

PACS numbers: 81.05.Zx, 81.07.Wx, 81.16.Dn, 82.30.Lp, 82.33.Vx, 82.70.Dd, 82.70.Uv

«Суховодяні» вогнегасні порошки з Натрію бікарбонатом

В. В. Гончарук, А. С. Макаров, Л. В. Дубровіна, І. М. Косигіна,
І. М. Кручко

*Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 42,
03142 Київ, Україна*

До нових ефективних і безпечних засобів пожежогасіння можна віднести появу в останнє десятиліття «суховодяних» вогнегасних матеріалів. Щоб поліпшити вогнегасні властивості «сухої» води, в цій статті було вивчено вплив способів змішування гідрофобного метилкремнезему АМ-1-300 (Україна) з водою та добавкою бікарбонату Натрію (харчова сода) різної концентрації на текстуру та властивості одержуваного «суховодяного» порошку. «Суховодяний» вогнегасний порошок одержували змішуванням компонентів за швидкості 15000 об/хв. упродовж 10 с. Було виготовлено зразки, що містять 10 мас.% метилкремнезему, 2, 4, 6 та 8 мас.% бікарбонату Натрію та відповідну кількість води. З додаванням 2 і 4 мас.% NaHCO_3 в попередньо приготовлену «суху» воду утворюється кремоподібний матеріал; за концентрації у 6 і 8 мас.% спостерігається розшарування на дві фази — суспензію метилкремнезему у воді та водяний розчин бікарбонату Натрію. З додаванням до метилкремнезему водяного розчину NaHCO_3 з концентрацією у 2, 4 та 6 мас.% також відбувається розшарування на дві фази. За концентрації водяного розчину NaHCO_3 у 8 мас.% утворюється вологий грубодисперсний порошок. За одночасного змішування всіх компонентів утворюється «суховодяний» порошок. Насипна густина становить 0,321, 0,299, 0,276 і 0,271 г/см³ для зразків з 2, 4, 6 та 8 мас.% бікарбонату Натрію відповідно. Методом оптичної мікроскопії показано, що у частинок «суховодяного» порошку чітко простежується структура «ядро-оболонка». «Суховодяний» вогнегасний порошок є полідисперсною системою — більшість частинок є поодинокими дрібними частинками розміром у 1 мкм і менше; також є агломерати з розміром біля 2 мкм. Вогнегасні властивості одержаних «суховодяних» порошків вивчали під час розпорошення їх на шар палаючого бензину А-92 на поверхні води. Визначали час до повного гасіння вогню та витрати речовини на одиницю площі горіння. Встановлено, що час гасіння бензину та витрати «суховодяного» вогнегасного порошку на його гасіння зменшу-

ються з ростом концентрації NaHCO_3 і складають для 2, 4, 6 та 8 мас.%, відповідно, 5,2, 4,9, 4,3 і 3,8 с та 0,373, 0,370, 0,313 і 0,217 г/см³.

The emergence of new effective and safe fire extinguishing agents can be attributed to the appearance of dry water fire extinguishing materials in the last decade. In order to improve the fire extinguishing properties of dry water, the article studies the effects of both the method of mixing hydrophobic methyl silica AM-1-300 (Ukraine) with water and the addition of sodium bicarbonate (baking soda) of various concentrations on the texture and properties of the resulting dry water fire extinguishing powder. Dry water fire extinguishing powder is obtained by mixing the components at a speed of 15 000 rpm for 10 s. Samples containing 10 wt.% methyl silica, 2, 4, 6 and 8 wt.% sodium bicarbonate and the appropriate concentration of water are made. Adding 2 and 4 wt.% NaHCO_3 to preliminarily prepared dry water results in a cream-like material; at a concentration of 6 and 8 wt.%, the formation of a two-phase system of a suspension of methyl silica in water and an aqueous solution of sodium bicarbonate is observed. When adding to methyl silica an aqueous solution of NaHCO_3 with a concentration of 2, 4 and 6 wt.%, separation into two phases is also observed; at a NaHCO_3 concentration of 8 wt.%, a wet coarse powder is formed. With the simultaneous mixing of all components, a dry water powder is obtained. The bulk density is of 0.321, 0.299, 0.276 and 0.271 g/cm³ for samples with 2, 4, 6 and 8 wt.% of sodium bicarbonate, respectively. Optical microscopy has shown that the particles of the dry water powder have a clearly visible 'core-shell' structure. Dry water fire extinguishing powder is a polydisperse system, i.e., most of the particles are single fine particles of 1 micron or less in size; there are also agglomerates of about 2 microns in size. The fire extinguishing properties of the obtained dry water powders are studied by spraying them onto a layer of burning gasoline A-92 on the water surface. The time to complete extinguishing of the fire and the consumption of the substance per unit area of burning are determined. As found out, the extinguishing time of gasoline and the consumption of dry water fire extinguishing powder for extinguishing it decrease with increasing NaHCO_3 concentration and, for 2, 4, 6, 8 wt.%, are of 5.2, 4.9, 4.3, 3.8 s and 0.373, 0.370, 0.313, 0.217 g/cm³, respectively.

