

УДК 614.84:629.7

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВПЛИВУ СИЛ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ НА ДИСПЕРСНІСТЬ КРАПЕЛЬ ПІД ЧАС ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ АВІАЦІЙНОЮ ТЕХНІКОЮ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.55-63>

Панченко С. О.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-1781-3935

Ніжник В. В.², ORCID iD 0000-0003-3370-9027

Биченко А. О.¹, ORCID iD 0000-0003-3788-3268

Луценко Ю. В.², ORCID iD 0000-0002-9944-6760

*E-mail: panchenko_serhii@chipb.org.in

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

²Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:
18.04.2022

Пройшла рецензування:
09.05.2022

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

макрооб'єм рідини;
конвективний потік
пожежі; дисперсність
розпилу; лісові пожежі;
пожежна авіація

АНОТАЦІЯ

Проведено огляд наукових джерел і визначено закономірності щодо змін параметрів крапель у процесі трансформації рідинних масивів під час вільного падіння. Наголошено на основній причині виникнення обмежених поперечних розмірів трансформувального рідинного масиву і утвореної після його руйнування хмари дрібних крапель. У статті теоретично розкривається кореляція між ефектом стиснення водяного масиву та стадійності його дроблення залежно від високотемпературного газового середовища. Зіставлено та проаналізовано гіпотези щодо руйнування масивів рідин та описано найбільш характерні для авіаційного гасіння чотири основні стадії процесу еволюції макрооб'єму рідини та три режими коагуляції крапель рідини. Визначено основні недоліки експериментальних досліджень, які проводились з урахуванням впливу конвективних потоків на масиви рідин. Сформульовано об'єкт, предмет та завдання подальшого дослідження

Постановка проблеми. Працюючи над задачею щодо підвищення ефективності ліквідації пожеж авіаційною технікою, було визначено ряд напрямів для адекватної оцінки такого гасіння. Після проведеного аналізу авіаційної техніки в роботі [1] постала проблема щодо розуміння того, як відбувається трансформація вогнегасної речовини під час гасіння, а також, яким чином конвективні потоки від пожежі будуть впливати на вже трансформовані краплі рідини. У багатьох сучасних технологіях пожежогасіння, зокрема тих, що спираються на застосування крапельних рідинних потоків [2–6], основна увага приділяється оптимальному вибору розмірів крапель і компонентів

вогнегасного складу. Це передусім зумовлено визначальним впливом вказаних чинників на характеристики фазових перетворень в зоні горіння. Зважаючи на те, що це дослідження є частиною дисертаційної роботи, в якій опрацьовується задача щодо підвищення ефективності використання авіаційної техніки для гасіння пожеж, ми насамперед визначаємо необхідність встановлення основних причин зміни геометричних параметрів крапель у процесі скидання водних вогнегасних речовин з авіаційної техніки, враховуючи вплив конвективних потоків від пожеж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні [7–11] і експериментальні [12–15] дослідження

дали змогу сформулювати основні положення теорії тепломасоперенесення і фазових перетворень під час руху крапель рідин (в тому числі суттєво неоднорідного складу) через високотемпературні газові середовища, які відповідають типовим пожежам. Встановлено характерні масштаби впливу розмірів, швидкостей руху і складу водних вогнегасних речовин на інтегральні характеристики пароутворення в зоні полуменевого горіння [6–15]. Цікавим є експериментальне і теоретичне дослідження впливу дисперсності крапель в пароводяному потоці на характеристики їх переміщення та випаровування в полуменевій зоні горіння з урахуванням можливих ефектів коагуляції.

Згідно з аналізом останніх досліджень поверхні всіх досліджуваних водяних масивів трансформувались майже однаково (зареєстровані ідентичні стадії деформації та конфігурації). Реалізацію встановлених та зареєстрованих у розглянутих роботах [15–20] чотирьох основних стадій трансформації (стиснення, витягування, розрив з утворенням ланцюжків, руйнування на дрібні краплі) можливо пояснити тим, що під час руху масиву підвищується швидкісний напір зовнішнього газового середовища на нього. Це призводить до його стиснення – утворення форми млинця. Через витягування в поперечному напрямку масиву його поздовжній розмір значно зменшується. Виникає ефект нестійкої поверхні (насамперед з підвітряної сторони), який отримав назву «нестійкість Релея-Тейлора». Причини такої нестійкості полягають в різниці щільностей рідини та газу в полі тяжіння.

