

канд. техн. наук. В.М. Баланюк / V.M. Balanyuk, Ph.D.<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 21.03.2016;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 06.06.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2016;

## Тушение диффузионного пламени н-гептана ударной волной<sup>2</sup>

### Extinguishment of N-heptane Diffusion Flames with the Shock Wave

### Gaszenie płomienia dyfuzyjnego n-heptanu z wykorzystaniem fali uderzeniowej

#### АННОТАЦИЯ

**Цель:** Определение эффективности тушения диффузионного пламени н-гептана ударной волной (УВ). Установление возможного механизма тушения диффузионного пламени ударной волной на примере пламени н-гептана  $C_7H_{16}$ . Определение мощности ударной волны, при которой возникает тушение пламени н-гептана в условиях специальной камеры.

**Методы:** Для определения возможности тушения диффузионного пламени ударной волной, которая возникает при взрыве пиротехнического заряда, было оборудовано установку в виде камеры объемом 0,5 м<sup>3</sup>, в которой размещен генератор ударных волн, а на расстоянии 1,75 м, от него - тигель с н-гептаном. Измерение давления в фронте ударной волны было проведено с помощью датчика давления и температуры BMP-180 для контроллеров Arduino, работа которого основана на пьезорезистивном принципе. Визуализацию процесса тушения ударной волной было проведено с помощью камеры Nikon 1 j4 с возможностью получения кадров со скоростью 1200 кадров в секунду.

**Результаты:** В работе экспериментально определено, что воздействие на пламя н-гептана, ударной волны с давлением в фронте около 215 Па в камере на расстоянии до 2-х метров, приведет к его затуханию через отрыв и дефрагментацию. Моменты, которые подтверждали огнетушащую эффективность ударной волны, а также переходные состояния неустойчивости были зафиксированы на видеоролики с частотой 1200 кадров в секунду. Таким образом была получена раскадровка по соответствующим этапам, моментов неустойчивости пламени при давлении УВ в 190 Па, а также моментов тушения УВ мощностью в 215 Па, и 316 Па.

**Выводы:** В работе теоретически обоснована и экспериментально установлена высокая эффективность тушения диффузионного пламени н-Гептана ударной волной мощностью около 215 Па в камере на расстоянии до 2-х метров. Теоретически установлено возможный механизм взаимодействия системы ударная волна - пламя, который в результате отрыва пламени приводит к изменению таких параметров, как концентрация реагирующих компонентов в зоне горения, давления, внесение в зону горения дополнительных газовых компонентов, а также резкого снижения температуры газовой среды вокруг пламени. Предложенный способ тушения может обеспечивать эффективное тушение диффузионного пламени на начальной стадии горения в замкнутых и труднодоступных местах, а также емкостей с горючими жидкостями.

**Ключевые слова:** пожар, ударная волна, пожаротушение, огнетушащий, диффузионное пламя

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

#### ABSTRACT

**Objective:** To determine the effectiveness of extinguishing diffusion flames of n-heptane with a shock wave (SW). Establishing a possible mechanism of suppression of diffusion flame with a shock wave on n-heptane  $C_7H_{16}$  flame. Determination of the intensity of the shock wave, which leads to extinguishing n-heptane flame under a special camera.

**Methods:** To determine the possibility for extinguishing the diffusion flame by a shock wave, which occurs during the explosion of a pyrotechnic charge, equipment that looked like a camera with volume of 0.5 m<sup>3</sup> was installed. A surge generator was placed inside it and a crucible with n-heptane was located at a distance of 1.75 m. The pressure measurement at the front of the shock wave was conducted using BMP-180 pressure sensor for Arduino controllers. Visualization of the extinguishing process of the shock wave was carried out using Nikon 1 j4 camera with the possibility of obtaining frames at a speed of 1200 frames per second.

**Results:** This article presents as an experiment that the impact of a shock wave with front pressure of about 215 Pa in the chamber at a distance up to 2 meters on n-heptane flame, leads to its suppression by tearing and defragmentation. Time periods, which confirm the effectiveness of fire-extinguishing of the shock wave, and the transition states of instability have been recorded on video at a frequency of 1200 frames per second. This way respective stages of the storyboard, time periods of flame instability at a pressure of 190 Pa SW, and extinguishing time capacity SW of 215 and 316 Pa were obtained.

**Conclusions:** Extinguishing diffusion flames of n-Heptane shock wave with a power equal to approximately 215 Pa created in the chamber at a distance of 2 meters were theoretically analyzed and experimentally proven to be highly effective. Based on presented theoretical deliberations a possible mechanism of interaction of shock wave - flame was created. As a result of tearing of the flames, reduction of the following parameters takes place: concentration of the reactants in the combustion zone, pressure, introducing additional gaseous components into the combustion zone, and a sharp decrease in temperature of gas around the flame. The proposed extinguishing method can guarantee efficient extinguishing of diffusion flames at the initial stage of a fire in hard to reach places and spaces with flammable liquids.

**Keywords:** fire, shock wave, fire extinguishing, fire suppression, diffusion flame

**Type of article:** original research article

<sup>1</sup> Львовский государственной университет безопасности жизнедеятельности / Lviv State University of Life Safety, Ukraine; bagr33@ukr.net;

<sup>2</sup> Эту статью наградили Редакционный Совет /This article was recognised by the Editorial Committee;

## ABSTRAKT

**Cel:** Zbadanie skuteczności gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu falą uderzeniową. Określenie możliwego mechanizmu gaszenia płomienia dyfuzyjnego falą uderzeniową na przykładzie płomienia n-heptanu  $C_7H_{16}$ . Ustalenie mocy fali uderzeniowej, przy której rozpoczyna się proces gaszenia w warunkach laboratoryjnych przy użyciu specjalnej komory.

