

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

Przyjęty/Accepted/Принята: 21.07.2016;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 14.09.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Повышение эффективности газового пожаротушения ударной волной

Increasing the Effectiveness of Fire Extinguishing using a Gas Method which Applies a Shock Wave

Zwiększenie skuteczności gaszenia pożarów metodą gazową z wykorzystaniem fali uderzeniowej

АННОТАЦИЯ

Цель: Определение параметров повышения огнетушащей эффективности CO_2 и N_2 , а также мощности ударной волны при их совместном комбинированном действии на диффузионное пламя н-гептана C_7H_{16} . Определение особенностей тушения диффузионного пламени н-гептана в условиях специальной камеры, предложенной комбинированной системой.

Методы: Для определения возможности тушения диффузионного пламени н-гептана, комбинированным действием газов CO_2 или N_2 и ударной волны которая возникает при взрыве пиротехнического заряда, было оборудовано установку в виде камеры объемом $0,5 \text{ м}^3$, в которой размещен генератор ударных волн, а на расстоянии $1,75 \text{ м}$, от него – тигель с н-гептаном. Газ подавали через газовый счетчик. Измерение давления в фронте ударной волны осуществляли с помощью датчика давления и температуры BMP-180 для контроллеров Arduino, работа которого основана на пьезорезистивном принципе. Съемка процесса тушения комбинированным действием газов CO_2 и N_2 и ударной волной была проведена с помощью камеры Nikon 1 j4 с возможностью получения кадров со скоростью 1200 кадров в секунду.

Результаты: В работе теоретически обосновано и экспериментально определено, что комбинированное воздействие на пламя н-гептана, ударной волны и газов CO_2 или N_2 , в камере на расстоянии до 2-х метров приведет к его затуханию через отрыв и дальнейшую фрагментацию. При этом экспериментально определено, что огнетушащее действие ударной волны с давлением во фронте в 125 Па обеспечивает тушение CO_2 при $20,3\%$ и N_2 при $30,2\%$. При увеличении мощности ударной волны до 180 Па происходит уменьшение огнетушащей концентрации CO_2 до $8,2\%$, а N_2 до $15,4\%$. Результаты розкадровки показали, что время тушения при этом уменьшается до 3 раз в сравнении с тушением самой ударной волной с давлением в фронте около 215 Па .

Выводы: В работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность значительного повышения огнетушащей эффективности газов CO_2 и N_2 ударной волной на примере тушения диффузионного пламени н-гептана в камере на расстоянии до 2-х метров. При этом экспериментально определено, что огнетушащая концентрация уменьшается в 2,5 раза для CO_2 и в 2 раза для N_2 при мощности ударной волны в 180 Па для диффузионного пламени н-гептана. Экспериментально определено, что общим результатом действия ударной волны и огнетушащего газа будет значительное уменьшение времени тушения диффузионного пламени н-гептана, и в случае CO_2 уменьшение составляет до 7 раз, а для N_2 – до 4,2 раз, при сравнении с временем тушения самой ударной волной, которое составляет около 350 миллисекунд. Экспериментально определены особенности тушения диффузионного пламени н-гептана в условиях специальной камеры, предложенной комбинированной огнетушащей системой, которые заключаются в том, что время начала фрагментации значительно уменьшается и пламя при этом фрагментируется меньше, что приводит к более быстрому тушению.

Ключевые слова: пожар, ударная волна, газовое пожаротушение, огнетушащая концентрация, диффузионное пламя

Вид статьи: оригинальная научная статья

ABSTRACT

Objective: Determine the parameter in order to increase the effectiveness of fire extinguishing of CO_2 and N_2 , as well as the power of the shock wave when they are all applied to extinguish a diffusion flame of n-heptane C_7H_{16} . Determine the properties of the proposed combined method of extinguishing the diffusion flame of n-heptane in a special test chamber.

Methods: In order to determine the potential of the method of extinguishing the diffusion flame of n-heptane using, at the same time, CO_2 and N_2 and a shock wave, which occurs during the explosion of a pyrotechnic charge, a test station was prepared. It was a chamber of a volume of 0.5 m^3 where a shock wave generator was located, and a crucible with n-heptane was placed at a distance of 1.75 m from it. Gas was delivered

¹ Львовский государственной университет безопасности жизнедеятельности / Lviv State University of Life Safety; bagr33@ukr.net;

through a gasometer. The pressure at the front of the shock wave was measured using a pressure sensor and a temperature BMP180 for Arduino controllers, where the work is based on the piezoresistive effect. Visualization of the process of using, at the same time, CO₂ and N₂ and a shock wave was performed using Nikon 1 j4 camera with the ability to record images at the speed of 1200 frames per second.

Results: In this paper experimentally justified was the fact that combined action of a shock wave and CO₂ or N₂ on the n-heptane flame, in the chamber at a distance of 2 meters leads to its suppression by bursting and defragmentation. Moreover it was experimentally proven that the extinguishing effect of the shock wave with the front pressure of 125 Pa ensures extinguishing with CO₂ at a concentration level of 20.3% and N₂ at 30.2%. Increasing the power of the shock wave up to 180 Pa allows to reduce the extinguishing concentration of CO₂ to 8.2% and of N₂ to 15.4%. Based in the analysis of a series of shots, it can be observed that the extinguishing time in comparison to extinguishing method using only a shock wave with the front pressure of approximately 215 Pa is three times shorter.

Conclusions: The possibility of a significant increase in the efficiency of extinguishing using CO₂ and N₂ gases and a shock wave based on the example of a test n-heptane fire in a chamber at a distance of 2 meters was justified and experimentally demonstrated in this paper. Moreover, it has been proven experimentally that during extinguishing a n-heptane diffusion flame using a shock wave of 180 Pa, the necessary concentration of CO₂ is reduced by two and a half, and in case of N₂ – two times. The experiment confirmed that as a result of simultaneous use of a shock wave and extinguishing gas extinguishing, the time to extinguish the n-heptane diffusion flame significantly shortened. In the case of the CO₂ the time required to extinguish the flame is 7 times shorter and in case of N₂ it is up to 4.2 times faster as compared to extinguishing the flame using only a shock wave, which takes 350 milliseconds. The features of the proposed combined method of extinguishing the diffusion flame in a special chamber were determined using an experimental method. This includes, in particular, the fact that the start time of defragmentation is greatly reduced and the flame becomes less fragmented. As a result, the extinguishing process takes less time.

Keywords: fire, shock wave, gas fire extinguishing, fire extinguishing concentration, diffusion flame

Type of article: original scientific article

ABSTRAKT

Cel: Określenie parametrów mających na celu zwiększenie skuteczności gaśniczej CO₂ i N₂ oraz mocy fali uderzeniowej przy ich jednoczesnym zastosowaniu do gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu C₇H₁₆. Określenie właściwości zaproponowanego łączonego sposobu gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu w warunkach specjalnej komory testowej.

Metody: Do określenia możliwości metody gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu za pomocą jednoczesnego gazów CO₂ i N₂ i fali uderzeniowej, powstałej w wyniku wybuchu ładunku pirotechnicznego, przygotowano zostało stanowisko w postaci komory o objętości 0,5 m³, w której umieszczony został generator fal, a w odległości 1,75 m tygiel z n-heptanem. Gaz dostarczany był przy użyciu gazometru. Ciśnienie na czole fali uderzeniowej mierzono za pomocą czujnika ciśnienia i temperatury BMP180 dla kontrolerów Arduino, którego praca jest oparta na działaniu piezorezystancyjnym. Wizualizację procesu jednoczesnego gaszenia gazami CO₂ i N₂ oraz falą uderzeniową przeprowadzono z wykorzystaniem kamery Nikon 1 j4 z możliwością zapisu zdjęć z prędkością 1200 kadrów na minutę.