Методи дослідження. У науковій публікації були використані методи аналізу, порівняння експериментальних даних та формально-логічні методи, засновані на результатах попередніх власних та інших наукових досліджень.

Формулювання цілей досліджень. Проаналізувати основні причини зміни геометричних параметрів

крапель вогнегасних речовин у процесі трансформації рідинних масивів під час скидання їх з авіаційної техніки з урахуванням зміни сил поверхневого натягу та впливу конвективних потоків від пожежі. Сформулювати об'єкт, предмет та завдання подальшого дослідження.

Виклад основного матеріалу.

Основна причина обмежених поперечних розмірів трансформувального рідинного масиву і утвореної після його руйнування хмари дрібних крапель полягає в тому, що після послідовного стадійного руйнування (дроблення) масиву (спершу на великі фрагменти, потім великі розпадаються на дрібні, а останні на краплі) утворюється хмара крапель, які вже не руйнуються в умовах вільного падіння (числа Вебера не досягають граничних значень 10–12). Відповідно число крапель не збільшується, і площа горизонтальної проєкції хмари краплин, яку вони займають, майже не зростає. Завдяки виконаній відеореєстрації процесу руху крапельної хмари (внаслідок спостереження за розмірами і числом крапель) поблизу основи стенду підтверджено висновок [16].

У той же час слід зазначити, що поздовжній розмір рідинного масиву був практично у всіх експериментах більше поперечного під час відеореєстрації протяжних траєкторій (від 10 до 15 м). Цю закономірність можна пояснити тим, що краплі, які формувались на четвертій стадії трансформації масиву, мали різні розміри. Водночас розташування цих крапель щодо одна одної було різним, оскільки розрив водяних ланцюжків проходив у різних областях масиву. Внаслідок різних розмірів і розташування крапель досить часто відбувалися зіткнення останніх, спостерігалось виникнення явища коагуляції та дроблення. Це призводило до зміни дисперсності крапельної хмари і швидкості руху різних її шарів. Як наслідок, часто відбувалося розтягування крапельної хмари в поздовжньому напрямку. З урахуванням встановлених в експериментах [20] ефектів стиснення рідинних масивів (зменшення їх

поперечних розмірів унаслідок зростання буферного парового шару між водою і газами) у високотемпературних (понад 1000 К) газових середовищах можна зробити висновок про те, що максимальні поперечні розміри і відповідні площі зрошення, наведені в експериментах, для умов, що відповідають типовим лісовим пожежам, будуть на 20–30% меншими. Також у роботі [21] зазначено, що зі зростанням початкового обсягу масиву (від 0,05 до 0,5 л) ефект стиснення стає більш вираженим (особливо на початкових стадіях трансформації). Зі зростанням протяжності (наприклад, до 10–15 м) високотемпературної області ефект стиснення масиву стане визначальним. Зазначений ефект зумовлений [20–21] формуванням буферного парового шару між рідиною і високотемпературними продуктами згоряння в малій околиці кордону рідинного масиву – високотемпературними газами. Інтенсивний вдув парів рідини в цей шар призводить до зростання тиску з боку газів на масив. Як наслідок, суттєво сповільнюється процес його трансформації і збільшення розмірів під час руйнування. Відповідно до досліджень [17] цей буферний шар у разі одиночних крапель (особливо великих – більше 1 мм) істотно знижує тепловий потік до рідини і, як результат, зменшується швидкість випаровування останньої.