**Metody:** W celu określenia możliwości gaszenia płomienia dyfuzyjnego falą uderzeniową, która powstaje podczas eksplozji ładunku pirotechnicznego przygotowano specjalnie wyposażone stanowisko z komorą o objętości  $0,5m^3$ , w której umieszczono generator fal uderzeniowych, a w odległości 1,75 m tygiel z n-heptanem. Pomiar ciśnienia na froncie fali uderzeniowej wykonywany był z pomocą czujnika ciśnienia i temperatury BMP-180 dla kontrolerów Arduino, praca którego oparta jest na działaniu piezorezystancyjnym. Wizualizację procesu gaszenia falą uderzeniową przeprowadzono z wykorzystaniem kamery Nikon 1 j4 z możliwością zapisu ujęć z prędkością 1200 kadrów na sekundę.

**Wyniki:** W artykule wykazano eksperymentalnie, że wpływ fali uderzeniowej o ciśnieniu na jej froncie wynoszącym ok. 215 Pa na płomień n-heptanu w komorze w odległości do 2 metrów, prowadzi do jego tłumienia poprzez rozerwanie i defragmentację. Zakresy czasowe, które potwierdzają skuteczność gaszenia falą uderzeniową oraz przejściowe stany niestabilności zostały zarejestrowane na taśmę wideo z prędkością 1200 kadrów na s. W ten sposób otrzymano serię ujęć każdego etapu, okresów niestabilności płomieni przy ciśnieniu fali uderzeniowej równej 190 Pa, oraz chwili gaszenia fali o mocy 215 i 316 Pa.

**Wnioski:** W pracy przeanalizowano teoretycznie oraz udowodniono eksperymentalnie wysoką skuteczność metody gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu falą uderzeniową o mocy równej ok. 215 Pa powstałą w komorze, w odległości do 2 metrów. Na podstawie przedstawionych rozważań teoretycznych opracowano możliwy mechanizm oddziaływania fali uderzeniowej – płomień. W wyniku rozerwania płomieni dochodzi do spadku parametrów takich jak: koncentracja substratów reakcji w strefie spalania, ciśnienia oraz wprowadzenia do strefy spalania dodatkowych składników gazowych oraz gwałtownego spadku temperatury gazów wokół płomienia. Zaproponowana metoda gaśnicza może zagwarantować skuteczne gaszenie płomieni dyfuzyjnych w ich początkowym stadium w zamkniętych i trudno osiągalnych miejscach oraz pomieszczeniach z płynami palnymi.

**Słowa kluczowe:** pożar, fala uderzeniowa, gaszenie pożarów, gaśniczy, płomień dyfuzyjny

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

## 1. Введение

Эффективность тушения пожаров в значительной степени зависит от способа подачи, качества и количества огнетушащих веществ, которые применяются для тушения. С позиции сложности тушения отдельного внимания заслуживают пожары горючих жидкостей, во время которых с первых моментов возникновения достигают максимальных показателей, - температура горения может составлять до  $1400^{\circ}C$  и больше, высокая скорость распространения пламени, а также возможность быстрого растекания горючей жидкости с распространением горения на соседние объекты [1]. Для обеспечения тушения таких пожаров подача огнетушащих средств должна быть быстрой и с необходимой интенсивностью. Если необходимая интенсивность подачи огнетушащего средства достигнута не будет – быстрого тушения также достигнуто не будет. В качестве огнетушащих средств для таких пожаров чаще всего используют пенные, порошковые, газовые, а также водяные системы тушения. Они обеспечивают достаточно высокую эффективность тушения, но имеют ряд недостатков, основные из которых, это загрязнение места тушения химическими агентами, проблематичность подачи в труднодоступные места (высоты, подвалы, технологические установки и т.д.), и необходимость достижения необходимой интенсивности подачи огнетушащего вещества для тушения, собственно проведения так называемой пенной атаки, которая требует накопления соответствующего количества сил и огнетушащих средств.

Всегда было известно, что небольшое пламя легко можно задуть сильным ветром или направленной струей газа или воздуха. Условия, возникающие при таком воздействии, частично напоминают действие ударной волны. В последнее время, для достижения быстрого тушения масштабных пожаров в труднодоступных местах используются ударные волны [2]. Наиболее часто ударные волны применяют в основном для тушения лесных пожаров, в том числе в горной местности и степных пожаров, возникающих на больших площадях и быстро распространяющихся, а также иногда для тушения газонефтяных фонтанов [3]. Ударная волна позволяет эффективно и быстро тушить пожары на почти любой высоте и в любом положении очага горения и обеспечивает бо-

лее полное действие на пламя в отличие от воды и порошков, которые стекают, или газов и аэрозолей для эффективного действия, которых необходима соответствующая концентрация. В настоящее время ударные волны для тушения пожаров, а в частности горючих жидкостей на открытых пространствах и в замкнутых объемах, не применяются, соответственно использование преимуществ и определение условий тушения ударными волнами диффузионного пламени горючих жидкостей в настоящее время является актуальной и плохо исследованной научно-технической проблемой.

## 2. Анализ результатов последних исследований

При прохождении ударной волны (УВ) через газовую среду происходит формирование соответствующих зон высокого давления и релаксационной зоны низкого давления, которые собственно, и образуют ударную волну [4]. Таким образом, действие УВ на газовую среду и пламя обеспечит мгновенное изменение почти всех параметров пламени, что может привести при достижении определенных значений давления на фронте УВ к его тушению. При прохождении ударной волны через газовую среду газовая компонента ускоряется и сжимается. За ударной волной в зоне релаксации происходит постепенное выравнивание скоростей течения и температуры компонентов [4]. Структура ударной волны рассмотрена в гидродинамике как разрыв, что на самом деле является переходным слоем конечной протяженности, которую называют шириной ударной волны. [5] В нем происходят необратимые процессы перехода вещества из исходного состояния перед ударной волной в конечное состояние за ней. Ударные волны возникают при взрывах, при сверхзвуковых движениях тел, мощных электрических разрядах, быстрых вытеканиях газов и тому подобное. Например, при взрыве образуются высоконагретые продукты взрыва, обладающие большой плотностью и высоким давлением. В начальный момент они окружены воздухом, находящимся при нормальной плотности и атмосферном давлении. Продукты взрыва, расширяясь, сжимают окружающий воздух, причем в каждый момент времени сжатым оказывается лишь воздух, находящийся в определенном объеме, а за этим объемом воздух оста-

