okonomisch. Retrieved from: <http://www.oneseven.com/de/stationaer-brandschutz/systeme/standard-system/beschreibung.php>.
14. Systeme, Oneseven Retrieved from: <http://www.oneseven.com/de/stationaer-brandschutz/systeme.php>.
15. Firefighting Vehicles. Gimaex. Retrieved from: <http://www.gimaex.com/?Mod1=artikel&MenuID=8&MainMenuID=2&Sprache=GB>.
16. Opytanye tekhnolohyy NATISK. (2011). Retrieved from: <http://www.specialauto.ru/catalog/524.html>.
17. Zalesov S. V., Hodovalov H. A., Krektunov A. A., Opletaev A. S. (2014). Novi sposob sozdaniya zahradytelnykh y opornykh protyvopozharnykh polos. Vestnyk Bashkyrskoho hosudarstvennogo ahrarnoho unyversyteta. 3, 90-94.
18. Zalesov S. V., Hodovalov H. A., (2014). Systema pozharotusheniya NATISK dlia ostanovky y lokalyzatsyy lesnykh pozharov. Sovremennye problemy nauky y obrazovaniya, 3.
19. Zalesov S. V., Hodovalov H. A., Krektunov A. A. (2016). Yspolzovanye systemy pozharotusheniya NATISK pry lykvydatsyy torfianykh pozharov. Lesa Rossyy y khoziaistvo v nykh, 1 (56), 4-10.
20. Dong-Ho R., Jang-Won L., Seonwoong K. (2016). Class B Fire-Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Differen Air-to-Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. Applied Science, 6 (191), 2-12. doi: 10.3390/app6070191.
21. Crampton G., Kim A. (2007). Comprasion of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Sopution. Research Report, 147, 1-25.
22. Jing-yuan C., Mao X. (2014). Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. Procedia Engineering, 71, 44 – 56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.007>.
23. Kamlyuk A., Navrotskiy O., Grachulin A. (2017). Tusheniya pozharov penogeneriryuschimi sistemami so szhatyim vozduhom. Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchityi MChS Belarusi, 1, 1, 44-53.
24. Fadyaev V. D. (2017). Primenenie kompressionnoy penyi v nasosno-rukavnyih sistemah pri tushenii pozharov elektrooborudovaniya pod napryazhenim. Dis. kandidata teh. nauk: 05.26.03. M.: 158.
25. Feng D. (2013). Analysis on Influencing Factors of the Gas-liquid Mixing Effect of Compressed Air Foam Systems. Procedia Engineering, 52, 105-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.113>.
26. Abramovich G. (1976). Prikladnaya gazovaya dinamika, 600.
27. Kutateladze S., Styirikovich M. (1976). Gidrodinamika gazozhidkostnyih sistem, 143.
28. Planovskiy A., Ramm V., Kagan S. (1961). Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii, 848.