Процес еволюції макрооб'ємів рідини можна розділити на такі стадії: 1) рух сферичного ядра рідини; 2) поступова трансформація ядра з утворенням дископодібної конфігурації; 3) утворення пухирів («парашутів»); 4) руйнування бульбашок з утворенням рідинних «ланцюжків»; 5) формування рідиннокрапельної аерозольної хмари. Якісна картина різних стадій процесу для дистильованої води узгоджується з результатами [16–20]. Для оцінки достовірності результатів дослідження проведено порівняння залежності площі поперечного миделевого перетину рідинного ядра, віднесеної до його

початкового перетину (S/S_0), від пройденої відстані x до початку розпаду ядра [17]. Обробка відеокадрів руху макрооб'ємів дистильованої води ($V = 50$ ml) показала, що на початковій ділянці траєкторії руху макрооб'ємів рідини $x \leq 2$ m (початок розпаду рідинного ядра) отримані значення S/S_0 з урахуванням похибок експериментальних даних практично збігаються з результатами [17]. Відзначимо, що в роботі [18] у разі $x > 1-1.5$ m спостерігалася істотна відмінність площі миделевого перетину ядра, виміряного в різних ракурсах (зйомка зверху і збоку), що свідчить про явно виражену несиметричність форми рідинного ядра.

Згідно з наступними результатами дослідження [27] впливу початкового об'єму ядра рідини залежність відстані x_{cr} , на якій відбувається повне його руйнування, має немонотонний характер. За малих розмірів рідинного ядра ($V < 20$ ml) сили поверхневого натягу превалюють над силами динамічного напору (числа Вебера менше критичного значення), і відстань, на якій відбувається повне його руйнування, дорівнюватиме $x_{cr} > 220$ cm. У разі збільшення розмірів ядра величина x_{cr} досягає мінімального значення. З подальшим збільшенням розмірів рідинного ядра величина x_{cr} монотонно зростає. Це пов'язано з тим, що після стадії руйнування бульбашок з утворенням рідинних ланцюжків рідинне ядро повністю не руйнується, а поступово зменшується в розмірах.

На рис. 1 наведені експериментальні дані щодо впливу коефіцієнта поверхневого натягу рідини σ на відстань x_{cr} для рідинного ядра з початковим обсягом 20 і 40 ml. З наведених залежностей випливає, що коефіцієнт поверхневого натягу рідини істотно впливає на динаміку руйнування макрооб'ємів рідини. У разі введення ПАР в дистильовану воду зі зменшенням коефіцієнта поверхневого натягу від 72 до 35 mN/m відстань x_{cr} , на якому відбувається руйнування макрооб'ємів рідини, скорочується від 255 до 185 cm [27].

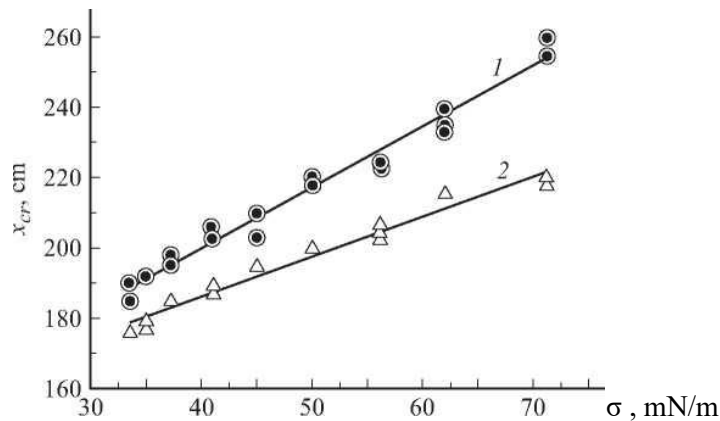


Рисунок 1 – Залежність відстані $x_{сг}$, пройденого макрооб'ємом рідини до його повного руйнування, від коефіцієнта поверхневого натягу рідини σ . $V = 40$ (1) і 20 (2) ml [27]

Джерело: розроблено авторами

В інших експериментальних дослідженнях [19–22] застосовувалися три типові системи крапель рідини – високотемпературних газів, що відрізняються взаємним розташуванням крапель. Передбачалося, що краплі води рухаються з безрозмірною швидкістю на деякій початковій відстані одна від одної L_n під дією сил тяжіння і сил опору в області, заповненій високотемпературними газами (відповідними типовим продуктам згоряння). Прийнято, що початкова температура крапель Θ_0 істотно нижча температури газів Θ_f . Вважалося, що краплі прогриваються за рахунок теплопровідності. На межі рідина-газ відбувається їх випаровування. Пари води вдуваються у високотемпературне газове середовище і змішуються з нагрітими газами. Внаслідок ендотермічного фазового перетворення і вдування парів температура парогазової суміші в безпосередній близькості від крапель знижується. В умовах інтенсивного пароутворення розміри крапель зменшуються. Через деякий час відбувається повне випаровування крапель, що рухаються першими в сукупності (назвемо їх краплями-лідерами). Аналогічно випаровуються і всі наступні краплі.