ется в невозмущенном состоянии. Со временем, объем сжатого воздуха возрастает, а поверхность ударной волны – фронт, распространяется в пространстве [5]. Прохождение ударной волны через газовую среду при условии прохождения через пламя может привести к его динамическому отрыву. Динамично сбить пламя можно при условии, если будет достигнута достаточная мощность воздушного потока, который обеспечивает отрыв зоны горения со скоростью, превышающей скорость распространения пламени, и уменьшение температуры в зоне реакции горения до температуры затухания -1273 К [6]. Ударные волны отличаются от звуковых волн тем, что могут передавать гораздо больше энергии, которая переносится перемещением газовой среды в направлении распространения фронта ударной волны. Кроме этого, скорость ударной волны зависит от ее интенсивности, что не свойственно для звуковых волн. Но тем не менее, ударная волна имеет определенное сходство со звуковой волной, заключающееся в ее структуре и в процессах, протекающих в ее фронте. А в случае, когда ударная волна является слабой то она мало чем отличается от звуковой [3]. Так в работах [7- 9] авторы четко подтвердили эффект гашения звуковой волной. В работе [7] указано, что технология тушения пламени акустической волной может стать элементом поддержки пожарной безопасности складов, промышленных зданий, резервуаров с горючей жидкостью, а в работе [10] показано, что звуковая волна хорошо тушит пламя в условиях пониженной гравитации при частоте 30 Гц. Обобщающим недостатком рассмотренных методов тушения звуковой волной является, что для получения мощной звуковой волны необходимо специальное оборудование, а также то, что эффективное тушение происходит на достаточно малом расстоянии от источника звуковых волн (20-100 см), что значительно меньше расстояния в несколько метров, а при большей мощности УВ и десятков метро, эффективного огнетушащего действия УВ. Таким образом, для тушения более масштабных пожаров можно эффективно использовать ударные волны, которые несут на значительно большие расстояния гораздо больше энергии, чем звуковые волны.

В работе [11] показано способы и условия применения ударных волн, а также устройство для тушения низовых лесных пожаров, действие которого заключается в концентрации энергии ударной волны на определенном участке лесного пожара. Изучением действия ударных волн при тушении лесных пожарах занимались авторы работ [12-16]. В них рассмотрены эффективность тушения ударными волнами различных видов лесных пожаров. Общим выводом является то, что влияние на пламя мощной УВ с позиции тушения является эффективным и может привести к полному тушению пламени при условиях концентрации энергии ударной волны в указанном секторе и ее достаточной мощности.

Существует большая вероятность того, что в основном огнетушащий эффект ударной волны заключается в динамическом воздействии газовой среды на пламя. Аналогично, например, при воздействии на пламя ветра со скоростью 2 м/с, пламя отклоняется на 45°, при этом значительно увеличивается коэффициент захвата воздуха [17] который может привести к резкому охлаждению и отрыву пламени за счет уменьшения скорости сгорания. Подобные условия воспроизводятся при прохождении ударной волны через пламя, но скорость прохождения ударной волны намного больше, чем 2 м/с и составляет не меньше скорости звука - 340 м/с. Понятно, что разница между ударной волной и дуновением ветра заключается

в мощности и скорости воздействия на пламя. Действие ударной волны, как и бокового ветра, приведет к дестабилизации пламени в пространстве и потери им своей соответствующей структуры. При воздействии ударной волны в момент ее прохождения через пламя может произойти его частичная турбулизация. А при турбулизации, как известно, происходит захват еще больших газовых объемов, которые окружают пламя, что приведет к достижению более неустойчивого состояния, когда пламя может оторваться [17]. Исходя из этого, очевидно, что ударная волна приведет к эффекту тушения только при условии соответствующей мощности, векторе подачи, обеспечивая отрыв пламени и соответственно дальнейшее его тушение. Но в этом случае возможно дальнейшее восстановление горения из-за повторного возгорания от бортов резервуара, или нагретых конструкций.

Таким образом, для определения эффективности тушения предложенным методом необходимо определить безопасные и одновременно эффективные с точки зрения тушения мощности ударных волн. Исходя из этого, диапазон исследуемых давлений, был определен учитывая безопасные мощности ударных волн, которые не могут привести к значительным разрушениям конструкций и травматическим воздействиям на человека, что составляет соответственно до 500 Па, что составляет 1/20 от безопасного давления для человека [18].

Также указанный диапазон давления ударной волны подтверждается анализом подобных исследований, но со звуковым воздействием на пламя. Так в работе [19] указано, что горение диффузионного пламени прекращается при минимальном звуковом давлении около 35-45 Па, но при этом не указано время воздействия, при котором горение прекращалось.

Исходя из этого, можно предположить, что действие ударных волн, возможно, будет на уровне эффективности действия звуковых колебаний, или даже более эффективным, а так как время воздействия УВ на пламя ничтожно мало и предположительно составляет около 10 мс, то вероятно, что давление в фронте УВ должно быть больше.

Таким образом, исходя из теоретических соображений относительно эффективности ударной волны, можно сказать, что ударная волна может обеспечить еще более высокий огнетушащий эффект за счет более высокой мощности и скорости действия на пламя.

Таким образом, можно утверждать, что действие ударной волны на пламя должно привести к реализации таких эффектов; - смещение пламени от места вытекания (рис. а); отрыва пламени от места вытекания горючего газа или пара (рис. б); в результате турбулизации и захвата объемов холодного воздуха приведет к дроблению пламени сначала на крупные, а потом на более мелкие фрагменты и дальнейшее его тушение – рис с, что подтверждается в работе автора [7].

### 3. Цель работы

Исходя из проведенного анализа в области исследований по использованию ударной волны для пожаротушения, можно сформировать цель работы, которая заключается в определении эффективности тушения диффузионного пламени жидкостей на примере пламени n-гептана ударной волной и выявление возможного механизма тушения.

