

*В.М. Баланюк, к.т.н., доцент, ЛДУБЖД*

## ПОЖЕЖОГАСІННЯ СЕРІЯМИ УДАРНИХ ХВИЛЬ

(представлено д.т.н. Куценком Л.М.)

В роботі визначено залежність ефективності гасіння серіями ударних хвиль відповідно до їх тиску та частоти проходження через полум'я в діапазоні від 1 до 30 Гц. Експериментально встановлено, що дія серій з 3-х ударних хвиль з тиском в фронті близько 172 Па в діапазоні частот 8 – 12 Гц є найбільш вогнегасно ефективною в умовах експериментальної камери.

**Ключові слова:** пожежа, ударна хвиля, пожежогасіння.

**Постановка проблеми.** На даний час жоден з вогнегасних засобів не забезпечує швидкого та ефективного гасіння пожеж у важкодоступних місцях, при цьому сумарний час гасіння такого об'єму становить час його заповнення вогнегасним засобом до необхідної концентрації, або досягнення необхідної інтенсивності подачі вогнегасного засобу у вогнище пожежі. Особливо проблемним є гасіння важкодоступних та прихованих замкнених об'ємів, оскільки туди важко проникає вогнегасна речовина і подеколи горіння в цих об'ємах може продовжуватись тривалий час після подачі вогнегасної речовини.

Проблема гасіння пожеж в важкодоступних місцях, з великою кількістю комунікацій, значним пожежним навантаженням, утрудненим доступом та можливим виникненням джерел запалювання є актуальною, зважаючи на тривалий час їх гасіння та необхідну значну кількість сил та засобів для цього. Пожежі, які виникають на об'єктах нафтогазової, хімічної, деревообробної промисловості, характерні стрімким розвитком, складним та затяжним гасінням [1]. При цьому такі параметри пожежі, як температура, швидкість поширення полум'я, інтенсивність газообміну набувають максимальних показників з перших моментів розвитку пожежі, та можуть зберігати зазначені параметри тривалий час, незважаючи на подачу вогнегасних засобів. При інтенсивному горінні, особливо горючих рідин в розливі та в резервуарі, нерідко вогнегасний засіб під дією конвективних потоків відноситься від місця горіння так і не проникнувши в зону горіння. Окремо слід відзначити питання вартості гасіння та часу, яке для деяких складних пожеж становить до декількох днів, а вартість вимірюється десятками мільйонів гривень. Відомо, що наймасштабнішою пожежею за часів незалежності України, що призвела до значних людських і матеріальних втрат, була пожежа, яка виникла 8 червня 2015 року на території нафтобази групи компаній "БРСМ" у Васильківському районі Київської області [2]. Пожежа тривала майже два тижні, для її ліквідації було задіяно значну кількість особового складу та техніки Державної служби України з надзвичайних ситуацій з декількох областей. Причиною пожежі став недолік в конструкції та виробництва електроустановок, в

результаті чого виникло коротке замикання електромережі. Витрати на гасіння пожежі оцінили у 50 мільйонів гривень [2].

Пожежі на нафтопереробних заводах виникають по всьому світу і зазвичай характеризуються значними масштабами їх розповсюдження та значними матеріальними збитками. Так, в травні 2001 року сталася велика пожежа в нафтовій компанії "ЛУКОЙЛ" на території нафтопереробного заводу "Петротел-ЛУКОЙЛ" біля міста Плоєшти (Румунія). Вогонь охопив один з резервуарів з бензином, в безпосередній близькості від вогнища загорання перебували ще п'ять стаціонарних резервуарів з паливом, технологічні установки, селище працівників підприємства. Пожежа була ліквідована через 10 годин після її початку. У серпні 2003 р в м. Пуертоальяно (провінція Сьюдад-Реаль, Іспанія) на нафтопереробному заводі компанії "Repsol YPF SA" стався вибух з наступним горінням резервуарів з нафтопродуктами. Пожежа, тривала близько трьох діб. У грудні 2005 року відбулося три вибухи з подальшим горінням на нафтоскховищі Bansfield, яке розташоване за 40 км на північ від Лондона і забезпечує нафтопродуктами південний схід Англії, в тому числі аеропорт Хітроу. Bansfield – 5-е за величиною нафтоскховище Великобританії, в якому перебувало до 5% всіх нафтопродуктів країни. Пожежа охопила на 20 основних резервуарів з паливом, її ліквідували понад 60 годин. У березні 2009 року в Мозирі (Білорусь) на території парку світлих нафтопродуктів ВАТ "Мозирський нафтопереробний завод "концерну "Белнефтехим" сталася пожежа в сталевому резервуарі об'ємом 10 тис. м<sup>3</sup> для зберігання бензину. В резервуарі знаходилося 3 тис. літрів бензину марки АІ-92. Гасіння тривало більше доби.