Wyniki: W pracy uzasadniono i wykazano eksperymentalnie, że wspólne działanie na płomień n-heptanu fali uderzeniowej i gazów CO₂ i N₂, w komorze w odległości 2 metrów prowadzi do jego tłumienia poprzez rozerwanie i defragmentację. Eksperymentalnie udowodniono, że działanie gaśnicze fali uderzeniowej o ciśnieniu na czole w wysokości 125 Pa zapewnia gaszenie CO₂ w stężeniu 20,3% i N₂ przy stężeniu 30,2%. Zwiększenie mocy fali uderzeniowej do 180 Pa pozwala na zmniejszenie stężenia gaśniczego CO₂ do 8,2% i N₂ do 15,4%. Na podstawie analizy serii ujęć można zaobserwować, że czas gaszenia w porównaniu do gaszenia tylko falą uderzeniową o ciśnieniu (na czole) około 215 Pa jest trzykrotnie krótszy.

Wnioski: W pracy uzasadniono i dowiedziono eksperymentalnie możliwość znaczącego zwiększenia skuteczności gaśniczej gazów CO₂ i N₂ z wykorzystaniem fali uderzeniowej na przykładzie testowego pożaru n-heptanu w komorze w odległości do 2 metrów. Udowodniono eksperymentalnie, że podczas gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu falą uderzeniową o mocy 180 Pa potrzebne stężenie CO₂ zmniejsza się dwuipółkrotnie, a N₂ dwukrotnie. Eksperyment potwierdził, że w rezultacie jednoczesnego zastosowania fali uderzeniowej i gazu gaśniczego znacznemu skróceniu ulega czas gaszenia płomienia dyfuzyjnego n-heptanu. W przypadku z CO₂ czas potrzebny do ugaszenia płomienia jest 7 razy krótszy, a N₂ do 4,2 razy krótszy w stosunku do gaszenia wyłącznie falą uderzeniową, które zajmuje 350 milisekund. Metodą eksperymentalną określono cechy zaproponowanej łączonej metody gaszenia płomienia dyfuzyjnego w warunkach specjalnej komory. Należy do nich m.in. fakt, że czas rozpoczęcia fragmentacji znacznie się skraca i płomień ulega mniejszej fragmentacji. Dzięki temu gaszenie trwa krócej.

Słowa kluczowe: pożar, fala uderzeniowa, gaszenie gazowe, stężenie gaśnicze, płomień dyfuzyjny

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Вступление

Известно [1], что ежегодно в атмосферу выбрасывается около 32 миллиардов тонн углекислого газа, который образуется в результате жизнедеятельности человека. Углекислый газ также используется в качестве огнетушащего агента в автоматических, автономных, системах пожаротушения, в ручных огнетушителях и в других огнетушащих устройствах. Вопрос замены или повышения эффективности газовых огнетушащих веществ с целью уменьшения их выбросов стал особенно актуальным в связи со значительным климатическим потеплением на планете и соответственно принятием ряда документов, а именно – Монреальского и Киотского протоколов [2-3], а также недавно принятого Парижского соглашения, подписанного 175 странами, по изменению климата и ограничению выбросов парниковых газов в перечень которых входят и газовые огнетушащие вещества, а именно CO₂ и хладоны. Поиск альтернативных огнетушащих ве-

ществ и экологически чистых способов тушения стал особенно актуальным за последнее время, когда резко начал меняться климат планеты. Исходя из этого, в этот промежуток, а особенно в последнее время увеличилось количество публикаций, в которых поднимаются вопросы замены парниковых агентов и разработки и применения экологически чистых огнетушащих веществ как для пожаротушения, так и для флегматизации горючих сред.

2. Анализ результатов последних исследований

Известно, что газовые огнетушащие вещества применяются в основном для прекращения пламенного горения объемным способом. По механизму тушения они делятся на инертные разбавители (диоксид углерода, азот, другие инертные газы и их смеси) и ингибиторы горения (галогенизированные углеводороды). Препра-

щение горения инертными разбавителями достигается преимущественно в результате разбавления газовой среды и снижения в нем концентрации окислителя и горючего, а тушение ингибиторами горения – химическим механизмом, – связывание радикалов, при участии которых в пламени происходят цепные окислительно-восстановительные реакции, как правило, для тушения объемных пожаров, а именно на химических производствах, на кораблях, подводных лодках, на транспорте, в энергетической отрасли [4-5] и т.д. Тушение такого рода пожаров является сложным из-за наличия большого количества пожарной нагрузки в различных агрегатных состояниях, труднодоступных мест, в виде пустот, перегородок, трубопроводных и электрических сетей, участков под электрическим напряжением, и т.д. В таких условиях пожар может быстро распространяться без каких-либо ограничений, а его тушение будет затруднено из-за сложности подачи в такие места средств пожаротушения. На сегодня одним из наиболее эффективных путей тушения пожаров и предотвращения взрывов на таких объектах остается использование газовых огнетушащих веществ. Газовые средства тушения имеют определенные преимущества перед другими средствами объемного тушения, а именно - большую чистоту тушения, способность поддерживать флегматизирующую концентрацию в течение длительного времени, удобство подачи в защищенный объем, а также возможность длительного хранения на объекте в составе системы автоматического пожаротушения. Но несмотря на ряд преимуществ, при использовании огнетушащих газов могут возникнуть ситуации, при которых они не обеспечивают необходимой эффективности тушения из-за возможной разгерметизации в результате взрыва, непопадания газа в защищаемый объем, необеспечение достижения указанной огнетушащей концентрации и т.п.

Известно, что огнетушащая концентрация составляет около 22% для CO_2 и 33% - для N_2 при тушении н-гептана [5,6]. Для обеспечения создания огнетушащей концентрации этих газов нужно достаточно большое количество резервуаров и трубопроводов для их хранения. Соответственно это приводит к значительному удорожанию самой установки и ее монтажа, и как правило требует отдельных помещений, и значительных дополнительных затрат [7]. При этом тушение и флегматизация обеспечивается только за счет заполнения объема и теплоотвода тепла из пламени газами-флегматизаторами и при более низких концентрациях тушение невозможно. Учитывая указанное, для повышения огнетушащей эффективности углекислого газа и азота исследователи предлагают различные способы, но в основном они заключаются в смешивании газа с другими газами, хладагентами или дисперсными огнетушащими веществами [8-9]. При этом огнетушащая концентрация исходного газа уменьшается, но общий объем газовой смеси остается почти таким же, или уменьшается незначительно, что не обеспечивает поддержания достаточной концентрации O_2 .

Таким образом, исключая смешивание газовых огнетушащих веществ с другими компонентами, одним из способов повышения эффективности газового объемного тушения диффузионного горения остается физическое воздействие на пламя в газовой огнетушащей среде, которая будет дополнять огнетушащее действие ударной волны. Для того чтобы потушить горение нет большого пламени достаточно его задуть. Соответственно динамического воздействия на пламя можно

достичь звуковым воздействием на газ, или действием ударной волны, которая будет проходить через газовую среду в которой находится пламя. Анализ литературных источников показал, что ударные и звуковые волны давно используются в пожаротушении. Так в работах [10-12] был установлен эффект тушения звуковой волной, а в работе [10] указано, что технология тушения пламени акустической волной может стать элементом поддержания пожарной безопасности пожароопасных объектов. Но в сравнении со звуковой волной гораздо большую мощность и скорость распространения, имеет ударная волна (УВ). Ударная волна может распространяться в газовой среде как скачок уплотнения различной толщины [13]. УВ давно используется с целью пожаротушения. Так в работе [14] показаны способы и условия применения ударных волн, а также устройство для тушения низовых лесных пожаров. Автор [15] указывает, что при соответствующих условиях прохождение УВ через пламя в среде огнетушащего аэрозоля может привести к его отрыву и затуханию. Изучением действия ударных волн при тушении лесных пожаров занимались авторы работ [16-21]. Общим результатом этих работ является то, что воздействие на пламя мощной УВ с позиции тушения является эффективным и может привести к полному затуханию пламени при условии концентрации энергии УВ в указанном секторе и ее достаточной мощности. Сейчас научные исследования по изучению тушения пламени УВ ведутся в основном в направлении тушения лесных и степных пожаров [22-25]. Что касается локального действия УВ на пламя, то задувание, сбивание пламени является эффективным и простым способом борьбы с огнем. Это особенно актуально, для тушения газонефтяных фонтанов, где не эффективны другие средства тушения [25-26].