### 4. Методы исследований

Для определения огнетушащей эффективности ударной волны мощностью от 100 Па до 215 Па при тушении

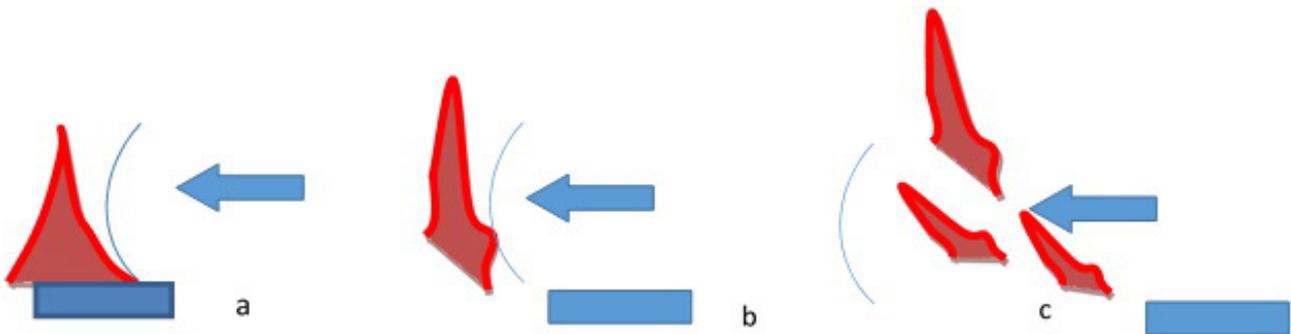


Рис. 1. Стадии прохождения ударной волны через диффузионное пламя. Стрелкой указано направление ударной волны  
 Fig. 1. Stages of shock wave passing through the diffusion flame. Arrows indicate the direction of the shock wave

Источник: Собственная разработка.  
 Source: Own elaboration.

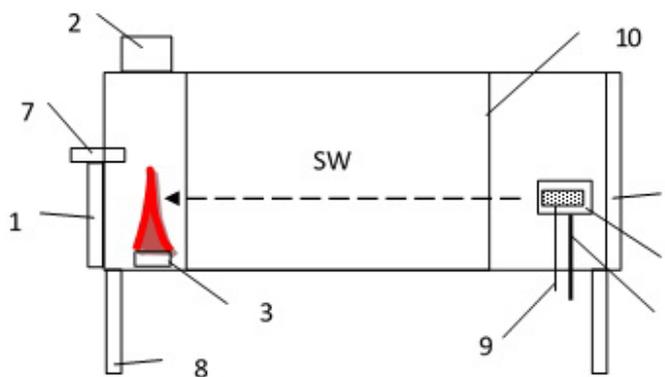


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения огнетушащей эффективности ударной волны. 1. Люк для тигля; 2. Вентиляционное отверстие с вентилятором и защелкой; 3. Тигель; 4. Люк; 5. Генератор ударных волн; 6. Крепление генератора ударных волн; 7. Измеритель давления УВ; 8. Стойки; 9. Электровоспламенитель; 10. Смотровое окно

Fig. 2. Experimental stand for determining the extinguishing effectiveness of the shock wave. 1. Cover for a crucible with a ventilator and latch; 3. Crucible; 4. Cover; 5. Shock waves generator; 6. Fixing of the shock waves generator; 7. Schock wawe pressure gauge;

8. Rack; 9. The electric spark; 10. Viewing window  
 Источник: Собственная разработка.  
 Source: Own elaboration.

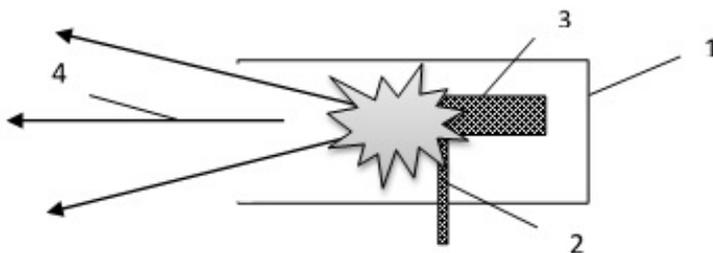


Рис. 3. Генератор ударных волн  
 1. Корпус генератора ударных волн; 2. Электровоспламенитель; 3. Пороховой заряд; 4. Направление движения ударных волн

Fig. 3. Shock waves generator  
 1. Housing of the shock waves generator; 2. Electric spark; 3. Powder charge; 4. Direction of the shock waves

Источник: Собственная разработка.  
 Source: Own elaboration.

пламени н-гептана в тигле диаметром 40 мм, был проведен эксперимент в камере по следующей методике.

Экспериментальная установка, (рис. 2) выполнена следующим образом: камера с передней панелью размерами - длина 1980 мм, ширина 485 мм, высота 530 мм в которой два люка для внесения тиглей, генератор ударных волн и датчик давления и температуры BMP-180 для контроллеров Arduino, со временем реакции не более 7,5 мс в нормальном режиме измерения, который имеет следующие характеристики [20]. Для контроллера Arduino UNO была использована программа для вывода показателей датчика в интерфейсе CoolTerm.\_0.stk\* [21]. Полученные данные давления показывались сначала в CoolTerm.\_0.stk\*, копировались и в Excel строились графики. Датчик был установлен в камере на расстоянии 1,75 метра от генератора ударных волн. Эксперимент проводился следующим образом. В камере устанавливался тигель диаметром 40 мм и глубиной 35 мм с предварительно зажженным за 20 секунд гептаном, на расстоянии 1750 мм от генератора ударных волн, после чего задействовали генератор ударных волн (рис. 5) пропускаемая по камере ударную волну соответствующей мощности и фиксировали результат - «тушение», «не тушение», «изменения в пламени». После каждой попытки объем камеры продували, для следующего опыта.

После проведения эксперимента избранные состояния были зарегистрированы на камеру Nikon 1 J4 с частотой

той съемки около 1200 кадров секунду. Из полученных видеороликов была сделана раскадровка соответствующих моментов. В качестве источника серий ударных волн использовали генератор ударных волн рис.3., который располагали на расстоянии 1,75 м, от тигля с гептаном. Сам генератор ударных волн (рис. 3) представляет собой трубу диаметром 70 мм и отверстием в задней крышке 7 мм, для зажигания пиротехнического заряда внутри генератора. Зажигание заряда осуществляли источником тока напряжением около 20 вольт.