Як видно з прикладів пожеж згідно вищенаведеного аналізу, наявні на сьогоднішній день стаціонарні системи протипожежного захисту, не забезпечують достатнього захисту, не кажучи вже про швидке та ефективне гасіння пожеж. Тому однією з проблем є пошук нових, швидких, ефективних методів гасіння пожеж горючих рідин в важкодоступних місцях, куди утруднена подача вогнегасних засобів.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Ефективним та швидким способом пожежогасіння є використання ударних вибухових хвиль для гасіння полум'я. Крім цього, ударні хвилі можна використовувати для пожежогасіння також у вигляді серій. Застосування серій ударних хвиль дасть змогу значно підвищити вогнегасну ефективність ударної хвилі оскільки полум'я буде зазнавати багаторазового впливу ударних хвиль (УХ) і дії відповідних чинників. Таким чином, питання застосування серій ударних хвиль для гасіння дифузійного полум'я (ДПГ) є недослідженим та перспективним напрямком, розвиток якого дасть змогу гасити складні пожежі за максимально короткий час. Фізичний вплив на полум'я звуковими та ударними хвилями з метою пожежогасіння останнім часом набув особливої актуальності оскільки він дає змогу проводити гасіння не використовуючи при цьому хімічні агенти. Вогнегасну дію звукових хвиль на дифузійне полум'я описано в роботах [3, 4] та отримано результати про те, що звукова хвиля може ефективно гасити дифузійне полум'я при певних частотах, але відстань до джерела ударних хвиль при цьому є досить незначною і становить до 500 мм.