Известно, что при воздействии на пламя ветра со скоростью 2 м/с, пламя отклоняется на 45°, при этом значительно увеличивается коэффициент захвата воздуха [27]. Тоже самое происходит и при прохождении ударной волны через пламя, при этом скорость прохождения ударной волны значительно больше 2 м/с и составляет сотни метров в секунду. Действие ударной волны, как и бокового ветра, приведет к дестабилизации пламени в пространстве и потери им своей соответствующей структуры. При действии ударной волны в момент ее прохождения через пламя может произойти его частичная турбулизация. А при турбулизации, как известно происходит захват газовых объемов, окружающих пламя, что приведет к достижению неустойчивого состояния, когда пламя может оторваться [27]. Кроме этого, действие на газовый факел охлаждающих или ингибирующих средств также приведет к его отрыву, а при огнетушащей концентрации газа – и к тушению пламени. Таким образом взаимное действие ударной волны и газа на пламя должно значительно увеличить их общий конечный огнетушащий эффект вследствие синергетического эффекта между ними. Повышение эффективности тушения газом при воздействии ударной волны в целом будет вызвано резким изменением условий в зоне реакции горения, которые приводят к мгновенному увеличению энергии активации реакции горения в момент прохождения ударной волны через пламя в среде повышенной концентрации инертного газа за счет изменения всех параметров среды где протекает реакция горения. При этом на границе пламени с атмосферой будут протекать процессы, характерные для взаимодействия газовых сред различных плотностей, которые и будут определять огнетушащую эффективность такой системы. Сбивание пламени одной

лишь ударной волной при ее низкой мощности, а еще на значительном расстоянии, невозможно. При этом может состояться лишь смещение пламени от места вытекания

горючего газа или пара, но после прохождения ударной волны пламя вернется в исходное положение.

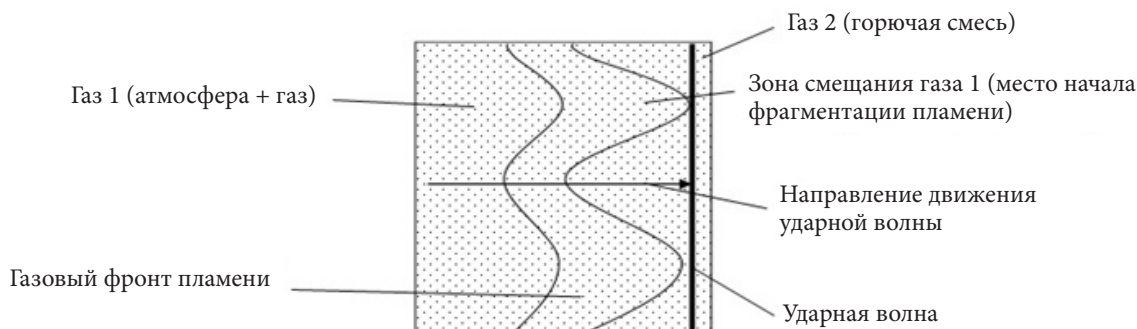


Рис. 1. Вероятные условия начала фрагментации пламени при действии ударной волны на пламя в среде газового огнетушащего вещества

Источник: Собственная разработка.

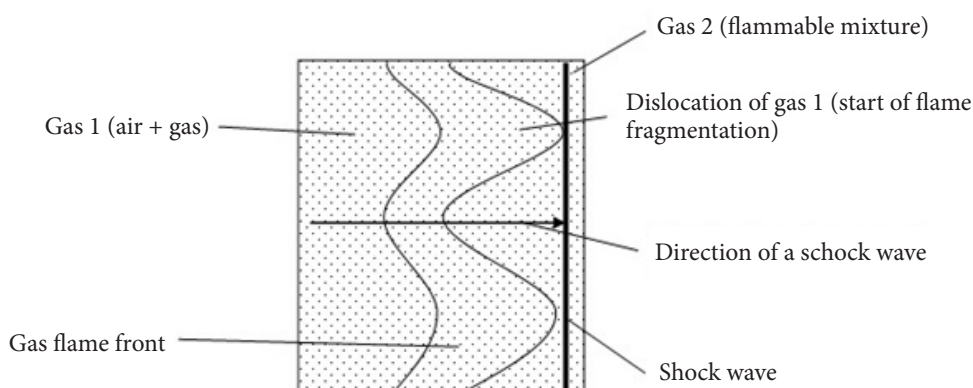


Fig. 1. The probable conditions for the start of the fragmentation of the flame by the action of a shock wave in the flame environment of gas extinguishing agent

Source: Own elaboration.

Соответственно при прохождении ударной волны в газовой среде атмосферы через пламя, вероятно, будет происходить взаимодействие по ее фронту (рис. 1.) с образованием неустойчивости Рихтмаера – Мешкова [28], которая будет возникать на границе двух газов с различными плотностями при прохождении через них ударной волны. При этом газ 1 будет проникать во фронт пламени вызывая образование в нем зоны смещения газа 1 в газ 2, их дальнейшего смешивания и разбавления зоны горения газом 1, что возможно будет приводить к началу фрагментации пламени в этих местах по направлению движения ударной волны. В работе [29] авторы, исследовавшие действие ударной волны на пламя свечи, указали на значительное взаимодействие ударной волны с пламенем, с возможным возникновением эффекта Рихтмаера – Мешкова. Авторы [29] объясняют это расширяющимся потоком, образующимся за ударной волной, после чего пламя быстро диспергируется и затухает. Это происходит в масштабе миллисекунд в узкой зоне и указывает на быстрое ограничение поступления топлива в зону горения, что вероятно, и становится причиной прекращения горения [29]. Кроме того, таким образом в зону горения, будет проникать дополнительное количество инертного газа, который будет действовать и как огнетушащее вещество в зоне горения, и как флегматизатор, когда произойдет смешивание горючей смеси с огнетушащим газом

в подготовительной зоне диффузионного пламени.

Исходя из этого и учитывая комплексное воздействие на пламя ударной волны и огнетушащего газа, необходимо более подробно рассмотреть факторы и условия прекращения горения огнетушащими газами при воздействии на пламя ударной волны.

Известно [30], что при введении в горючую газозвушную смесь огнетушащих газов – углекислого газа, азота, паров воды, гелия, аргона и других, область распространения пламени сужается – нижняя граница растет, а верхняя снижается создавая так называемую точку флегматизации. Для подачи инертного газа в защищаемый объем существуют различные способы подачи и методики расчета огнетушащей концентрации газов. При этом УВ можно использовать во всех случаях для пожаротушения, как при подаче извне, так и изнутри пламени после заполнения объема огнетушащим газом.