## 5. Результаты

По данной методике были получены результаты экспериментов по определению огнетушащей эффективности ударной волны мощностью в 215 Па, и 316 Па. Результаты измерения мощности ударной волны датчиком BMP-180 показаны на графиках (рис. 4) и (рис. 5), а результаты эксперимента по определению огнетушащей эффективности ударной волны указаны в таблице 1.

Как оговаривалось выше, моменты, которые подтверждали огнетушащую эффективность, а также переходные состояния нестабильности были зафиксированы камерой Nikon 1 j4 с частотой 1200 кадров в секунду. Соответственно был зафиксирован момент нестабильности пламени при давлении УВ в 190 Па (рис. 6), моменты тушения одинарной ударной волной мощностью УВ в 316 Па (рис. 7), и мощностью в 215 Па (рис. 8).

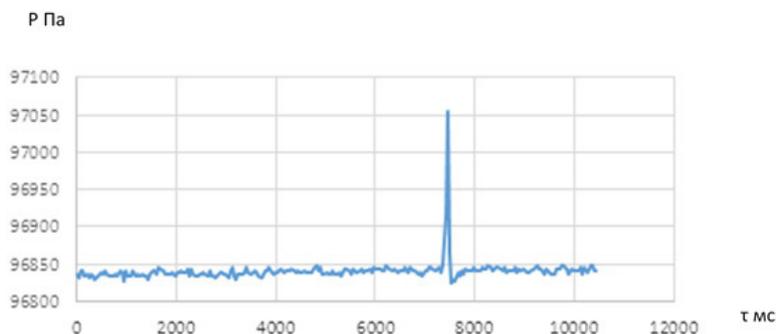


Рис. 4. Ударная волна мощностью в 215 Па, время ( $\tau \approx 250$  мс)

Fig 4. Shock wave with a power of 215 Pa, time ( $\tau \approx 250$  ms)

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

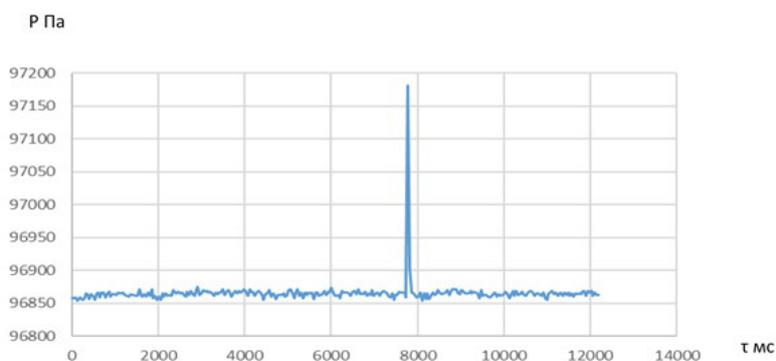


Рис. 5. Ударная волна мощностью в 316 Па, время ( $\tau \approx 200$  мс)

Fig 5. Shock wave with a power of 316 Pa, time ( $\tau \approx 200$  ms)

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

## 6. Дискуссия о методах и результатах

Результаты эксперимента показали, что в диапазоне мощностей от 100 до 160 Па пламя испытывает определенное влияние, что приводит к его незначительной нестабильности, но не тушению. При этом пламя турбулизируется, как правило увеличивается в объеме, иногда немного отрывается, но до дефрагментации, после которой происходило бы тушение, не доходит. После этого пламя стабилизируется. Так при действии ударной волны с давлением в фронте около 190 Па время возмущения пламени равнялось около 800 мс. При раскадровке, показанной на рисунке 6, можно было заметить этапы прохождения УВ и состояние пламени при этом. Так на рисунке 6.1 показан контакт фронта УВ с пламенем. Стрелкой указано место расположения тигля, большей стрелкой направление движения ударной волны, видна характерная дуга подхода УВ к пламени (время  $\tau$  около 5 мс); рис. 6.2. – видимый сдвиг пламени от поверхности

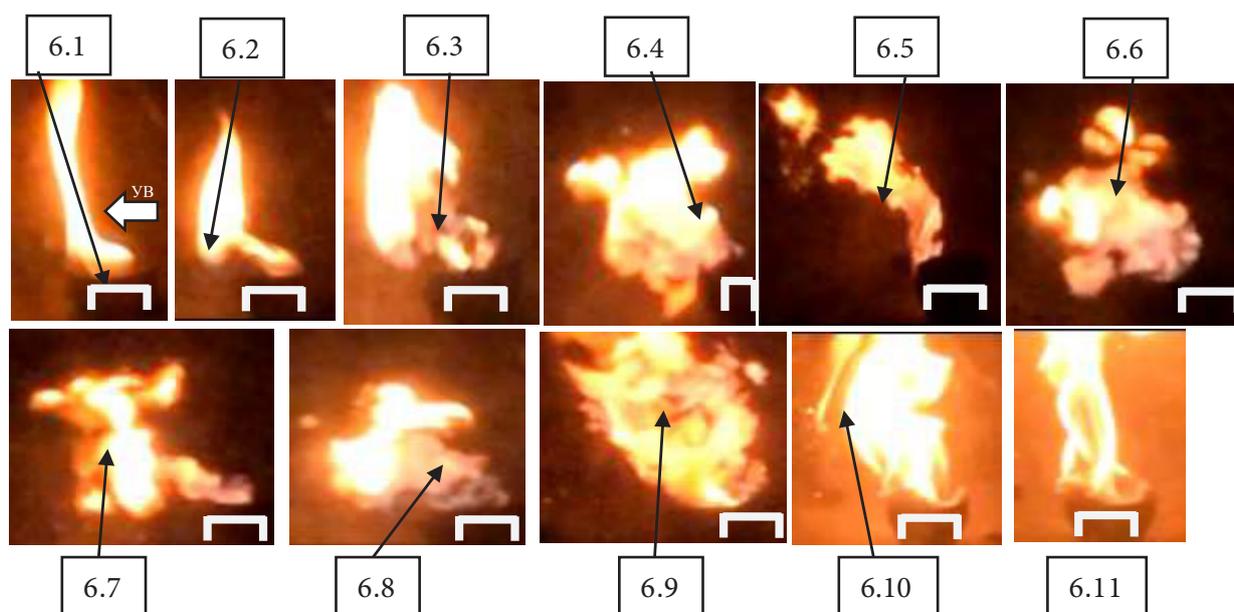
на целый корпус тигля  $\tau = 25$  мс; рис 6.3. – начало отрыва, стрелкой указана зона отрыва, пламя растягивается и увеличивается в размерах  $\tau = 42$  мс; рис. 6.4 – частичный обрыв и четкая турбулизация пламени; рис. 6.5. - удлинение пламени, частичная дефрагментация; рис. 6.6. – увеличение объема, турбулизация и дефрагментация пламени, снижение температуры на отдельных участках – изменение цвета. рис 6.7- 6.9 – увеличенный объем, турбулизация, дефрагментация; рис. 6.10 - 6.11 - возвращение пламени в стабильное состояние  $\tau = 800$  мс. Как видно в начальном этапе взаимодействия с УВ, пламя проходит несколько характерных этапов которые могут привести к тушению в начальной стадии при достаточной мощности УВ. Но если мощности УВ не хватает – существенного отрыва пламени от поверхности горячей жидкости не будет пламя переходит в нестабильное состояние, в котором пребывает около секунды, и возвращается в исходное состояние.