Ключові слова: гідрофобний кремнезем, «суха» вода, Натрію бікарбонат, вогнегасні порошки, гасіння бензину.

Key words: hydrophobic silica, dry water, sodium bicarbonate, fire-extinguishing powders, extinguishing gasoline.

(Отримано 7 вересня 2023 р.)

1. ВСТУП

Проблеми, яких викликано пожежами, з кожним роком не зменшуються, а тільки зростають. Це зумовлено тим, що пожежі,

навіть якщо вони не загрожують життю та здоров'ю людини, призводять не тільки до матеріальних втрат, але і наносять величезну шкоду навколишньому середовищу. Причинами виникнення пожеж найчастіше є необережне використання вогню, недотримання правил експлуатації виробничого обладнання й електричних пристроїв, самозапалення речовин і матеріалів, розряди статичної електрики, грозові розряди, підпали та ін. [1]. Так, наприклад, кількість пожеж у Великобританії за 2022 рік у порівнянні з 2021 роком зросла на 24% [2]; середнє число пожеж там становить 3,14, а на Кіпрі — 8,19, в Україні — 2,08 і в Білорусі — 0,64 на 1000 осіб населення [3].

Вогнегасні речовини забезпечують не лише ефективне гасіння вогню, а й мінімізують наслідки пожежі; тому постійно ведуться роботи з розробки нових і вдосконалення вже наявних засобів пожежогасіння. До звичайних засобів пожежогасіння в основному належать вода (включаючи дрібнодисперсний водяний туман), інертні гази та сухі порошки. Хоча ці вогнегасні речовини застосовуються для гасіння різних реальних пожеж, вони мають свої недоліки.

Широке використання водяного туману сильно обмежено технологією його одержання та нестабільною вогнегасною дією. Сухі порошкові вогнегасні речовини мають недостатню здатність до охолодження та поганий захист від повторного займання.

В останні роки для модифікування вогнегасних матеріалів все частіше використовують нанотехнології — використовуються як нові нанорозмірні речовини, так і вже відомі [3–5].

«Суху» воду вперше одержали в другій половині ХХ століття [6], а термін «суха» вода запропонував Аллан у 1977 р. [7]. «Суха» вода утворюється з гідрофобного порошку пірогенного кремнезему та води фізичними методами і є утворенням типу ядро-оболонка із вмістом води до 97%. Кожна частинка порошку містить краплю води, оточену гідрофобним нанорозмірним Силіцію діоксидом, який запобігає об'єднанню крапель і зворотньому перетворенню їх на рідку фазу [8].

«Суха» вода не тільки поєднує в собі чистоту й екологічність водяного туману, але також має властивості сухого порошку. Розмір частинок «сухої» води такий самий, як у водяного туману, але вони можуть зберігатися, транспортуватися та застосовуватися у вигляді сухого порошку.

Процес виробництва сухої води простий і дешевий, що забезпечує міцну основу великомасштабного промислового виробництва її. «Сухоходячий» порошок матиме нові характеристики після додавання модифікаторів, тому що без додавання протипожежних компонентів «суха» вода має тільки охолоджувальний ефект рідкої води, а піролізи та інгібування не має. В останні роки

«суховодяні» вогнегасні речовини з добавками солей-антипіренів викликають все більший інтерес і увагу дослідників. Крім того, внаслідок своєї гідрофобності «суховодяні» засоби пожежогасіння не тонуть; тому можна ефективно використовувати їх для гасіння горючих рідин на поверхні води [9–12].