В реальных условиях, тушение ударной волной, исходя из литературного анализа, всегда происходит при ее подаче с боковой плоскости пожара. Процесс тушения таким методом описан в работах многих исследователей [15-27], которые использовали ударные волны, образованные в результате взрыва, в основном для тушения лесных пожаров. Так, в работах [31-33] предложено использовать энергию ударной волны, сконцентрированной с помощью отражателя ударной волны, для тушения

в условиях ограниченного объема, а также верхового лесного пожара. В работе [34], для объяснения процесса тушения с помощью УВ рассмотрены теории отражения ударных взрывных волн от кривых поверхностей и дано определение энергетических параметров взрыва. Авторами этой работы [34] в результате проведенных исследований выбрано две гипотезы, которые “переводят” на язык геометрии физическое явление взрыва, и, в определенной степени, согласуются с физической моделью процесса отражения ударных волн. В первой гипотезе взрыв согласуется с особенностями ударных волн при косом отражении от преграды. Показано, что значения давления соответственно перед и за фронтом падающей УВ является сравнительно небольшим и можно считать, что отражения ударных волн должно происходить по “оптическим” свойствам – “угол падения равен углу отражения”. Кроме этого, в работе приведены зависимости угла отражения от угла падения для падающих УВ различной силы. Во второй гипотезе указано, что характер затухания волн определяется энергетическими параметрами действия взрывов. Анализ характера затухания взрывных волн позволяет считать, что значения амплитуды взрывной волны на некотором расстоянии является величиной, обратно пропорциональной площади поверхности волны в той фазе, которая соответствует выбранному расстоянию. Автором [34] указано, что эффективность действия взрывных волн определяется путем вычисления величин площадей их поверхностей. При этом авторы предлагают использовать для тушения только ударные волны, без применения огнетушащего вещества. Известно [33], что воздействие УВ на пламя при ее достаточной мощности обеспечивает тушение вследствие отрыва пламени от потока горючего газа или пара, при этом авторы [34,35] предлагают использовать эти и другие особенности ударной взрывной волны, которые в частности базируются на геометрической интерпретации, согласно чему фронты ударных волн являются точечным источником, а отраженные от синусоидального отражателя, будут иметь точки самопересечения. Также в работе указано, что самопересечение поверхностей ударной волны обеспечивает существование замкнутой области низкого давления фронта взрывной волны. На плоскости эта область будет иметь вид криволинейного треугольника, а в пространстве – «криволинейной» призмы. Эти призмы, которые фактически являются полостями разрежения, предложено заполнять огнетушащим порошком, что даст возможность усовершенствовать существующий метод тушения пожаров. Использование порошка, конечно повысит огнетушащую эффективность, но порошок быстро седиментирует и время его огнетушащего действия ограничено. В работе [34] предлагается повысить эффективность пожаротушения использованием отражателей особой формы, которые могут формировать ударную волну цилиндрической формы. Предложенный авторами способ интересен тем, что взрывная волна, полученная в результате подрыва точечного взрывчатого вещества, может иметь в результате отражения от отражателя минимальную площадь, а соответственно, энергия, которая переносится волной, будет иметь максимальное значение. В работе [36] указано, что при взрыве топливно-воздушной смеси или тротила в ряде случаев наблюдался эффект тушения пожара. Авторы исследовали тушение очагов пожаров размером около 1 м^2 , состоящих из древесины, древесностружечной плиты, элементов мебели и др. Опыты проводились в диапазоне избыточного давления от 0,05 до 10 кгс/см² и длительностью импульса от 0,05 до 2–2,5 с. Авторы упомянутой работы подтвердили мнение о том, что ударная

волна может действительно тушить очаги пожаров класса А, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей; при этом результаты исследований показали, что даже при давлении более 2 кгс/см² полного тушения очагов пожаров не наблюдалось. Основным показателем, согласно результатам работы авторов [36], который определяет процесс тушения пожаров взрывом, является длительность избыточной фазы давления. При длительности положительной фазы давления от 0,01 до 0,2–0,3 с процесс тушения не наблюдался в полном объеме, при этом происходил срыв пламени и повторное возобновление горения, причем отрыв пламени возник при избыточном давлении взрывной ударной волной выше 0,5 кгс/см². Вероятно, что кратковременное воздействие на пламя ударной волной небольшой мощности без огнетушащего вещества не приведет к полному тушению, даже если пламя оторвется, но без дополнительно огнетушащего воздействия оно сможет восстановиться. Для эффективного тушения необходим более длинный импульс УВ, что подтверждено результатами экспериментов этих же авторов [36], которые проводились на открытом участке при тушении пожаров твердых горючих материалов, жидкостей и моделей лесных пожаров. Взрыв создавался с помощью тротиловой шашки. При этом параметры ударной воздушной волны колебались с избыточным давлением от 0,02 до 0,15 кгс/см² и с длительностью фазы избыточного давления от 0,01 до 0,2 с. Результаты экспериментов показали, что при избыточном давлении во фронте УВ более 0,5 кгс/см² и продолжительности импульса 0,6 с наблюдалось полное тушение пламени без повторного возгорания.

Понятно, что при нарушении равновесия пламени после прохождения через него УВ, его восстановление будет зависеть от физико-химических характеристик окружающей газовой среды. Соответственно, обратное восстановление в атмосфере огнетушащего газа не будет столь простым, так как для этого нужно обеспечить необходимую скорость распространения пламени и стабильное поступление горючей смеси в зону горения желательна в достаточной концентрации, что невозможно при воздействии УВ на пламя. В работе [37] было подтверждено, что действие УВ мощностью в 215 Па приводит к тушению диффузионного пламени n-гептана в условиях камеры. При прохождении ударной волны через пламя возможно воспроизведение большинства условий, которые будут приводить к тушению, и которые характерны для действий разнотипных огнетушащих веществ. Таким образом, прохождение УВ через пламя можно разделить на следующие этапы (рис.2.1): 1 этап - когда фронт УВ находится перед пламенем, 2 этап - когда УВ находится в пламени (рис 2.2), 3 этап когда УВ перешла через пламя (рис 2.3) и 4 этап - тушение, когда произошел отрыв пламени (рис 2.4). Факторы огнетушащего воздействия УВ можно разделить на те, которые действуют перед фронтом УВ, во фронте УВ и за фронтом УВ. Условия приводящие к прекращению горения при воздействии ударной волны, указаны в табл. 1.

При подходе ударной волны к пламени (рис 2.1) в виде скачка уплотнения с избыточным давлением, за ним будет идти зона разрежения, то есть при вхождении ударной волны в пламя (рис.2.2) оно будет испытывать дополнительное растяжение в пространстве и, вследствие этого, значительное увеличение теплоотдачи, что должно привести к торможению или прекращению реакции горения. При этом пламя уже начнет фрагментироваться в результате смещения газовой среды (рис.1.) в результате возможного возникновения неустойчивости Рихтмае-

Таблица 1. Условия прекращения горения огнетушащими газами при действии ударными волнами
Table 1. The terms of the cease-burning with fire-extinguishing gases under the action of shock waves

Факторы, которые действуют перед фронтом УВ. Рис. 2.1. Factors that act in front of a shock wave. Fig. 2.1.	Факторы, которые действуют в фронте УВ. Рис. 2.2. Factors that act in the front of a shock wave. Fig. 2.2.	Факторы, которые действуют за фронтом УВ. Рис. 2.3. Factors that act behind the front of a shock wave. Fig. 2.3.
<ul style="list-style-type: none"> – увеличение давления и концентрации газов в предпламенной зоне; – смещение зоны горения, вместе с фронтом ударной волны; – снижение температуры вокруг зоны горения. – increase of pressure and concentration of gases in front of the flame; – displacement of the combustion zone, together with the shock wave front; – lowering the temperature around the combustion zone. 	<ul style="list-style-type: none"> – увеличение теплоотдачи в зоне горения. – увеличение плотности газовой среды во фронте ударной волны. – введение в зону горения инертных компонентов, которые забирают на себя тепло. – увеличение концентрации горючего, окислителя так и инертных газов во фронте ударной волны. – охлаждение зоны горения; – увеличение давления в зоне горения; – отталкивание пламени ударной волной от очага где происходит истечение горючих паров и газов. – increase of heat transfer in the combustion zone. – increase of the density of the gas medium in front of the shock wave. – introduction into the combustion zone of the inert components that get warm. – the increase in the concentration of fuel, oxidizer and inert gases in the shock front. – cooling of the combustion zone; – increase pressure in the combustion zone; – assignment of flame shock wave from the source where the expiration of combustible gases and vapors 	<ul style="list-style-type: none"> – уменьшение теплопередачи. – растяжение зоны пламени за ударной волной. – увеличение энергии активации в зоне разрежения за фронтом ударной волны. – reducing heat transfer. – stretching zone of the flame behind the shock wave. – increase of the activation energy in the rarefaction zone behind the shock wave front.