**Таблица 1.** Огнетушащая эффективность УВ при воздействии ударной волны мощностью от 100 Па до 215 Па на расстоянии 1,75 м при тушении n-гептана  $C_7H_{16}$   
**Table 1.** Fire extinguishing effectiveness when exposed to hydrocarbon shock wave output power of 100 Pa to 215 Pa at a distance of 1.75 m in fire n-heptane  $C_7H_{16}$

№ / No.	P / Па	Результат / The result
1	100	Без изменений / Unchanged
2	130	Небольшая турбулизация пламени / Small turbulization of the flame
3	160	Турбулизация, частичный отрыв пламени / Turbulence, partial separation of the flame
4	190	Турбулизация, крайняя нестабильность, отрыв пламени (рис. 6) / Turbulence, the extreme volatility, separation of the flame (fig. 6)
5	215	Дефрагментация, тушение пламени через отрыв (рис. 7) / Defragmentation, the extinguishing of the flame through the gap (fig. 7)

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.



**Рис. 6.** Раскадровка момента воздействия на пламя ударной волны мощностью 190 Па, время ( $\tau \approx 800$  мс). Стрелкой указано направление ударной волны

**Fig. 6.** Storyboard moment of impact on the shock wave flame capacity of 190 Pa, time ( $\tau \approx 800$  ms). The arrow indicates the direction of the shock wave

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

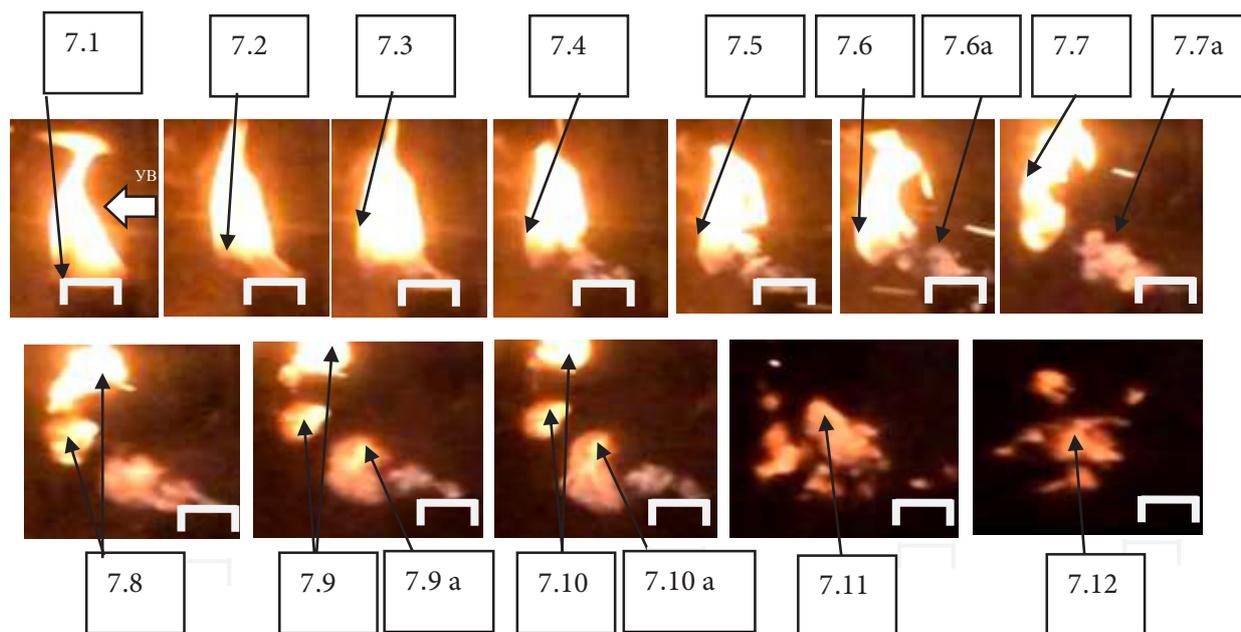


Рис. 7. Раскадровка момента тушения пламени гептана  $C_7H_{16}$  ударной волной с мощностью 215 Па. время ( $\tau \approx 350$  мс).