Одним з антипіренів є Натрію бікарбонат (харчова сода). Ця біла негорюча сполука широко використовується у пожежній справі — сода є основним інгредієнтом сухих вогнегасників і ручних універсальних вогнегасників, яких призначено для гасіння різноманітних пожеж транспортних засобів, а також у житлових будинках та офісах [13, 14].

Метою даної роботи було вивчення умов одержання «суховодяних» вогнегасних порошків на основі пірогенного гідрофобного метилкремнезему з Натрію бікарбонатом та їхніх вогнегасних властивостей щодо гасіння бензину на поверхні води.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Матеріали. Для одержання «суховодяних» вогнегасних порошків використовували дистильовану воду, Натрію бікарбонат (харчову соду) та пірогенний гідрофобний Силіцію діоксид марки АМ-1-300 (метилкремнезем; Калуш, Україна) ($S_{\text{пит}} = 260 \pm 30 \text{ м}^2/\text{г}$, розмір частинок — 5–7 нм) — це Силіцію діоксид А-300, модифікований метильними групами. Для визначення вогнегасних властивостей «суховодяних» порошків використовували бензин А-92.

Методика одержання «суховодяних» вогнегасних порошків. «Суходовяні» вогнегасні порошки одержували змішуванням вихідних компонентів у міксері Hamilton Beach commercial за швидкості у 15000 об/хв. упродовж 10 с.

Було виготовлено зразки, що містять 10 мас.% метилкремнезему, 2, 4, 6 і 8 мас.% Натрію бікарбонату та відповідну кількість води ($10\text{AM}/88\text{H}_2\text{O}/2\text{NaHCO}_3$, $10\text{AM}/86\text{H}_2\text{O}/4\text{NaHCO}_3$, $10\text{AM}/84\text{H}_2\text{O}/6\text{NaHCO}_3$, $10\text{AM}/82\text{H}_2\text{O}/8\text{NaHCO}_3$).

Методи дослідження структури та властивостей «суховодяних» вогнегасних порошків. Насипну густину визначали по відношенню маси вільно засипаного порошку до об'єму цього порошку. Мікрофотографії «суховодяних» порошків одержували за допомогою оптичного мікроскопа Laboval 4.

Тестування вогнегасних властивостей «суховодяних» порошків проводили по гасінню 15 мл бензину А-92, який заливався у керамічне деко поверх шару води, як і у дослідях з гасіння пожежі класу В [15].

Розпорошування «суховодяного» вогнегасного порошку на палаючий вогонь проводили за допомогою модифікованого пристрою, який описано у [16].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Зовнішній вигляд (текстура) та властивості кінцевого продукту, який утворюється через змішування певної кількості пірогенного кремнезему з водою, залежать від співвідношення енергії взаємодії твердої та рідкої фаз за змочування та занурення твердих частинок у рідину під час процесу змішування. Схему утворення кінцевого продукту представлено у [8].

Факторами, що впливають на одержання «сухої» води, є швидкість перемішування, масове співвідношення твердої та рідкої фаз, час перемішування та концентрація добавок. Гідрофобні наночастинки пірогенного кремнезему не поєднуються з водою через свою гідрофобність. За швидкого перемішування суміші компонентів відбувається руйнування наявної системи водневих зв'язків у воді та залучення туди бульбашок повітря. Поверхневий шар води на межі з повітрям різко відрізняється від об'єму. Зміна структури води відбувається з величезною швидкістю: час релаксації за організації води в нанокластері становить $\approx 10^{-9}$ – 10^{-11} с, а утворення мезополостей у воді на межі з повітрям — $\approx 10^{-8}$ – 10^{-12} с [17–20]. З іншого боку, відбувається механоактивація кремнезему, тобто у пірогенному Силіцію діоксиді руйнуються агломерати й агрегати до вихідних нанорозмірних частинок кремнезему. У місцях зруйнованих контактів ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ містки) між первинними наночастинками кремнезему утворюються гідрофільні островці на їхній поверхні. Також на поверхні частинок гідрофобного кремнезему присутні залишкові ОН-групи, які не були промодифіковані. Внаслідок таких явищ стає можливою адсорбція молекул води на поверхні кремнезему [19].