Источник: Собственная разработка
Source: Own elaboration.

ра-Мешкова по площади контакта УВ с пламенем. На рисунке 2.2. белой пунктирной линией указаны места возникновения неустойчивости Рихтмаера-Мешкова. Также прохождение фронта УВ приведет к охлаждению околопламенного пространства и соответственно снижению скорости реакции. После чего ударная волна выходит из

пламени (рис. 2.3). Когда УВ проходит через пламя, за ней идет зона разрежения. В момент выхода ударной волны, рис. 2.3 из пламени, оно при недостаточной мощности УВ незначительно сместится по инерции на некоторое расстояние от места его первичной привязки или вообще не сместится, а начнет сразу же фрагментироваться что

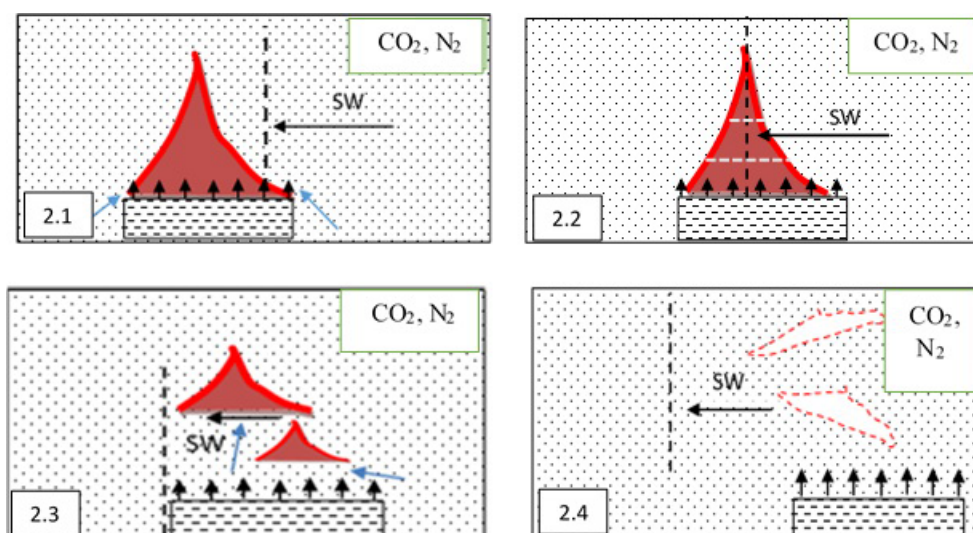


Рис. 2. Этапы комплексного тушения диффузионного пламени ударной волной с газом. 2.1. Ударная волна перед пламенем. 2.2. Ударная волна в пламени. 2.3. Ударная волна за пламенем. Фрагментация пламени. 2.4. Тушение пламени
Fig. 2. Stages of integrated extinguishing of a diffusion flame by the use of a shock wave with a gas. 2.1. The shock wave in front of a flame. 2.2. The shock wave in the flame. 2.3. The shock wave behind the flame. The fragmentation of the flame. 2.4. Extinguishing of the flame

Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

приведет к дополнительному захвату пламенем окружающей газовой среды. В результате в пламя будет попадать горючая смесь уже с примесями огнетушащего газа, что приведет к частичному торможению реакции и отрыву кольца зажигания, от которого зависит, как известно, устойчивость диффузионного пламени [38]. При этом, учитывая что концентрация кислорода будет меньше, скорость распространения пламени также будет меньше, и фрагменты пламени не получив подпитку горючей смесью, должны потухнуть (рис. 2.3-2.4).

Известно [38], что достаточно на кольцо зажигания подействовать потоком небольшой скорости и факел может оборваться. Максимально увеличит огнетушащую эффективность ударной волны наличие вокруг пламени огнетушащего газа, когда до выше указанных эффектов добавится эффект флегматизирования горючей смеси в области разрыва, вызванного газовой ударной волной. При этом возможность отрыва пламени и его тушение будет достигаться гораздо легче, поскольку направление движения и скорость ударной волны будут дестабилизировать пламя. Отрыв факела происходит при средних скоростях истечения, намного превышающих скорость распространения пламени [38]. При этом будет происходить, как было указано выше, захват инполярными частями пламени воздуха вместе с огнетушащим газом при условии его присутствия в соответствующей концентрации. Скорость захвата для воздушных масс равна 0,09 для условий спокойного воздуха [39]. Как указано в данной работе, при воздействии ветра или любом другом движении пламени происходит отклонение факела и резкое увеличение коэффициента захвата, что приведет к увеличению количества газовой смеси попадающей внутрь пламени. Таким образом действие ударной волны вместе с газовым огнетушащим веществом должно привести к более быстрому возникновению эффекта Рихтмаера – Мешкова и тушению пламени вследствие его фрагментации при последовательном действии факторов приведенных в таблице 1. Следовательно, учитывая проведенный анализ воздействия УВ на диффузионное пламя, можно установить цель работы, которая заключается в выявлении зависимости огнетушащей концентрации CO_2 и N_2 для диффузионного пламени н-гептана от мощности УВ.

3. Цель работы

Исходя из анализа в области исследований огнетушащей эффективности газов CO_2 и N_2 и возможности использования ударной волны для повышения эффективности газового пожаротушения, можно сформулировать цель работы, которая заключается в определении условий и параметров повышения огнетушащей эффективности CO_2 и N_2 , а также мощности ударной волны при их совместном комбинированном действии на диффузионное пламя н-гептана C_7H_{16} , а также определении особенностей тушения диффузионного пламени н-гептана в условиях специальной камеры, предложенной комбинированной огнетушащей системы.

4. Методы исследований

Для подтверждения теоретически обоснованного повышения огнетушащей эффективности газов CO_2 и N_2 действием ударной волны, за основу были взяты экспериментальные данные по огнетушащей способности УВ автора [37]. Далее был проведен эксперимент по определению влияния ударной волны мощностью от 125 Па до 180 Па на огнетушащую эффективность CO_2 и N_2 при тушении диффузионного пламени C_7H_{16} в эксперименталь-

ной камере по следующей методике и с использованием таких материалов. В эксперименте использовали химически чистые, (99,9%) CO_2 и N_2 . Экспериментальная камера (рис. 3) выполнена следующим образом: камера с передней панелью размерами: длина 1980 мм, ширина 485 мм, высота 530 мм, имеющая два люка для внесения тиглей; генератор ударных волн и датчик давления и температуры BMP-180 для контроллеров Arduino, с временем реакции не более 7,5 мс в нормальном режиме измерения [40]. Для получения информации с датчика для контроллера Arduino UNO была использована программа для вывода показаний датчика в интерфейсе CoolTerm_0.stk [41]. Данные значений давления получали сначала в CoolTerm_0.stk, далее копировались и в Excel строились графики. Датчик был установлен в камере на расстоянии 1,75 метра от генератора ударных волн. Сам генератор ударных волн (рис. 4) представляет собой трубу диаметром 70 мм и отверстием 3 мм в нижней стенке, для воспламенения пиротехнического заряда внутри генератора. Воспламенение заряда осуществляли источником электрического тока напряжением около 20 В.

Эксперимент проводили следующим образом. В камере устанавливался тигель диаметром 40 мм и глубиной 35 мм с предварительно зажженным на 20 секунд н-гептаном, на расстоянии 1750 мм от генератора ударных волн (рис 4), после чего заполняли камеру газом соответствующей концентрации и задействовали генератор ударных волн, пропуская 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, соответствующие состояния тушения пламени были зарегистрированы на камеру Nikon 1 J4 с частотой съемки 1200 кадров.