Стрелкой указано направление ударной волны

Fig. 7. Storyboard the moment flame extinguishing heptane  $C_7H_{16}$  shock wave with a capacity of 215 Pa time ( $\tau \approx 350$  ms)

The arrow indicates the direction of the shock wave

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

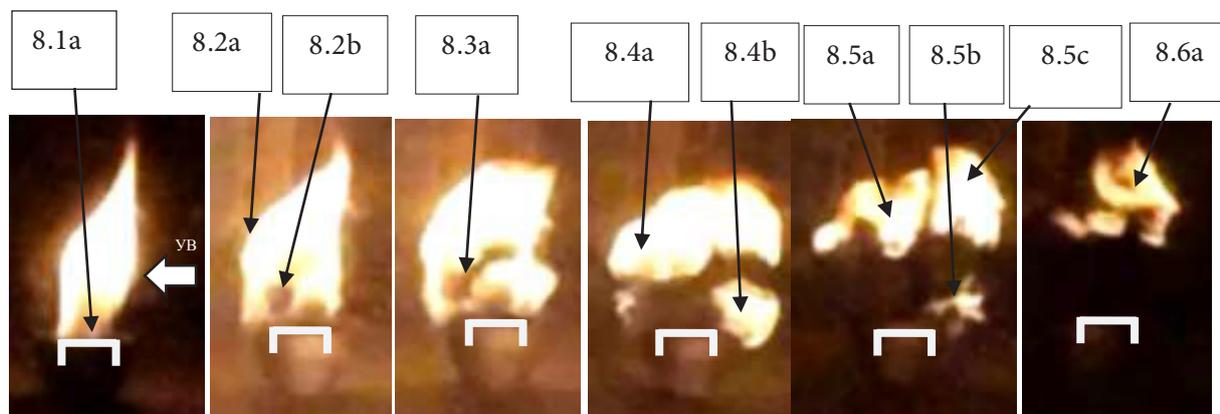


Рис. 8. Раскадровка момента тушения пламени n-гептана  $C_7H_{16}$  ударной волной мощностью 316 Па. время ( $\tau \approx 300$  мс).

Стрелкой указано направление ударной волны

Fig. 8. Storyboard moment of extinguishing flames of n-heptane  $C_7H_{16}$  with the shock wave of 316 Pa, time ( $\tau \approx 300$  ms).

The arrow indicates the direction of the shock wave.

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Следующая серия опытов была проведена с УВ большей мощности, влияние которой привело к тушению пламени. При воздействии ударной волны давлением около 215 Па тушение происходило следующим образом. (рис. 7.1) Начало влияния УВ на пламя, стрелкой указано место тигля, большей стрелкой направление движения ударной волны; рис. 7.2 – стрелкой указано крайнюю точку смещения пламени при контакте с фронтом УВ; рис. 7.3 – дальнейшее смещение и частичный отрыв пламени; рис. 7.4 – отрыв пламени на размер пламени от тигля. Стрелкой указано крайнюю точку смещения;

рис.7.5 – отрыв пламени. Стрелкой указано крайнюю точку от тигля; рис. 7.6. Отрыв и начало дефрагментации пламени; рис. 7.7 – полный отрыв пламени. Начало дефрагментации. рис. 7.8 – разделение пламени на 3 части; рис. 7.9.-7.10. – дальнейшая дефрагментация на более мелкие части; рис. 7.11-7.12 – рассеивание частей пламени, тушение.

В случае тушения ударной волной давлением около 215 Па процесс можно разделить на 3 условных этапа. Первый этап включает в себя влияние зоны с избыточным давлением на пламя, эффект от которого видно на

рис 7.2-7.7. При этом происходит отрыв пламени и образование зоны нагретых газов и продуктов горения между пламенем и поверхностью тигля, что можно увидеть по «следу», оторванного пламени, который, судя по цвету газа имеет меньшую температуру. При этом в процессе отрыва пламени этот «след» становится более длинным, и параллельно отрыву, в нем происходит догорание горючей смеси, что видно на рис 7.9а и 7.10а. Далее идет этап, на котором на пламя действует зона релаксации, под действием которой пламя растягивается и дефрагментируется – рис. 7.8-7.10а. При этом четко заметно образование трех отдельных объектов пламени – рис. 7.9-7.9а, а также 7.10-7.10а. После прохождения УВ образованные фрагменты пламени догорают, рассеиваются и тухнут – рис. 7.11-7.12.

При дальнейшем увеличении мощности УВ процесс тушения происходит немного быстрее по несколько другому механизму. Процесс тушения УВ мощностью около 316 Па показан на рис 8. Как видим, при прохождении УВ через пламя н-гептана, оно немного сдвигается от края тигля – и начинает уже фрагментироваться (время получения кадра ~20 мс) (рис. 8, позиция 8.2а и 8.2б), дальше идет дальнейшая дефрагментация пламени и его разделение на отдельные объекты (позиция 8.3а, 8.4а, 8.4б). Далее пламя отчетливо дефрагментируется на 3 фрагмента, которые еще больше отрываются от края тигля и разлетаются в разные стороны (рис. 8.5а, 8.5б, 8.5с). После дефрагментации пламя тухнет (рис. 8.6а).

Таким образом, из проведенных исследований огнетушащей эффективности УВ следует, что огнетушащая эффективность ударной волны в условиях испытательной камеры достаточно высокая, как и теоретически было спрогнозировано и обосновано. Эксперимент показал, что действие ударной волны мощностью около  $\Delta P = 215$  Па (+35 Па) на пламя н-гептана приводит к тушению через видимый отрыв и дефрагментацию пламени, а давление в 316 Па приводит к более эффективному тушению уже сразу после незначительного отрыва происходит дефрагментация.

В результате растяжения пламени в зоне горения при прохождении УВ значительно снижается адиабатная температура горения. Таким образом, если температура горения снизится к  $1000^{\circ}\text{C}$  [6] процесс горения прекратится, что вполне вероятно при воздействии УВ на пламя и на пространство вокруг него.

Понятно, что действие ударной волны выведет газовую смесь за пределы стехиометрической концентрации, а то и за пределы области воспламенения, соответственно увеличится объем не прореагировавших избыточных компонентов реакции, что подтверждается кадрами, на которых видно изменение цвета пламени (рис. 7.6а, 7.7а, 7.9а, 7.10а), что соответственно приведет к резкому снижению тепловыделения пламени и, как следствие, температуры горения, и в результате к тушению ударной волной, что подтверждается в работе [22].