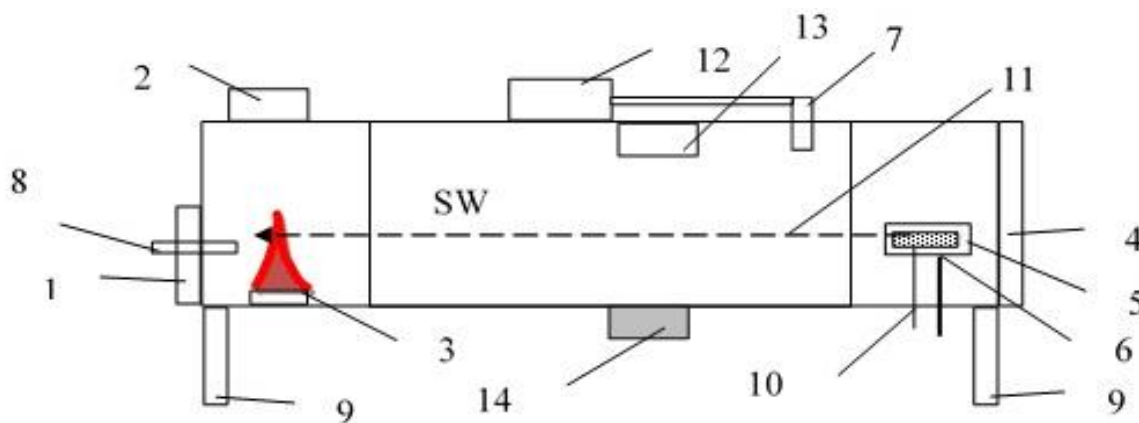
Крім цього, застосування звукових хвиль з метою пожежогасіння потребує використання складного обладнання на генерування звуку відповідних частот і з практичної сторони реалізувати такий спосіб гасіння буде досить проблематичним. На відміну від звукових хвиль в пожежогасінні використовують і ударні хвилі, які є значно потужнішими за звукові. Отримати потужну ударну хвилю технологічно просто за допомогою вибухової речовини або стиснутого газу. Ударні хвилі на сьогодні використовуються в основному для гасіння лісових, степових та пожеж газонафтових фонтанів і в цьому напрямку проводяться дослідження, які вказують на те, що пожежу можна гасити, але при значному надлишковому тиску в фронті УХ. При цьому параметри ударної повітряної хвилі коливались с надлишковим тиском від 0,02 до 0,15 кгс/см<sup>2</sup> і з тривалістю фази надлишкового тиску від 0,01 до 0,2 с [5]. Дослідження впливу ударних хвиль проводились в основному для лісових та степових пожеж [6, 7]. В роботі [8] вказано, що ударні хвилі визначених параметрів використовуються для гасіння степових пожеж у вигляді шнурів з вибуховою речовиною. А в роботі [9] вказано що заряди можна використовувати для гасіння верхових пожеж в результаті відбиття ударної хвилі від екранів заданої конфігурації. Так в роботі [10] пропонується використовувати УХ для гасіння газонафтових фонтанів. В роботі [11] використовується спосіб який передбачає подачу вогнегасного засобу на задану відстань в результаті вистрілювання цим порошком для гасіння лісових пожеж. Ударна хвиля при цьому застосовується лише для доставки вогнегасного порошку до місця пожежі. В роботі [12] було показано, що одинарні ударні хвилі з потужністю 215 Па і вище можуть ефективно та максимально швидко (за 200 – 300 мс) гасити дифузійне полум'я н-гептану. При цьому автор стверджує, що заявлений спосіб гасіння може використовуватись для гасіння пожеж на початковій стадії. Також серії ударних хвиль використовувались в комбінації з вогнегасним аерозолем, і авторами [13, 14, 15], було досягнуто підвищення вогнегасної ефективності до 33 %. З результатів зазначених робіт випливає те, що сумісна дія УХ та аерозолю набагато вогнегасно ефективніша завдяки синергетичній дії факторів, які виникають при взаємодії УХ з газовим середовищем. Основні з них – це зміна концентрації реагуючих речовин, зміщення полум'я УХ від тигля, та різке охолодження полум'я набігаючою УХ. Виходячи з аналізу літературних джерел, можна сказати, що вогнегасний вплив серії ударних хвиль на дифузійне полум'я реалізує багаторазовий вплив на ДПГ вогнегасних факторів УХ – розбавлення зони горіння вогнегасною сумішшю, зміщення і відрив полум'я від осередку горіння в протилежну сторону від напряму УХ, та фрагментація полум'я як наслідок ефекту Ріхтмаєра – Мешкова [16].

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою роботи є встановлення вогнегасної ефективності серій УХ залежно від їх потужності та частоти впливу на дифузійне полум'я н-гептана.

Щоб визначити як залежить вогнегасна ефективність від потужності ударних хвиль та їх частоти впливу на дифузійне полум'я н-гептану C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> (ДПГ), було проведено серію експериментів з різними значеннями потужності та частотами впливу ударної хвилі.