У результаті аналізу відеограм експериментів [23–26] встановлено декілька режимів коагуляції крапель під час

їх руху через полум'я. Так, зокрема, під час стеження за зміною відстаней між краплями і температури парогазової суміші в сліді крапель виявлено, що коагуляція останніх може реалізовуватися в трьох режимах:

- рухомі в сліді краплі наздоганяють попередні;
- краплі змінюють напрямок свого руху на протилежний внаслідок сил опору газового потоку і коагулюють з краплями, які рухаються слідом за ними;
- краплі внаслідок реалізації фазових перетворень коагулюють з краплями, які рухаються на деякій відстані від них.

Причини реалізації виявлених режимів коагуляції встановлені з використанням відеограм експериментів і чисельного моделювання. Так, наприклад, перший режим зумовлений істотним уповільненням руху перших крапель під час пароутворення і створенням умов (внаслідок зниження температури в сліді) для значно менш інтенсивного випаровування кожної наступної краплі. Краплі, які рухаються першими, практично зупиняються через зустрічний рух висхідних продуктів згоряння та інтенсивний винос маси під час

пароутворення, а рух наступних за ними крапель прискорюється (внаслідок зменшення швидкості фазового переходу і відпрацьованих газів у фронті руху крапель). Через певний проміжок часу ці краплі наздоганяють значно зменшені в об'ємі краплі-лідери і зливаються з ними, продовжуючи рух вже у вигляді «об'єднаних» крапель. Цей процес може тривати до повного випаровування всіх крапель розпорошеної рідини. Проведені експерименти показали, що частка випаруваних крапель залежно від їх характерних розмірів (радіус краплі R_m від 0,05 мм до 2,5 мм) істотно різняться. Зокрема, встановлено, що у разі $R_m \leq 0,17$ мм випаровується практично 100% крапель в каналі довжиною 1 м, у разі $0,17 < R_m \leq 0,3$ мм – близько 70%, у разі $R_m \approx 0,5$ мм – до 20 %, а у разі $R_m \rightarrow 2,5$ мм – не більше 8%. Як наслідок, суттєво зменшується відносна концентрація крапель в потоці високотемпературних газів a_m : $a_m \rightarrow 0$ – для малих крапель ($R_m \leq 0,2$ мм); $a_m \approx 0,7$ – для середніх ($0,2 < R_m \leq 0,4$ мм); $a_m = 0,3$ – для великих (за початковими розмірами) крапель. Зміна значень a_m і R_m у процесі руху крапель через високотемпературні гази характеризує істотно нелінійний і нестационарний процеси. Очевидно, це зумовлено залежністю швидкості пароутворення W_e від температури поверхні T_e кожної краплі рідини. Наведені значення W_e встановлені за результатами обробки експериментальних даних і проведеного чисельного моделювання. Видно, що вони істотно нелінійно (в декілька разів) збільшуються у разі зростання температури поверхні краплі. Водночас можна відзначити задовільну відмінність теоретичних і експериментальних значень W_e (в тому числі у разі відносно низьких температур [26]). Зокрема, за результатами вимірювань маси і розмірів крапель на вході і виході з високотемпературного каналу встановлено, що середня швидкість випаровування води складає близько 0,241–0,278 кг / (м²·с). Чисельні

дослідження показали, що температура поверхонь крапель T_e у разі $T_f \approx 1100$ К може зростати від 350 до 370 К зі збільшенням часу переміщення в газовому середовищі, причому цей процес має нелінійний характер.

У результаті узагальнення експериментальних даних з використанням розроблених моделей тепломасоперенесення встановлений параметр, який можна використовувати під час чисельного визначення умов віднесення крапель газами. Так, на розгляд уведений параметр γ_f , що характеризує співвідношення сил опору F_a і тяжкості F_m , що діють на краплю. Значення F_a і F_m обчислювалися відповідно до положень теорії тепломасоперенесення і гідродинаміки в газокрапельних потоках [26].