В результаті перемішування суміші вихідних компонентів утворюється водоповітряна суміш піни, газових емульсій і туману з твердими механоактивованими гідрофобними частинками пірогенного кремнезему. Залежно від співвідношення величин зсувних зусиль (перемішування) і поверхневого натягу можна виділити кілька варіантів завершення процесу змішування компонентів [8].

1. Можна припустити, що під час перемішування частина енергії, що розсіюється в системі, витрачається на поділ рідини на дрібні краплі, а надлишок її витрачається на занурення гідрофобних частинок у рідку фазу. Якщо енергія, яка передається частинкам під час перемішування нижче за енергію занурення, вода та кремнезем залишаються незмішаними, і в системі сформуються після коалесценції дві окремі фази.

2. Якщо енергія, яка передається в систему під час перемішування, буде достатньо великою, щоб розбити рідину на краплі та завантажити в них частинки кремнезему, буде сформовано мус

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив порядку змішування та концентрації компонентів «суховодяних» вогнегасних порошків на їхню текстуру.¹

№ п/р	Порядок змішування компонентів «суховодяних» вогнегасних порошків	Текстура «суховодяних» вогнегасних порошків
10АМ/88Н₂О/2NaHCO₃		
1	«суха» вода + NaHCO ₃	неоднорідний порошок з включенням кремоподібних частинок розміром у 5–8 мм
2	діоксид Силіцію АМ-1-300 + водяний розчин NaHCO ₃	розшарування на суспензію діоксиду Силіцію у воді та шар водяного розчину NaHCO ₃
3	діоксид Силіцію АМ-300 + вода + NaHCO ₃	порошок
10АМ/86Н₂О/4NaHCO₃		
4	«суха» вода + NaHCO ₃	кремоподібна маса
5	діоксид Силіцію АМ-1-300 + водяний розчин NaHCO ₃	розшарування на суспензію діоксиду Силіцію у воді та шар водяного розчину NaHCO ₃
6	діоксид Силіцію АМ-1-300 + вода + NaHCO ₃	порошок
10АМ/84Н₂О/6NaHCO₃		
7	«суха» вода + NaHCO ₃	розшарування на суспензію діоксиду Силіцію у воді та шар водяного розчину NaHCO ₃
8	діоксид Силіцію АМ-1-300 + водяний розчин NaHCO ₃	розшарування на суспензію діоксиду Силіцію у воді та шар водяного розчину NaHCO ₃
9	діоксид Силіцію АМ-1-300 + вода + NaHCO ₃	порошок
10АМ/82Н₂О/8NaHCO₃		
10	«суха» вода + NaHCO ₃	розшарування на суспензію діоксиду Силіцію у воді та шар водяного розчину NaHCO ₃
11	діоксид Силіцію АМ-1-300 + водяний розчин NaHCO ₃	скупчення вологих частинок розміром біля 2–3 мм, які достатньо міцно зчеплені проміж собою
12	діоксид Силіцію АМ-1-300 + вода + NaHCO ₃	порошок

(кремоподібну масу).

3. Нарешті, якщо енергія, що передається системі, є достатньо великою для поділу рідини на краплі, але не перевищує енергію

занурення, тоді тверді частинки прилипатимуть до поверхні крапель і буде одержано «суху» воду, тобто відбудеться перехід від піни та/або газової емульсії до «сухої» води (відбудеться інверсія фаз у стабілізованих твердими гідрофобними частинками систем повітря-у-воді до порошків вода-у-повітрі). Водночас, бульбашки повітря виділяються у навколишнє середовище [20–21].

У таблиці 1 наведено результати стосовно впливу на текстуру вогнегасних «суховодяних» порошків концентрації та порядку змішування вихідних компонентів. Як видно із табл. 1, порошок утворюється лише за одночасного змішування вихідних компонентів.

У роботах [13, 14,] «суховодяний» порошок з домішкою Натрію бікарбонату було одержано за змішування супергідрофобного пірогенного кремнезему R812s, модифікатором якого був гексаметилдісилазан. У роботі [13] вогнегасний порошок одержували додаванням NaHCO_3 у заздалегідь приготовлену «суху» воду та ще раз перемішували, а у роботі [14] використовували водяні розчини NaHCO_3 відповідної концентрації. Одержані нами результати (табл. 1) можна пояснити тим, що ми використовували менш гідрофобний Силіцію діоксид марки АМ-1-300 (метилкремнезем), який мабуть не утворює такої міцної оболонки для крапель води, як кремнезем R812s.