Для визначення вогнегасної ефективності серій ударних хвиль з певною частотою, за основу було взято експериментальні дані щодо вогнегасної здатності одинарної УХ з тиском в фронті 215 Па автора [12]. Для цього було проведено експеримент де визначали вплив серій ударних хвиль по 3 хвили з потужністю нижчою за вогнегасну, на гасіння ДПГ в експериментальній камері за представленою методикою та використанням такого обладнання. Експериментальна камера виконана таким чином: камера з передньою оглядовою панеллю розмірами: довжина 1980 мм, ширина: 485 мм, висота 530 мм в якій є два люки для внесення тиглів, генератор ударних хвиль, датчик тиску та температури BMP 180 для контролерів Arduino, з часом реакції не більше 7,5 мс в нормальному режимі вимірювання [17]. Для отримання інформації з датчика для контролера Arduino UNO була використана програма для виводу показників датчика в інтерфейсі CoolTerm.\_0.stk [18]. Дані значень тиску отримували спочатку в CoolTerm.\_0.stk, далі їх копіювали, і в Excel будували графіки. Датчик був встановлений в камері на відстані 1,75 метра від генератора ударних хвиль. Сам генератор ударних хвиль представляє собою 5 труб діаметром 70 мм з отворами діаметром 3 мм у задній кришці для запалення піротехнічного заряду всередині генератора. Для створення ударної хвилі використовували вибухи зарядів піроксилінового порошу, які поміщали всередину генератора УХ.

Генерування відповідної частоти подачі струму на електричні запальники проводили з допомогою електронної схеми на основі плати контролера Arduino, дисплею, перемінного резистора зміни часу затримки, кнопки та модуля реле. Запалення заряду здійснювали джерелом струму напругою близько 20 В, яку отримували на виході з реле з відповідною частотою.



**Рис. 1.** Експериментальна установка для визначення вогнегасної ефективності об'ємної вогнегасної речовини під дією ударної хвилі: 1 – люк для тигля; 2 – вентиляційний отвір з вентилятором та засувкою; 3 – тигель; 4 – люк; 5 – генератор ударних хвиль; 6 – кріплення генератора ударних хвиль; 7 – патрубок для газу; 8 – датчик тиску; 9 – стійки; 10 – електрозапальник; 11 – оглядове вікно; 12 – газовий розходомір; 13 – вентилятор; 14 – джерело живлення

Експеримент проводили таким чином. В камері встановлювався тигель діаметром 40 мм і глибиною 35 мм з попередньо запаленим на 20 секунд н-гептаном, на відстані 1750 мм від генератора ударних хвиль (рис. 1), після чого задіювали генератор ударних хвиль, пропускали по

камері ударні хвилі відповідної потужності та частоти і фіксували результат – «гасіння», «не гасіння», «зміни полум'я» за допомогою фотокамери Nikon 1 J4 з частотою зйомки 1200 кадрів на секунду. З отриманих відеороликів була зроблена розкадровка відповідних моментів гасіння. Після кожної спроби об'єм камери продували для наступного досліду.

Експериментально було визначено вогнегасну ефективність УХ при гасінні серіями по 3 УХ з частотою 1, 5, 10, 15, 25, та 30 Гц на ДПГ. Результати експерименту показані на рис. 2.