З огляду на аналіз можна сформулювати умову гальмування крапель як $\gamma_f = 1$. У разі $\gamma_f < 1$ краплі зберігають початковий напрямок руху, а у разі $\gamma_f > 1$ виносяться газовим потоком. Параметр γ_f можна використовувати під час прогнозування другого режиму коагуляції.

Третій режим коагуляції реалізується під час руху декількох крапель різних розмірів на деякій відстані одна від одної (умовно цей рух можна назвати паралельним).

У результаті чисельного моделювання встановлено, що внаслідок випаровування крапель води і відповідно зменшення їх розмірів досить значно змінюється тиск парогазової суміші в малій околиці поверхні крапель. Крім того, у разі зменшення розмірів краплі зменшуються і характерні розміри їх «температурних слідів» (областей в сліді крапель, в яких температура продуктів згоряння знижується до помірних значень – не більше 400 К). Унаслідок зміни температури і тиску парогазової суміші між краплями за рахунок сил термо- і турбофорезу [26] відстань між паралельно переміщеними краплями L_n зменшується або зростає. У разі підвищення швидкостей

випаровування крапель параметр L_n зростає, у разі зниження – зменшується.

Можна зауважити, що третій режим, як правило, реалізується спільно з другим унаслідок істотної зміни швидкостей руху крапель в потоці високотемпературних продуктів згоряння. Отже, ідентифікація цих двох режимів досить складна і, як довели проведені експерименти, можлива тільки у разі використання підходів високошвидкісної «трассерної» візуалізації. У той же час пояснення причин їх реалізації можливе тільки за результатами чисельного моделювання з урахуванням всіх основних процесів тепломасоперенесення і фазових перетворень.

Висновки та напрями подальших досліджень. На основі комплексу проаналізованих досліджень робимо висновок, що введення ПАР у воду надає можливість змінити коефіцієнт поверхневого натягу, що своєю чергою позначає висоту, на якій буде руйнуватись макрооб'єм рідини під час наближення до площі поверхні. Через зменшення руйнування макрооб'єму буде підвищено точність скидання вогнегасної рідини та збільшено об'єм гасіння на одному кубічному метрі.

Встановлено закономірність вільного падіння рідини, а саме – розбиття макрооб'єму рідини на окремі дисперсні системи. В розглянутих дослідженнях наведені чотири види руху краплин води, які залежать від зміни параметрів впливу на масив. Зміна параметрів цих систем (відповідно й ефективність гасіння) буде залежати від ряду таких чинників: вплив високотемпературних газових потоків на масив рідини та концентрація ПАР, введених у воду.

Здійснений аналіз даних щодо впливу конвективних потоків на масив рідини, який утворюється після її скидання з авіаційної техніки, надалі дасть змогу більш детально описати процес впливу потоків газоповітряних сумішей на зміну фізичного стану рідини та здійснити опис кореляції між параметрами крапель рідини

і зниженням теплового потоку від лісової пожежі, що допоможе визначити необхідні розміри крапель для підвищення ефективності гасіння авіаційною технікою.

Варто зауважити, що в зазначених дослідженнях не було достатнього обґрунтування щодо застосування конкретних видів хімічних речовин, які б мали високу ефективність під час авіаційного гасіння лісових пожеж. З урахуванням проаналізованих даних ми маємо на меті визначити необхідний склад вогнегасних речовин, які будуть давати оптимальні результати у разі їх використання за допомогою авіаційної техніки в Україні. У наведених дослідженнях немає експериментальних даних для підтвердження теорії буферного парового проміжку та використання ряду коефіцієнтів, які б враховували інтенсивність горіння, силу вітру, швидкість літака та інших ключових параметрів, які є критично важливими під час авіаційного гасіння пожеж.

Отже, актуальним питанням на сьогодні є дослідження процесів диспергування водних вогнегасних речовин під час подавання їх із авіаційної техніки, що й стане надалі об'єктом наших наукових розвідок. З огляду на це можна зробити висновок, що предметом дослідження буде вплив сил поверхневого натягу водних вогнегасних речовин на дисперсність розпилу водних вогнегасних речовин під час подавання їх з авіаційної техніки для гасіння пожеж.