Натрію бікарбонат має абразивні властивості та твердість за Моосом 2,5–3, тобто за перемішування з «сухою» водою він руйнує її частинки. Звільнені частинки кремнезему можуть повністю зануритися у воду з утворенням кремоподібної маси (мусу) (зразки 1, 4; табл. 1). Збільшення концентрації NaHCO_3 приводить до розшарування суміші на дві фази (зразок 10; табл. 1). Якщо використовували водяні розчини NaHCO_3 , то під впливом йонів Na^+ і HCO_3^- змінюється ξ -потенціал поверхні кремнезему; крім того, присутність солі збільшує в'язкість водяної фази та поверхневий натяг; тому можливі різноманітні варіанти у текстурі кінцевого продукту. За наших умов змішування компонентів відбулося розшарування суміші на дві фази (зразки 2, 5, 8; табл. 1) і тільки за концентрації NaHCO_3 у 8 мас.% відбулось утворення вологих частинок розміром біля 2–3 мм, які були достатньо міцно зчеплені між собою (зразок 11; табл. 1).

На рисунку 1 представлено фото та мікрофотографію свіжо-приготовленого «суховодяного» вогнегасного порошку. Видно, що він є полідисперсною системою та складається з неправильних і неоднорідних наночастинок розміром менше 1 мкм; також присутні агломерати розміром біля 2 мкм. У частинок «суховодяного» порошку хороша інкапсуляція краплин води та чітко простежується структура ядро-оболонка. Слід зазначити, що на структуру «суховодяного» порошку впливу Натрію бікарбонату

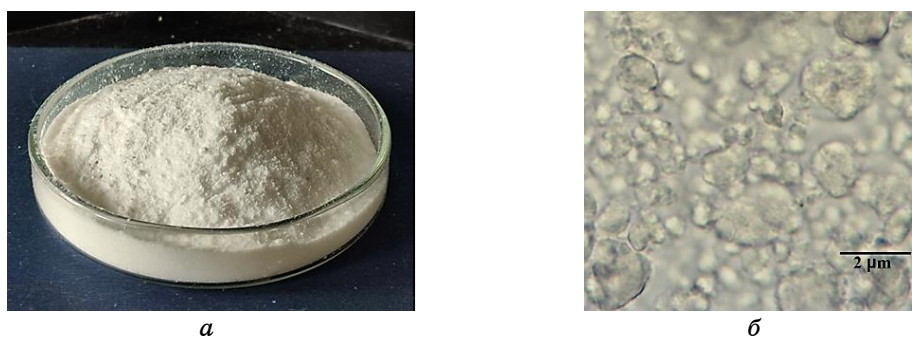


Рис. 1. Фото (а) та мікрофотографія «суховодяного» вогнегасного порошку (б), якого було одержано з води, гідрофобного метилкремнезему та Натрію бікарбонату (концентрація — 2 мас.%).²

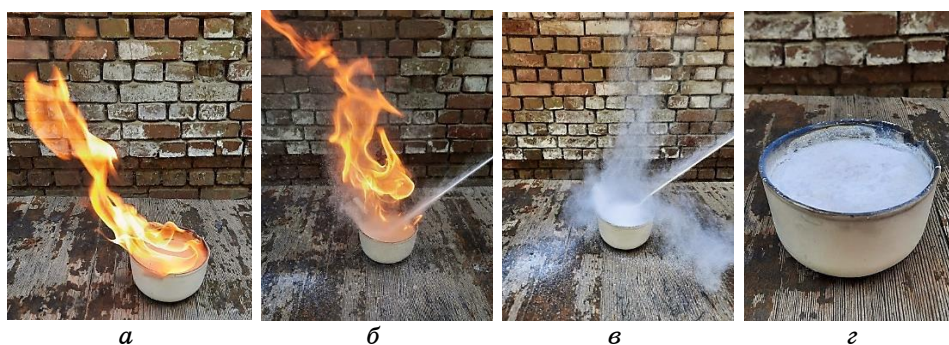


Рис. 2. Гасіння горіння бензину на поверхні води «суховодяним» вогнегасним порошком з Натрію бікарбонатом: а — горіння бензину; б, в — процес гасіння вогню; г — вогонь погашено.³

за різних досліджених концентрацій не відбулось, але дещо змінилось співвідношення дрібних і більш великих частинок.