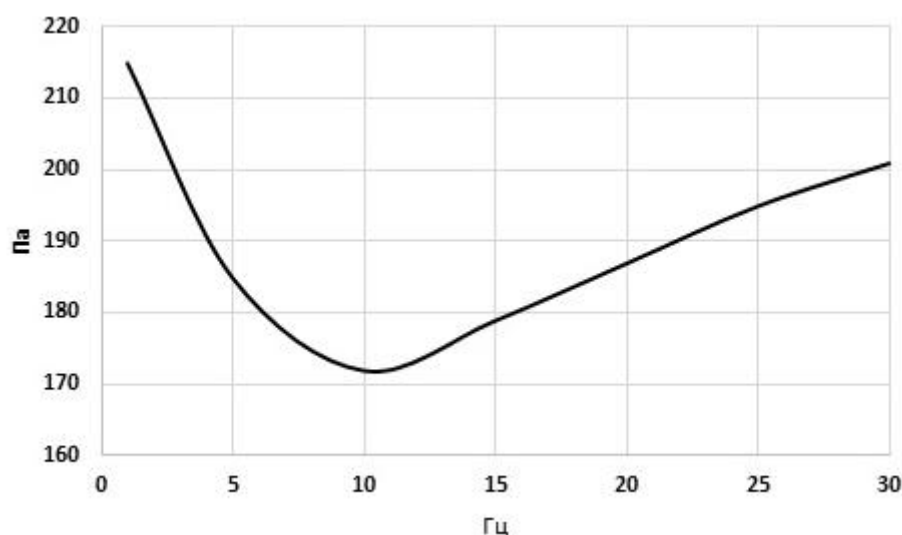


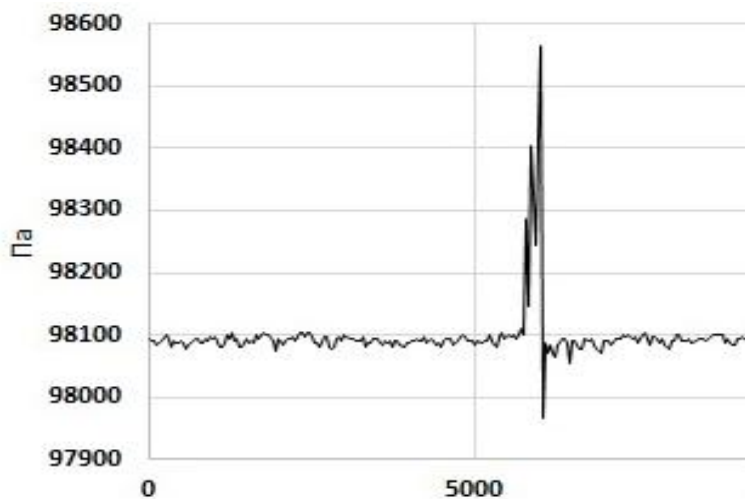
Рис. 2. Залежність вогнегасної ефективності УХ від їх частоти та потужності

Результати експерименту показали, що при збільшенні частоти впливу серії з 3-х ударних хвиль на дифузійне полум'я н-гептану до 8 – 12 Гц, гасіння відбувається при зниженні тиску в одинарній УХ до 175 Па.

Як видно з результатів експерименту, якщо збільшувати частоту дії УХ на полум'я то можна зменшити потужність одинарної ударної хвилі, серія котрих приводить до гасіння ДПГ. Збільшення частоти УХ до 10 Гц дає змогу зменшити тиск у фронті одинарної УХ до 172 Па. Подальше збільшення частоти впливу УХ на ДПГ не приводить до зменшення тиску в фронті УХ. При проходженні серій УХ з високою частотою відбувається збільшення їх кінцевого тиску внаслідок їх накладення в просторі біля стінки. Так при частоті в 20 Гц кінцевий тиск біля стінки камери в результаті збільшується до 560 Па, що видно з графіка за результатами експерименту на рис. 3 (а). Вплив на полум'я серій УХ забезпечує їх накладення з отриманням кінцевого тиску значно вищого за первинний тиск одинарної хвилі, що відповідає твердження автора [19], який вказує, що пропускання через газ потужних ударних хвиль одна за одною приводить до збільшення тиску до 4 разів. При дії на полум'я серії 3 УХ з частотою 10 Гц збільшення тиску майже не відбувається, що також видно графіка рис. 3 (б).

Як видно з графіка (рис. 3 б) кінцевий тиск після 3-ї хвилі не відрізняється від тиску одинарної ударної хвилі. При цьому гасіння полум'я відбувається ймовірно від збільшення тривалості часу впливу надлишкової фази на полум'я, який становить в сумі до 300 мс. Після 1 ударної

хвилі полум'я після відриву встигає фрагментуватись не повернувшись в вихідне положення. Крім цього за цей час фрагменти догорають після чого проходять ще 2 УХ які остаточно його гасять. Щодо тривалості дії надлишкової фази тиску у фронті УХ на полум'я, то автори роботи [20] вказують, що збільшення тривалості фази надлишкового тиску дає змогу гасити великі масштаби полум'я, але при цьому автори застосовували значно потужніші заряди вибухової речовини.



а)



б)

Рис. 3. Збільшення тиску при проходженні серії з 3-х УХ з частотою 20 Гц та вихідною потужністю одинарної УХ  $\approx 172$  Па: а) 20 Гц; б) 10 Гц

Отже, можна сказати, що для гасіння полум'я в зазначеному тиглі будуть оптимальними значення тиску УХ в діапазоні від 170 Па до 180 Па, при частоті впливу УХ в діапазоні від 8 до 12 Гц.