Окреслено такі основні задачі на перспективу:

1. Провести аналіз сучасного стану щодо використання авіаційної техніки під час гасіння лісових пожеж.

2. Обґрунтувати математичні моделі, які описують процес подавання вогнегасної речовини з літака в осередок пожежі.

3. Розробити методику експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності водних розчинів залежно від їх дисперсності.

4. Дослідити закономірності зміни дисперсності розпилу водних вогнегасних розчинів залежно від умов скидання їх з авіаційної техніки.

5. Проаналізувати ефективність розробленого методу за допомогою математичного та комп'ютерного моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тенденції застосування авіаційної техніки для гасіння пожеж / С. О. Панченко та ін. *Надзвичайні ситуації та ліквідація*. 2021. Т. 5 № 1. С. 104–114.
2. Wighus R. Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge. *Proceedings of the International Water Mist Conference*. Vienna, 2001. P. 1–26.
3. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science : Proceeding of Eight International Symposium*. 2005. Vol. 27. P. 753–764.
4. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants. *Energetik – Power Engineer*. 2008. № 6. P. 37–38.
5. Korol'chenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems. *Fire and Explosion Safety*. 2011. Vol. 20, № 9. P. 54–57.
6. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. Orlando, USA. 2007.
7. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station. *42rd International Conference on Environmental Systems*. California, USA. 2012.
8. Rodriquez B., Young G. Development of International Space Station fine water mist portable fire extinguisher. *43rd International Conference on Environmental Systems*. 2013.
9. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at placements. *Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 5. P. 74–78.
10. Strizhak P. A. Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture. *Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 8. P. 26–31.
11. Strizhak P. A. Numerical analysis of evaporation process for droplet moving at the water jet through high temperature combustion products. *Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 9. P. 17–22.
12. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical research of heat- and-mass transfer at movement of water drops «tandem» in the high temperature gas mixture. *Thermal Processes in Engineering*. 2012. Vol. 21. № 12. P. 531–538.
13. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Heat-and-mass transfer at water drops movement in the high- temperature gas mixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. № 1. P. 59–65.
14. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a «water slug» on the temperature and concentration of combustion products in its wake. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. № 4. P. 839–848.
15. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86. № 6. P. 1327–1332.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame. *Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 10. P. 15–24.
17. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of sprayed extinguishing liquid drops moving features on the entering into the flame. *Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 12. P. 16–23.
18. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. Vol. 21. № 2. P. 269–272.
19. Волков Р. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. *Листы в ЖТФ*. 2016. Т. 42. № 5. С. 65.
20. Мешков Е. Е., Орешков В. О., Янбаев Г. М. *Листы в ЖТФ*. 2011. Т. 37. № 15. С. 79.
21. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion. *Metrology and Measurement Systems*. 2012. Vol. 19. № 4. P. 797–804.
22. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The ignition features of steam-gas mix by the metal particle heated to high temperatures. *Fire and Explosion Safety*. 2008. Vol. 17. № 3. P. 26–32.
23. Zakharevich A. V., Strizhak P. A. Fire danger of interaction of limited heat content sources with flammable liquids. *Fire and Explosion Safety*. 2011. № 4. P. 70–75.
24. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical simulation of solid-phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature. *Physical Chemistry*. 2011. № 12. P. 35–42.
25. Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of water droplets distribution in the «water shell» on temperature in follow movement. *Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 2. P. 9–17.
26. Terekhov V. I., Pakhomov M. A. Heat-and-mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet streams. *Publishing House of the NSTU*. 2009. 284 p.
27. Arhipov B. A., Basalaev S. A., Zolotarev N. N. Influence of surface tension on the destruction of the liquid macrovolume during its free fall. *Листы в ЖТФ*. 2020. Т. 46, Вып. 3

REFERENCES

1. Panchenko, S., Nizhnyk, V., & Bychenko A. (2021). Tendentsii zastosuvannia aviatsiinoi tekhniki dlia hasinnia pozhezh [Trends of application an aviation for extinguishing fires]. *Nadzvychnaii sytuatsii ta likvidatsiia*, 5, №1, 104-114. Doi : <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114> [in Ukrainian].
2. Wighus, R. (2001). Water mist fire suppression technology – status and gaps in knowledge. *Proceedings of the International Water Mist Conference*, Vienna, 2001, 1–26. [in English].