На рисунку 2 представлено процес гасіння шару бензину на поверхні води одержаними у роботі «суховодяними» вогнегасними порошками. Видно, що під впливом потоку розпорошеного «суховодяного» порошку полум'я зменшується і поступово гасне.

Для випробування на вогнегасні властивості використовували зразки 1, 3, 6, 9, 11 і 12 (табл. 1). У таблиці 2 представлено властивості цих порошків. З таблиці 2 видно, що зі зростанням вмісту Натрію бікарбонату у «суховодяному» порошку зменшується як насипна густина, так і витрати порошку на гасіння бензину. Останній зразок у табл. 2, який відноситься до виготовлення порошку з використанням водяного розчину NaHCO_3 , також має непогані вогнегасні властивості, але вони значно гірші, ніж у

ТАБЛИЦЯ 2. Насипна густина і вогнегасні властивості «суховодяних» порошків з натрію бікарбонатом.⁴

Склад «суховодяного» порошку, %	Насипна густина, г/см ²	Час гасіння шару бензину на воді, с	Витрати «суховодяного» порошку на гасіння, г/см ²
10АМ/90 Н ₂ О	0,343	7,0	0,137
10АМ/88Н ₂ О/2NaHCO ₃	0,321	5,2	0,373
10АМ/86Н ₂ О/4 натрію бікарбонат	0,299	4,9	0,370
10АМ/84Н ₂ О/6NaHCO ₃	0,276	4,3	0,313
10АМ/82Н ₂ О/8NaHCO ₃	0,271	3,8	0,217
кремнію діоксид АМ-1-300 + водяний розчин NaHCO ₃ (концентрація NaHCO ₃ у зразку 8 мас.%)	0,320	4,4	0,362

зразка, якого було одержано за нашою технологією із таким же самим співвідношенням компонентів. Час гасіння бензину за додавання в «суху» воду Натрію бікарбонату є значно меншим, аніж у «суховодяного» порошку без домішок. Зменшення насипної густини у зразків зі збільшенням концентрації Натрію бікарбонату можна пояснити збільшенням долі більш великих частинок «суховодяного» порошку. Цією ж причиною пояснюється і зменшення витрат порошку на гасіння вогню.

4. ВИСНОВКИ

Показано, що в суміші нанорозмірного метилкремнезему, води та Натрію бікарбонату в залежності від способу високошвидкісного змішування компонентів, — одночасне змішування, додавання Натрію бікарбонату до заздалегідь приготовленої «сухої» води або змішування метилкремнезему з водяним розчином Натрію бікарбонату, — може утворитися «суховодяний» порошок, кремоподібна маса або двофазна суміш з водяної та суспензійної складових. «Суховодяний» порошок являє собою інкапсульовані у кремнеземі краплини водяного розчину Натрію бікарбонату. Встановлено, що у ньому чітко простежується структура ядро-оболонка; він є полідисперсною системою та складається з неправильних і неоднорідних наночастинок розміром менше 1 мкм; також присутні агломерати розміром біля 2 мкм.

Вивчення вогнегасних властивостей одержаного «суховодяного» порошку показало, що в залежності від концентрації Натрію