Для виявлення особливостей гасіння серій УХ при визначених частотах на ДПГ було зафіксовано та проведено розкадровку процесу гасіння ДПГ при значеннях частоти УХ в 10 Гц, (рис. 4) та 20 Гц (рис. 5).

Як видно з розкадровки збільшення вплив серії УХ на ДПГ приводить до значної турбулізації полум'я, що видно на рис. 4. позиції 4.3-4.12. При дії на полум'я першої УХ (рис. 4. поз. 4.2-4.6.) відбувається

значне збільшення розмірів полум'я, його фрагментація під дією УХ та відрив від зрізу тигля. Наступна УХ (поз. 4.7-4.9) приводить до зміщення відірваного полум'я від тигля в протилежну сторону від напрямку УХ. При цьому видно що полум'я відхиляється під кутом приблизно в  $45^\circ$  від тигля. Фрагментація при цьому посилюється, полум'я починає згасати, оскільки в зону горіння не поступає горюча пара н-гептану.

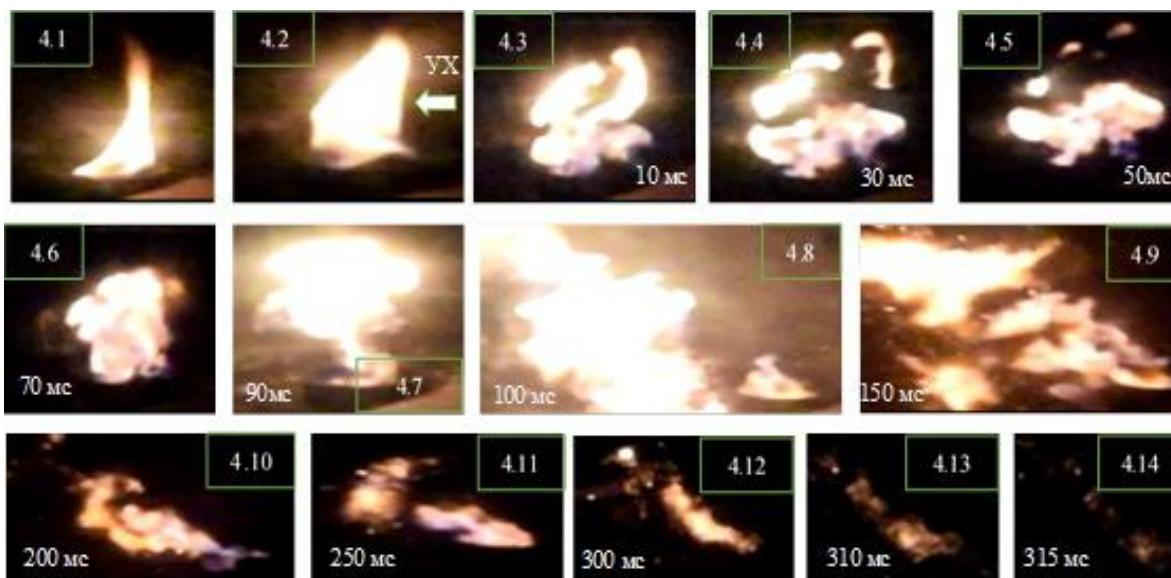


Рис. 4. Розкадровка моменту гасіння ДПГ серіями по 3 УХ з частотою 10 Гц

Остання – третя УХ (поз. 4.12) завершує процес гасіння ДПГ повністю фрагментуючи та гасячи невеликий фрагмент полум'я, який залишився після дії 2-ї УХ. Час гасіння серією з 3-х УХ становить приблизно 320 мс, що в порівнянні з дією одинарної УХ [12], але більшої потужності УХ є більший на 70 мс. Таким чином, дія на ДПГ серії з 3-х УХ потужністю близько 170 Па приводить до гасіння ДПГ після проходження 3-ї УХ внаслідок відриву та фрагментації полум'я. В розкадровці (рис. 5) було показано особливості впливу УХ з тиском в фронті близько 195 Па та частотою 20 Гц на ДПГ. Результати розкадровки показані на рис. 5.