3. Karpov, A. I., Novozhilov, V. B., Galat, A. A., & Bulgakov, V. K. (2005). Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science : Proceeding of Eight International Symposium*, 27, 753–764. [in English].
4. Sokovikov, V. V., Tugov, A. N., Grishin, V. V., & Kamyshev, V. N. (2008). Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniym tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants]. *Energetik – Power Engineer*, 2008, no. 6, 37–38. [in russian].
5. Korol'chenko, D. A., Gromovoy, V. Yu., & Vorogushin, O. O. (2011). Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, 54–57. [in russian].
6. Abbud-Madrid, A., Watson, D., & McKinnon, J. T. (2007). On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*, Orlando, USA. [in English].
7. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., & Abbud-Madrid A. (2012). Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher designed for the International Space Station. *42rd International Conference on Environmental Systems*, California, USA. [in English].
8. Rodriguez, B., & Young, G. (2013). Development of International Space Station fine water mist portable fire extinguisher. *43rd International Conference on Environmental Systems*, Vail, CO. [in English].
9. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2012). Chislennaya otsenka optimalnykh razmerov kapel vody v usloviyakh yeye raspilyeniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshcheniyakh [Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at place-ments]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74–78. [in russian].
10. Strizhak, P. A. (2012). Chislennoye issledovaniye usloviy ispareniya sovokupnosti kapel vody pri dvizhenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, vol. 21, no. 8, pp. 26–31. [in russian].
11. Strizhak, P. A. (2012). Chislennyy analiz protsessa ispareniya kapli, dvizhushcheyasya v struye vody cherez vysokoskorostnyye produkty sgoraniya [Numerical analysis of evaporation process for droplet moving at the water jet through high temperature combustion products]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, vol. 21, no. 9, pp. 17–22. [in russian].
12. Glushkov, D. O., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2012). Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii «tandem» kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical research of heat- and-mass transfer at movement of water drops «tandem» in the high temperature gas mixture]. *Teplovyye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 531–538. [in russian].
13. Vysokomornaya, O. V., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Heat-and-mass transfer at water drops movement in the high- temperature gas mixture]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 86, no. 1, pp. 59–65. [in russian].
14. Strizhak, P. A. (2013). Vliyaniye raspredeleniyakapel v «vodyanom snaryade» natemperaturui kontsentratsiyu produktov sgoraniya v yego slede [Influence of droplet distribution in a «water slug» on the temperature and concentration of combustion products in its wake]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 86, no. 4, pp. 839–848. [in russian].
15. Volkov, R. S., Vysokomornaya, O. V., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniye izmeneniya massy kapel vody pri ikh dvizhenii cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 86, no. 6, pp. 1327–1332. [in russian].
16. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniyepolnoty ispareniya ras- pylennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya [Experimental investigation of evaporation integrity for sprayed water at moving through flame]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, vol. 22, no. 10, pp. 15–24. [in russian].
17. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Eksperimentalnoye issledovaniye osobennostey dvizheniya kapel raspilyennoy tushashchey zhidkosti na vkhode v zonu plameni [Experimental investigation of sprayed extinguishing liquid drops moving features on the entering into the flame]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, vol. 22, no. 12, pp. 16– 23. [in russian].
18. Volkov, R. S., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2014). Osobennosti ispareniya dvukhkapel vody, dvizhushchikh- sya posledovatelno cherez vysokotemperaturnyye produkty sgoraniya [Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 21, no. 2, pp. 269–272. [in russian].
19. Volkov, P.C., Zabelyn, M.V., Kuznetsov, H.V., & Stryzhak, P.A. (2016). On optimization of forest fire extinguishing management by inhibitor solution. *Pysma v ZhTF*, T. 42, № 5, pp. 65. [in russian].
20. Meshkov, E.E., Oreshkov, V.O., & Yanbaev, H.M. (2011). Formation, dynamics and evaporation of a cluster of dispersed phase particles in the gravitational field. *Pysma v ZhTF*, T. 37, № 15, pp. 79. [in russian].
21. Janiszewski, J. (2012). Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion. *Metrology and Measurement Systems*. Vol. 19, No. 4, pp. 797–804. Doi : 10.2478/v10178-012-0071-2 [in English].
22. Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2008). Osobennosti zazhiganiya parogazovoy smesi nagretoy do vysokikh temperatur metallicheskoy chastitsey [The ignition features of steam-gas mix by the metal particle heated to high temperatures]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, vol. 17, no. 3, pp. 26–32. [in russian].
23. Zakharevich, A. V., & Strizhak, P. A. (2011). Pozharnaya opasnost vzaimodeystviya istochnikov ogranichenogo teplosoderzhaniya s legkovosplamennyayushchimisyazhidkostyami [Fire danger of interaction of limited heat content sources with flammable liquids]. *Pozharnaya bezopasnost – Fire Safety*, no. 4, pp. 70–75. [in russian].
24. Glushkov, D. O., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2011). Chislennoye modelirovaniye tverdogfaznogo zazhiga- niya metallizirovannogo kondensirovannogo veshchestva nagretoy do vysokikh temperatur chastitsey [Numerical simulation of solid-phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature]. *Khimicheskaya fizika – Physical Chemistry*, no. 12, pp. 35–42. [in russian].