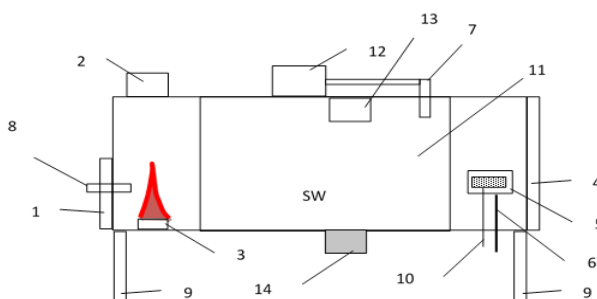


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения огнетушащей эффективности газового огнетушащего вещества под действием ударной волны: 1. Люк для тигля. 2. Вентиляционное отверстие с вентилятором и задвижкой. 3. Тигель. 4. Люк. 5. Генератор ударных волн. 6. Крепления генератора ударных волн. 7. Патрубок для газа. 8. Датчик давления Б. 9. Стойки. 10. Электровоспламенитель. 11. Смотровое окно (SW). 12. Газовый счетчик. 13. Вентилятор. 14. Источник питания электровоспламенителя

Fig. 3. An experimental stand for determining fire extinguishing effectiveness of the gas extinguishing agent under the influence of a shock wave. 1. Hatch for the crucible. 2. Vent with a fan and a valve. 3. Crucible. 4. Luke. 5. The shock wave generator. 6. Fastening of the shock wave generator. 7. An inlet for gas. 8. Pressure sensor B. 9. Legs. 10. Electric igniter. 11. The observation window. 12. Gas meter. 13. Fan. 14. Power source of an electric igniter

Источник: Собственная разработка
Source: Own elaboration.

Стрелкой указано направление движения ударной волны. Для создания ударной волны использовали взрывы зарядов пироксилинового пороха, которые помещали внутрь генератора УВ.

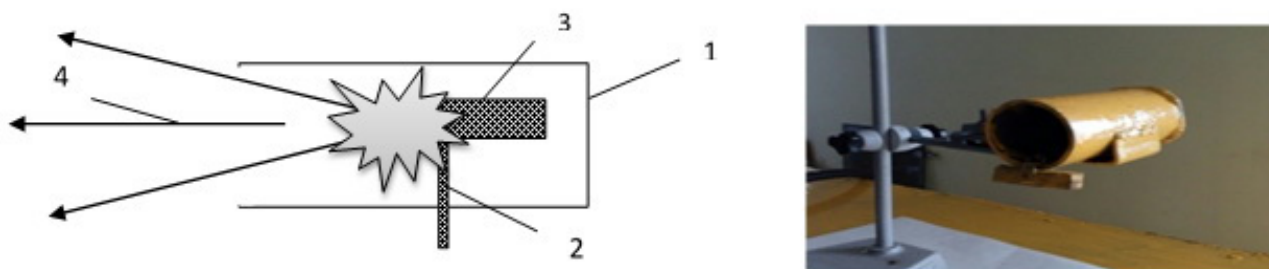


Рис. 4. Генератор ударных волн: 1. Корпус генератора ударных волн. 2. Электровоспламенитель. 3. Пороховой заряд. 4. Направление движения ударных волн

Fig. 4. The shock wave generator: 1. The body of the shock wave generator. 2. Electric igniter. 3. Powder charge. 4. The direction of shock waves motion.

Источник: Собственная разработка
Source: Own elaboration.

5. Результаты

По данной методике были получены результаты эксперимента по определению огнетушащей эффективности самой ударной волны в условиях камеры, которая составляет 215 Па. Процесс тушения ударной волной с давлением около 215 Па показан на рис 5.1 и описан в работе [37].

В работе [37] показано начало воздействия УВ на пламя, при этом стрелкой указано место тигля, а большей стрелкой – направление движения ударной волны; рис 5.2 – стрелкой указано крайнюю точку смещения пламени при контакте с фронтом УВ; рис. 5.3 – дальнейшее смещение и частичный отрыв пламени; рис. 5.4 – отрыв пламени от тигля. Стрелкой указано крайнюю точку отрыва; рис.5.5 – полный отрыв пламени. Стрелкой указано крайнюю точку отрыва пламени от тигля; рис.5.6 – отрыв и начало фрагментации пламени на 3 части; рис.5.7 – дальнейшая фрагментация пламени; рис.5.8 – рассеивание частей пламени, тушение. 5.9 – тушение частей пламени. Первый этап тушения УВ включает в себя воздействие зоны с избыточным давлением на пламя, эффект от которого видно на рис. 5.2 – 5.5. При этом происходит отрыв пламени и образование зоны нагретых газов и продуктов горения между пламенем и поверхностью тигля, что мож-

но увидеть по «следу» рис. 5.6, оторванного пламени, который, судя по цвету газа, имеет меньшую температуру. Далее в процессе отрыва пламени этот «след» становится более длинным, и параллельно отрыву в нем происходит догорание горючей смеси, что видно на рис. 5.6 – 5.8. После этого пламя растягивается и фрагментируется на три отдельных объекта пламени – рис. 5.6 – 5.8. После прохождения УВ образованные фрагменты пламени догорают, рассеиваются и гаснут – рис. 5.9-5.11. [37]

Учитывая результаты эксперимента по тушению диффузионного н-гептанового пламени самой УВ, было проведено экспериментальное определение огнетушащей эффективности газов CO_2 и N_2 при воздействии на пламя ударной волной при их определенных концентрациях. При определении огнетушащей эффективности комбинированной системы, ударная волна – CO_2 или N_2 значение давления во фронте УВ соответствовали давлениям примерно 125 Па (рис. 6) и 180 Па (рис. 7). Поверждение пламени при воздействии на него УВ с давлением 125 Па и 180 Па в зависимости от изменения концентрации CO_2 и N_2 показано в таблицах 1 и 2, а на графиках (рис. 8, 9) показана зависимость огнетушащей концентрации CO_2 и N_2 от мощности УВ.

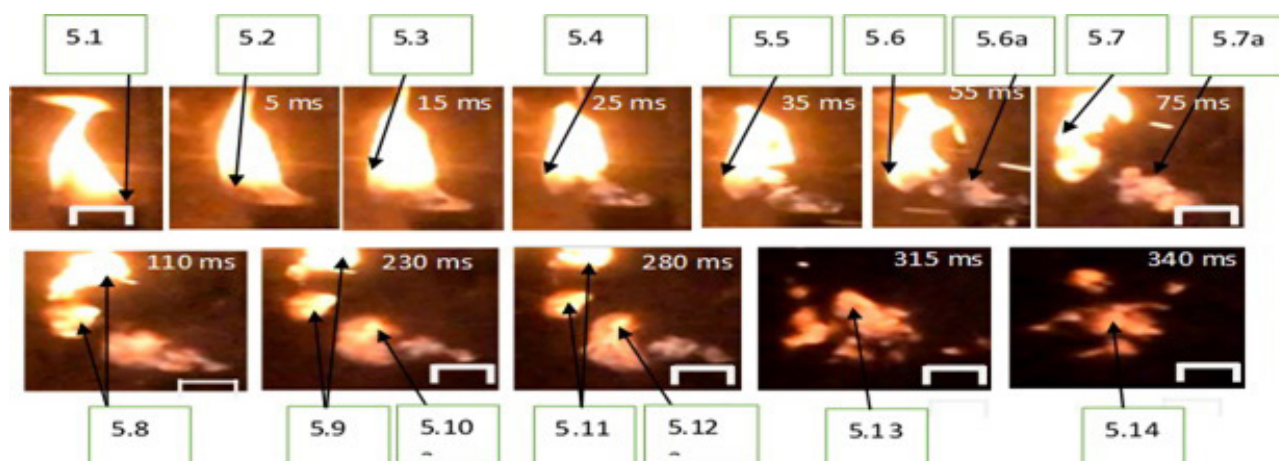


Рис. 5. Раскадровка момента тушения пламени гептана C_7H_{16} ударной волной с мощностью 215 Па, время тушения ≈ 350 ms. Стрелкой указано направление ударной волны

Fig. 5. Storyboard of the moment of extinguishing heptane C_7H_{16} flame with a shock wave with a pressure of 215 Pa, time needed to extinguish the flame $\tau \approx 50$ ms. The arrow indicates the shock wave direction

Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

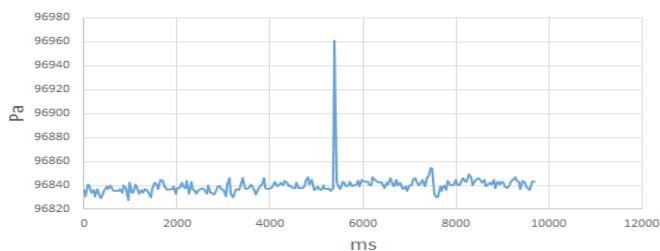


Рис. 6. Ударная волна с избыточным давлением 125 Па

Fig. 6. A shock wave with a pressure of 125 Pa

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

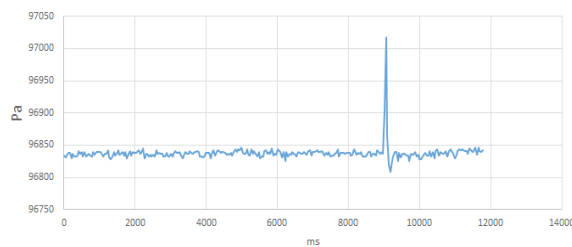


Рис. 7. Ударная волна с избыточным давлением 180 Па

Fig. 7. A shock wave with a pressure of 180 Pa

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Таблица 2. Воздействие ударной волны мощностью в 125 и 180 Па на огнетушащую эффективность CO_2 при тушении диффузионного пламени н-гептана C_7H_{16}

Table 2. The impact of a shock wave with a pressure of 125 and 180 Pa for the fire extinguishing efficiency of CO_2 to extinguish diffusion flames of n-heptane C_7H_{16}

№	% CO_2	125 Pa	Результат / The result	% CO_2	180 Pa	Результат / The result
1	14,0	-	Нестабильность пламени The instability of the flame	3,0	-	Нестабильность пламени The instability of the flame
2	16,0	-	Частичный отрыв пламени. Partial separation of the flame	6,0	+	Частичный отрыв пламени. Partial separation flame
3	20,3	+	Тушение отрывом Extinguishing by the fire separation	8,2	+	Тушение отрывом Extinguishing the fire separation
4	21,2	+	Мгновенное тушение Instant fire suppression	10,2	+	Мгновенное тушение Instant fire suppression

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

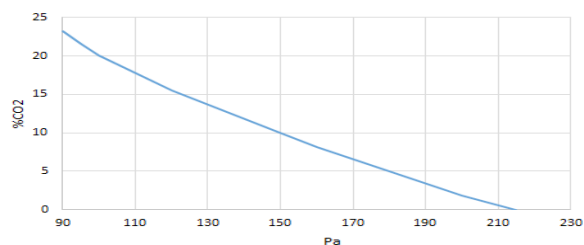


Рис. 8. Зависимость огнетушащей концентрации² % CO_2 для пламени н-гептана (C_7H_{16}) от мощности ударной волны (Па)

Fig. 8. The dependence of % CO_2 extinguishing concentration for n-heptane flame (C_7H_{16}) on the power of the shock wave (Pa)

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

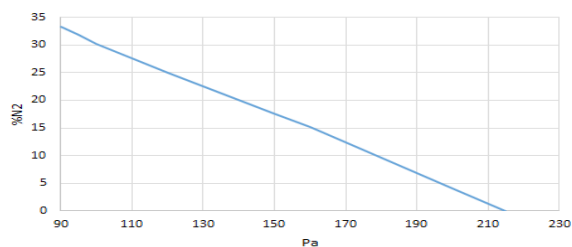


Рис 9. Зависимость огнетушащей концентрации % N_2 для пламени н-гептана (C_7H_{16}) от мощности ударной волны

Fig. 9. The relationship between the percentage of N_2 extinguishing concentration for n-heptane flame suppression (C_7H_{16}) and the pressure of the shock wave

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

² Огнетушащая концентрация – минимальная концентрация газа, при которой происходит отрыв и тушение пламени при заявленных условиях.

Таблица 3. Воздействие ударной волны мощностью в 125 и 180 Па на огнетушащую эффективность N_2 при тушении диффузионного пламени н-гептана C_7H_{16}

Table 3. The impact of a shock wave with a capacity of 125 and 180 Pa on fire extinguishing efficiency of N_2 to extinguish diffusion flames of n-heptane C_7H_{16}

№	% N_2	125 Па / Pa	Примечание / Note	% N_2	180 Па / Pa	Примечание / Note
1	24,0	-	Нестабильность пламени The instability of the flame	12,0	-	Нестабильность пламени The instability of the flame
2	26,0	-	Нестабильность пламени The instability of the flame	14,0	+	Частичный отрыв пламени Partial separation flame
3	28,0	-	Тушение отрывом Extinguishing by the fire separation	15,4	+	Тушение отрывом Extinguishing the fire separation
4	30,2	+	Мгновенное тушение Instant fire suppression	18,0	+	Мгновенное тушение Instant fire suppression

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

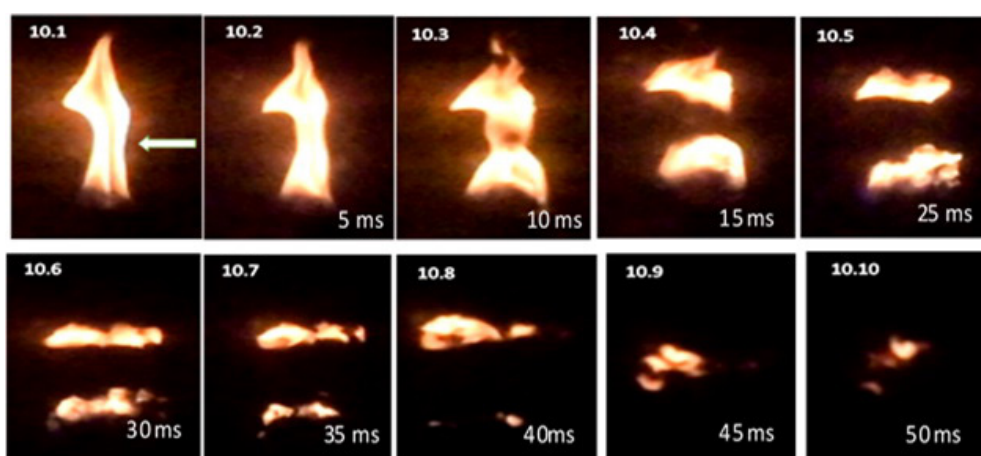


Рис. 10. Раскадровка во времени момента тушения диффузионного пламени н-гептана ударной волной с мощностью $P = 180$ Па и концентрацией $CO_2 = 8,2\%$. Время тушения ≈ 50 мс. Стрелкой указано направление ударной волны

Fig. 10. Storyboard in time the moment of extinguishing of diffusion flames of heptane with a shock wave with a pressure of $P = 180$ Pa and CO_2 concentration at 8.2% , the time needed to extinguish the flame ≈ 50 ms. The arrow indicates the shock wave direction

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

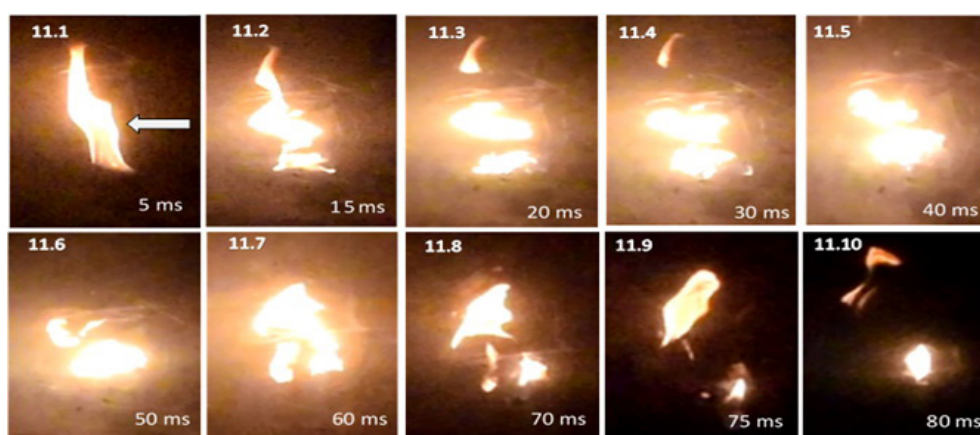


Рис. 11. Раскадровка во времени момента тушения диффузионного пламени н-гептана ударной волной с мощностью $P = 180$ Па и концентрации $N_2 = 23,4\%$. Время тушения ≈ 84 мс. Стрелкой указано направление ударной волны