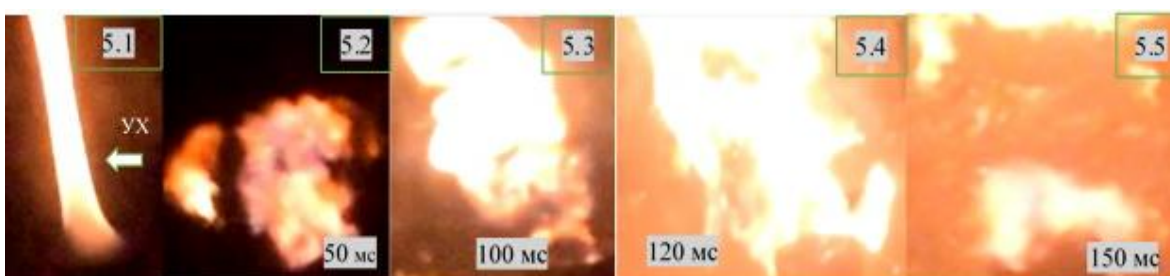


Рис. 5. Розкадровка дії серії 3 УХ з частотою 20 Гц на ДПГ

Як видно з рисунка 5 при проходженні УХ з частотою 20 Гц процес відриву полум'я відбувається так само (поз. 5.2), але до остаточного гасіння це не приводить, оскільки після відриву полум'я значно турбулізується та збільшується в розмірах. Як видно з розкадровки, розміри полум'я після проходження 2-ї УХ (поз. 5.3) значно збільшуються, що три-

ває до 150 мс, коли проходить остання ударна хвиля (поз. 5.5). При цьому вигорання горючої суміші відбувається не повністю, полум'я продовжує існувати, але дія УХ закінчується.

Таким чином, гасіння серіями 3-х УХ з частотою 20 Гц та зазначеним тиском є менш ефективним, ймовірно внаслідок малого часу впливу серії з 3-х УХ на ДПГ.

**Висновок.** В роботі експериментально встановлено, що дія серій з 3-х ударних хвиль з тиском в фронті близько 172 Па при частоті 8-12 Гц є найбільш вогнегасно ефективною в умовах експериментальної камери. Запропонований спосіб гасіння може забезпечувати ефективне гасіння дифузійного полум'я на початковій стадії горіння в важкодоступних та прихованих замкнених місцях, а також резервуарів з горючими рідинами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. под ред. К.Г. Бомштейна. – An introduction to fire Dynamics D. Drysdale. – John Wiley and Sons, Chichester, 1985. – 423 с.
2. Електронний ресурс / ВДіСП УкрНДЦЗ ДСНС України. – 2015. – 24 с. – Режим доступу: [http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2016/1/20/AD\\_12\\_2015.pdf](http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2016/1/20/AD_12_2015.pdf).
3. Tomasz Węsierski, Stefan Wilczkowski, Henryk Radomiak, wygaszanie procesu spalania przy pomocy fal akustycznych / Wydawnictwo CNBOP-PIB: BiTR Vol. 30 Issue 2, 2013. – Pp. 59-64.
4. Henryk Radomiak, Marlena Mazur, Monika Zajemska, Dorota Musial Gaszenie płomienia dyfuzyjnego przy pomocy fal akustycznych. Wydawnictwo CNBOP-PIB: BiTR Vol. 40 Issue 4, 2015. – Pp. 29-38.
5. Тушение очагов пожара взрывом / Н.П. Копылов, Е.А. Москвин, В. Жарков, Е.Ю. Сушкина // Крупные пожары : предупреждение и тушение: сб. тезисов. докл. Матер. XVI научн.-практ. конф. – Москва : ФГУ ВНИИПО, 2001. – С. 27-28.
6. Гришин А.М. Применение взрывчатых веществ в устройствах локализации и тушения природных пожаров / А.М. Гришин, В.П. Зима, Д.П. Касымов // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24. – №7.
7. Grishin A. (1993) Interaction of shockwaves with tree crowns and the front of crown forest fires. Shockwaves @ Marseille III, Shockwaves in condensed matter and heterogeneous media, Editors Brun & Dumitrescu, Springer.
8. Курбатский Н.П. Локализация лесных пожаров накладными шнуровыми зарядами / Н.П. Курбатский, Е.Н. Валендик // Красноярский рабочий. – Красноярск, 1970. – С. 320-332.
9. Рева Г.В. Метод оценки интенсивности воздействия ударной волны направленного взрыва для тушения лесных пожаров / Г.В. Рева, Л.М. Куценко. – Х: ХИПБ, 1998. – 80 с.
10. Груздев А.Г. Современные технологии комбинированного тушения пожаров газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов / А.Г. Груздев, В.В. Кайдалов, В.Н. Осипков, Ю.Э. Орионов, А.В. Стрелец, Ю.И. Яшнев // Пожарная безопасность: сб. научн. докл. – 2011. – №3. – С. 84-88.