25. Zhdanova, A. O., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2013). Vliyaniye raspredeleniya kapel vody v «vodyanom snaryade» na temperaturu v yego slede [Influence of water droplets distribution in the «water shell» on temperature in follow movement]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, vol. 22, no. 2, pp. 9–17. [in russian].
26. Terekhov, V. I., & Pakhomov, M. A. (2009). *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapelnykh potokakh* [Heat-and-mass transfer and hydrodynamics in a gas-droplet streams]. Publishing House of the NSTU, 284 p. [in russian].
27. Perfyleva, N. N., & Usanyna, A. S. (2020). Vliyanye poverkhnostnogo natiazheniya na razrusheniye makroobema zhydkosty pry eho svobodnom padenyy [Influence of surface tension on the destruction of the liquid macrovolume during its free fall] *Letters in ZhTF*, 46, 3. DOI : 10.21883/PJTF.2020.03.48989.17970 [in russian].

ANALYSIS OF RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SURFACE TENSION FORCES ON THE DISPERSITY OF DROPLETS DURING EXTINGUISHING FOREST FIRES BY AVIATION EQUIPMENT

S. Panchenko¹, V. Nizhnyk², A. Bychenko¹, Yu. Lutsenko²

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defence of Ukraine*

²*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS:

macro volume of liquid; convective flow of fire; dispersion of the spray; forest fires; fire aircraft

ANNOTATION

The literature review is carried out and regularities concerning changes of parameters of drops in the course of transformation of liquid massifs during free fall are defined. The main reason for the limited transverse dimensions of the transforming liquid mass and the cloud of small droplets formed after its destruction is determined. The correlation between the effect of compression of the water mass and the stages of its crushing depending on the high-temperature gaseous medium is established. There are 4 stages of the process of evolution the macro-volume liquid and 3 modes of coagulation of liquid droplets. Characteristic features of droplet collision taking into account the influence of convective flows are described. As a result of the analysis of videograms of experiments several modes of coagulation of drops at their movement through a flame are established. In particular, when monitoring the change in the distances between the drops and the temperature of the vapor-gas mixture in the trace of the drops, it was found that the coagulation of the latter can be realized in three modes:

- moving in the footsteps drops catch up with the previous ones;
- droplets change the direction of their movement to the opposite due to the resistance of the gas flow and coagulate with the droplets moving after them;
- droplets due to the implementation of phase transformations coagulate with droplets that move at some distance from them.

In the analysis of the modes of coagulation of water droplets in the field of high-temperature gases, the characteristic features of droplet collision are established. Experiments have shown that at «tangential» collision of two drops (especially at difference of their characteristic sizes several times) there is their short-term merger and then crushing into two drops with the sizes close to initial. At «frontal» collision of drops there is their merger and further movement. continues the «combined» drop. At the same time, experiments have shown that the characteristics of the processes of collision of droplets change significantly when varying the size and speed of movement of droplets, as well as the angles of intersection of the trajectories of their movement.