Из результатов эксперимента видно, что использование ударных волн для тушения является достаточно эффективным, но при этом они должны обладать достаточной мощностью, чтобы обеспечить эффект тушения.

## 7. Выводы

В работе теоретически обоснована и экспериментально установлена высокая эффективность тушения диффузионного пламени н-Гептана ударной волной мощностью около 215 Па в камере на расстоянии до 2-х метров. Теоретически установлено возможный механизм вза-

имодействия системы ударная волна – пламя, который в результате отрыва пламени приводит к изменению таких параметров, как концентрация реагирующих компонентов в зоне горения, давления, внесение в зону горения дополнительных газовых компонентов, а также резкого снижения температуры газовой среды вокруг пламени. Предложенный способ тушения может обеспечивать эффективное тушение диффузионного пламени на начальной стадии горения в замкнутых и труднодоступных местах, а также емкостей с горючими жидкостями.

## Литература

- [1] Demidov P.G., *Gorenye i svoystva goryuchykh veshchestv*, Khimiya, Moskva 1973, 248.
- [2] Kopylov N.P., Moskvlyyn E.A., Zharkov V., Sushkyna E.Yu., *Tusheniye ochagov pozhara vzryvom*, [w:] *Krupnye pozhary: preduprezhdeniye y tusheniye*. Sbornik tezysov. dokl. mater. XVI nauchno-prakticheskoy konferencii, VNIIPPO, Moskva 2001, 27-28.
- [3] Lugovtsov B.A., *Vzryv tushit pozhar*, <http://www.hydro.nsc.ru/institute/history/person/Lugovtsov4.php> [dostup: 16.03.2016].
- [4] Girschfeld J., Kertiss Ch., Berd R., *Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey*, Izdatel'stvo inostrannoy literatury, Moskva 1961, 928.
- [5] Zel'dovych Ya.B., Rayzer Yu.P., *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy*, Nauka, Moskva 1966, 686.
- [6] Abduragimov I.M., Govorov V.Yu., Makarov V.E., *Fyzyko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov*, VPTSh MVD SSSR, 1980, 255.
- [7] Węsierski T., Wilczkowski S., Radomiak H., *Wygazanie procesu spalania przy pomocy fal akustycznych*, BiTP Vol. 30 Issue 2, 2013, pp. 59-64.
- [8] Poisot T., Yip B., Veynante P., Trouve A., Samaniego J. M., Candel S., *Zero-g acoustic fire suppression system*, "Journal de Phisique III", Issue 2, 1992, p. 1331.
- [9] Anthony S., *DARPA creates sound-based fire extinguisher*, <http://www.extremetech.com/extreme/132859-darpa-creates-sound-based-fire-extinguisher>, [dustup: 16.03.2016].
- [10] Beisner E., Wiggins N.D., Kwok-Bun Y., Rosales M., Penny J., Lockridge J., Page R., Smith A., Guerrero L., *Acoustic Flame Suppression Mechanics in a Microgravity Environment*, "Microgravity Sci. Technol." Vol. 27, 2015, pp. 141.
- [11] Grishin A.M., Zima V.P., Kasymov D.P., *Primeneniye vzryvchatykh veshchestv v ustroystvakh lokalyzatsii i tusheniya prirodnykh pozharov*, "Pozharovzryvobezopasnost" Vol. 24. Issue 7, 2015, pp. 52-60.
- [12] Kurbatskiy N.P., Valendik E.N., *Lokalyzatsiya lesnykh pozharov nakladnymi shnurovymi zaryadami*, Krasnoyarskiy rabochiy, Krasnoyarsk 1970, 320-332.
- [13] Reva V., Kutsenko L.M., *Metod otsenki intensivnosti vozdeystviya udarnoy volny napravlennoy vzryva dlya tusheniya lesnykh pozharov*, KhYPP, Kharkiv 1998, 80.
- [14] Grishin A., *Interaction of shockwaves with tree crowns and the front of crown forest fires*, [w:] *Shockwaves @ Marseille III. Shockwaves in condensed matter and heterogeneous media*, R. Brun, Z. Dumitrescu (ed.), Springer, 1993.
- [15] Grishin, A.M., Perminov, V.A., *Mathematical modeling of the ignition of tree crowns*, "Combustion, Explosion and Shock Waves" Vol. 34 Issue 4, pp. 378-386.
- [16] Grishin, A.M., Golovanov A.N., *Extinction of Combustible Forest Materials by Constant and Varying Actions of an Inert Gas Flow in the Combustion Zone*, "Combustion, Explosion, and Shock Waves" Vol. 37 Issue 5, 2001, pp.558-562.
- [17] Drysdale D., *Vvedeniye v dinamiku pozharov*, K. Bomshiteyn (perevod), Moskva 1985, 423.
- [18] *Deystviye udarnoy volny na cheloveka, zdaniya i sooruzheniya*, <http://studopedia.org/1-18377.html> [dostup: 16.03.2016].
- [19] Radomiak H., Mazur M., Zajemska M., Musiał D., *Gaszenie płomienia dyfuzyjnego przy pomocy fal akustycznych*, BiTP Vol. 40 Issue 4, 2015, pp. 29-38.
- [20] BMP180 Digital pressure sensor - data sheet.

- <https://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf> [accessed: 16.03.2016].
- [21] Roger Meier's Freeware Website, <http://freeware.the-meiers.org/> [accessed: 16.03.2016].
- [22] Sturmer J., McDonald A., *Blasts, shockwaves could be deployed to battle fast-moving bushfires*, <http://www.abc.net.au/news/2014-05-21/blasts-shockwave-could-join-battle-against-fast-moving-bushfire/5468038> [accessed: 16.03.2016].

\* \* \*

**Баланюк Владимир Мирчевич** – докторант, кандидат технических наук, доцент. В 2007 году защитил диссертацию по специальности пожарная безопасность. С 2007 года работает на кафедре процессов горения и химии Львовского государственного университета безопасности жизнедеятельности. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов горения, аэрозольные, порошковые, газовые, комбинированные средства пожаротушения, огнезащитные покрытия для древесины и металлов.