11. Захматов В.Д. О применении многоствольных установок для пожаротушения в шахтах / В.Д. Захматов, Г.А. Балыка // Уголь Украины. – 1989. – №7. – С. 32-33.

12. Balanyuk V.M. Extinguishment of n-heptane diffusion flames with the shock wave / V. M. Balanyuk. – ВіТР, 2016. – Vol. 42, Issue 2. – P. 103-111.

13. Баланюк В.М. Взаємодія полум'я і вогнегасного аерозолі речовини під впливом ударної хвилі / В.М. Баланюк, Ю.О. Копистинський, О.І. Лавренюк // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – 2011. – №18. – С.71-75.

14. Баланюк В.М. Явища та процеси що виникають під дією звукової хвилі в аерозолі / В.М. Баланюк // Пожежна безпека. – Львів: ЛДУБЖД, 2010. – №16. – С. 129.

15. Баланюк В. М. Визначення ефективності гасіння вогнегасною аерозольною речовиною в умовах застосування газових ударних хвиль / Баланюк В. М., Копистинський Ю. О., Лавренюк О. І. // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Л.: ЛДУБЖД, 2012. – №21. – С. 23-28.

16. Руев Г.А. Развитие неустойчивости Рихтмасра – Мешкова при взаимодействии диффузионного слоя смешивания двух газов ударными волнами / Г.А. Руев, А.В. Федоров, В.М. Фомин // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46. – №3. – С 3-11.

17. Датчик тиску та температури BMP-180. <https://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.

18. Програмне забезпечення CoolTerm\_0.stk <http://freeware.the-meiers.org>.

19. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. – М.: «Наука», 1966. – 686 с

20. Копилов Н.П. Тушение очагов пожара взрывом / Н.П. Копилов, Е.А. Москвилін, В.Г. Жарков, Є.Ю. Сушкина // Крупные пожары: предупреждение и тушение: сб. тез. докл.: Матер. XVI научн.-практ. конф. – Москва: ФГУ ВНИИПО, 2001. – С. 27-28.

*Отримано редколегією 17.10.2016*

В.М. Баланюк

#### **Пожаротушение сериями ударных волн**

В работе определена зависимость эффективности тушения сериями ударных волн согласно их давления и частоты прохождения через пламя в диапазоне от 1 до 30 Гц. Экспериментально установлено, что действие серий из 3-х ударных волн с давлением в фронте около 172 Па в диапазоне частот 8-12 Гц является наиболее вогнегасно эффективной в условиях экспериментальной камеры.

**Ключевые слова:** пожар, ударная волна, пожаротушение.

V.M. Balanyuk

#### **Firefighting series of shock waves**

The dependence of the quenching efficiency of shock waves in accordance with their pressure and frequency of passage through flames in the range from 1 to 30 Hz. It was established experimentally that the most effective are a series of shock waves in the frequency range of 8-12 Hz. Showed a significant increase in required pressure WOW with the passage of a series of 3 shock waves due to collisions.

**Keywords:** fire, shock wave, fire.