бікарбонату бензин на поверхні води гасне за 5,2–4,3 с, витрати на гасіння 1 см² площі пожежі складають від 0,373 до 0,217 г. Такі результати уможливають використовувати розроблені «суховодяні» порошки як екологічно безпечні для гасіння не тільки нафтопродуктів на поверхні водоймищ, а й для будь-яких інших пожеж.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. A. V. Antonov, V. O. Borovikov, V. P. Orel, V. M. Zhartovskij, and V. V. Kovalishin, *Vognegasni Rechovyny: Posibnik* [Fire Extinguishing Substances: Manual] (Kyiv: Pozhinformtekhnik: 2004) (in Ukrainian).
2. *Fire and Rescue Statistical Release* (Great Britain: Department for Communities and Local Government: 2020); <https://www.gov.uk/government/collections/fire-statistics-monitor> (accessed September 12, 2022).
3. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, and M. P. Grigoreva, *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*, 4: 5 (2022) (in Russian); <https://doi.org/10.25257/FE.2022.4.5-12>
4. Yu. A. Abramov and A. A. Kireev, *Geleobrazuyushchie Ognetushashchie i Ogneshchitnyye Sredstva Povyshennoy Ehffektivnosti Primenitelno k Pozharam Klassa A* [Gel-Forming Fire-Extinguishing and Fire-Retardant Agents of Increased Efficiency in Relation to Class A Fires] (Kharkiv: NUGZU: 2015) (in Russian).
5. N. M. Kozyar, *Pozhezhna Bezpeka*, 24: 79 (2014) (in Ukrainian).
6. D. Schutte, *Predominantly Aqueous Compositions in Fluffy Powdery Form Approximating Powdered Solids Behavior and Process for Forming Same* (Patent 3393155 US (1968)).
7. B. D. Allan, *Dry Water* (Patent 4008170 US (1977)).
8. K. Saleh, L. Forny, P. Guigon, and I. Pezron, *Chem. Eng. Res. Design.*, 89: No. 5: 537 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.06.005>
9. Y. Wang, G. Zhu, G. Chai, Y. Zhou, C. Chen, and W. Zhang, *Case Studies in Thermal Eng.*, 26: 101177 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101177>
10. X. Ni, S. Zhang, Z. Zheng, and X. Wang, *J. Hazard. Mater.*, 341: 20 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.040>
11. X. Chen, A. Fan, B. Yuan, Y. Sun, Y. Zhang, and Yi Niu, *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 59: 14 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.02.008>
12. Y. Zou, K. Li, B. Yuan, X. Chen, A. Fan, Y. Sun, S. Shang, G. Chen, C. Huang, H. Dai, and Y. Yun, *Powder Technol.*, 356: 383 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.034>
13. J.-M. Cabrera, *Systems and Methods of Continuously Producing Encapsulated Liquid Water* (Patent 9724663 US (2017)).
14. E. Lee, H. Son, and Y. Choi, *Korean J. Chem. Eng.*, 37: 1642 (2020); <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0632-0>
15. Q. Wang, F. Wang, C. Li, Z. Li, and R. Li, *RSC Adv.*, 17: 9827 (2021); <https://doi.org/10.1039/d1ra00253h>
16. D. A. Korolchenko, *Pozharovzryvobezopasnost*, 39, No. 5: 51 (2016) (in Rus-

- sian); <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.02.51-58>
17. V. K. Abrosimov, L. S. Efremova, E. V. Ivanov, and Yu. P. Pankratov, *Rus. J. Phys. Chem.*, **74**, No. 5: 752 (2000).
18. N. F. Bunkin and F. V. Bunkin, *Physics-Uspekhi*, **59**, No. 9: 846 (2016); <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.05.037796>
19. R. Iler, *Chemistry of Silica. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica* (New York: John Wiley: 1979).
20. L. Forny, K. Saleh, I. Pezron, L. Komunjer, and P. Guigon, *Powder Technol.*, **189**, No. 2: 263 (2009); <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.030>
21. B. P. Binks and R. Murakami, *Nature Mater.*, **5**, No. 11: 865 (2006); <https://doi.org/10.1038/nmat1757>

*A. V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry, N.A.S. of Ukraine,
42, Academician Vernadsky Blvd.,
UA-03142 Kyiv, Ukraine*

¹ **TABLE 1.** The influence of the mixing order and the concentration of the components of dry water fire extinguishing powders on their texture.

² **Fig. 1.** Photo (a) and micrograph of dry water fire extinguishing powder (b), which is obtained from water, hydrophobic methyl silica, and sodium bicarbonate (concentration of 2 wt.%).

³ **Fig. 2.** Extinguishing gasoline burning on the water surface by the dry water fire extinguishing powder with sodium bicarbonate: a—gasoline burning; b, c—fire extinguishing process; d—the fire is extinguished.

⁴ **TABLE 2.** Bulk density and fire extinguishing properties of dry water powders with sodium bicarbonate.