Fig. 11. Storyboard in time the moment of extinguishing of diffusion flames of n-heptane shock wave with a pressure $P = 180$ Pa and the concentration of $N_2 = 23.4\%$. Extinguishing time ≈ 84 ms. The arrow indicates the shock wave direction

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Погрешность экспериментальных данных составляла около 10%. Количество опытов на получение одной точки составляло не менее 3-х. Если результаты эксперимента имели значительные различия, эксперимент повторяли еще 3 раза до получения стабильного результата. Видеофиксация позволяет определить особенности поведения пламени в момент его тушения при действии на него УВ в указанных условиях. На рис. 10 показано раскадровку этапов тушения диффузионного пламени CO_2 при действии на пламя н-гептана УВ с давлением во фронте 180 Па.

Таким образом из таблиц 2 и 3 видно, что огнетушащее действие ударной волны с давлением во фронте в 125 Па обеспечивает тушение пламени н-гептана при 20,3% CO_2 и 30,2% N_2 . При увеличении мощности ударной волны до 180 Па происходит уменьшение огнетушащей концентрации CO_2 до 8,2%, а N_2 – до 15,4%.

6. Дискуссия о методах и результатах

Для подтверждения выдвинутых выше предположений о действии комбинированной системы УВ + огнетушащий газ на пламя, было проанализировано раскадровку процесса тушения при действии УВ с давлением 180 Па и газами CO_2 и N_2 на диффузионное пламя н-гептана. При раскадровке тушения CO_2 (рис. 10) было обнаружено, что тушение пламени УВ происходит при давлении в 180 Па за 50 мс, что меньше в 7 раз чем при тушении самой лишь УВ (≈ 350 мс) без газа. При этом при сравнении рисунков видно, что пламя во всех случаях при наличии CO_2 фрагментируется на 2 большие части (рис. 10.4-10.6), которые позже тоже незначительно фрагментируются (рис. 10.7-10.8), уменьшаются в размерах (рис. 10.9-10.10) и тухнут. Отличием в тушении УВ с добавкой газа является то, что при тушении УВ с CO_2 или N_2 , и самой УВ, фрагментация в последнем случае проявляется больше, так как пламя делится на несколько частей, что можно увидеть на рисунке 5 позиция 5.8 – 5.14. Кроме этого, как видно из рисунка 10, при тушении с наличием газа, позиции 10.2-10.8, пламя почти не смещается от уровня тигля, не наклоняется и не сильно фрагментируется с наклоном, как в случае тушения лишь самой УВ (рис. 5 поз. 5.9-5.12), а сразу разделяется на две большие части (рис. 10 поз. 10.4-10.7) и тухнет на 50 миллисекунде. Далее было проведено раскадровку процесса тушения диффузионного пламени азотом при его концентрации 15,5% и мощности ударной волны в 180 Па. В случае с азотом (рис. 11) процесс почти полностью повторяется, пламя так же разделяется на 2 большие части рис. 11.2-11.7 после чего части пламени незначительно уменьшаются в размерах, отрываются и тухнут на 84 миллисекунде. Исходя из результатов эксперимента, и как видно из раскадровки процесса тушения УВ с добавкой CO_2 или N_2 , время тушения соответственно уменьшается в 7 и 4,2 раза по сравнению со временем тушения самой УВ. При этом, как видно из результатов раскадровки, время фрагментации без действия газов значительно больше и при сравнении с комбинированным тушением ударной волной и газами, в случае с CO_2 фрагментация начинается на 5 миллисекунде, с N_2 – на 15 миллисекунде, а в случае тушения самой ударной волной заметная фрагментация пламени начинается на 100-110 миллисекунде. Значительное уменьшение времени начала фрагментации при добавлении газов указывает на усиление огнетушащего действия вероятно в результате значительного увеличения теплоотдачи в зоне горения, увеличения плотности газовой среды во фронте ударной волны, ввода в зону горения инертных компонентов, которые поглощают тепло.

Таким образом, принимая во внимание значительное снижение огнетушащей концентрации CO_2 и N_2 можно утверждать, что повышение огнетушащей эффективности такой комбинированной системы достигается вследствие синергизма между огнетушащими газами и УВ. При этом огнетушащие газы CO_2 и N_2 обеспечивают дополнительный огнетушащий эффект в результате совместного действия вышеперечисленных факторов (табл. 1) что приводит к предполагаемому значительному повышению энергии активации реакции горения, и значительному осложнению распространения пламени по неоднородной газовой смеси, которая возникает после прохождения УВ через пламя. Следовательно, ударная волна небольшой мощности в диапазоне мощности до 215 Па приведет к значительному повышению огнетушащей эффективности CO_2 и N_2 в условиях камеры, для модельного очага горения н-гептана в тигле. При этом ударные волны большей мощности могут значительно повышать огнетушащую эффективность газовых огнетушащих веществ, когда тушение производится в больших масштабах, или в скрытых и труднодоступных местах, за счет их отражения от стенок оборудования конструкций, и других помех, при значительно более низких концентрациях огнетушащих газов. При этом в первую очередь, необходимо обратить внимание на то, что снижение огнетушащей концентрации газовых огнетушащих веществ является прямым подтверждением того, что действие УВ приведет к повышению энергии активации, в основном вследствие увеличения концентрации огнетушащего газа, который будет попадать в зону горения в результате фрагментации пламени и создания по всему фронту пламени условий для возникновения нестабильностей Рихтмаера – Мешкова, что приведет к фрагментации фронта горения, его охлаждению и торможению реакции за счет взаимопроникновения газов и их турбулентного перемешивания в переходном слое «пламя – атмосфера». Таким образом, одновременное воздействие всех перечисленных факторов значительно повышает эффективность тушения газовыми огнетушащими веществами при воздействии на пламя ударной волны. При сравнении результатов тушения УВ в работе [37] указано что ударная волна при давлении 190 Па к тушению не приводит, но как показали результаты эксперимента, при добавлении CO_2 или N_2 был установлен факт тушения диффузионного пламени н-гептана даже при незначительных их концентрациях (рис. 8, 9). При этом значительно уменьшается время тушения и если сравнивать тушение ударной волной с давлением в 316 Па [37] то время тушения даже при этом составляло около 300 миллисекунд. Кроме того, ускоряется начало фрагментации пламени и уменьшается необходимое для тушения давление в фронте ударной волны, кроме того, при этом смещения пламени не наблюдалось, как и в случае тушения более мощной УВ с давлением 316 Па.

В итоге, результаты эксперимента показали, что огнетушащая эффективность газов при воздействии ударной волны значительно повышается, как и теоретически было прогнозируемо и обоснованно. Полученные зависимости показали значительное повышение огнетушащей эффективности CO_2 и N_2 даже при весьма незначительном давлении во фронте ударной волны.

7. Вывод

В работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность значительного повышения огнетушащей эффективности газов CO_2 и N_2 ударной волной на примере тушения диффузионного пламе-

ни н-гептана в камере на расстоянии до 2-х метров. При этом экспериментально определено, что огнетушащая концентрация уменьшается в 2,5 раза для CO_2 и в 2 раза для N_2 при мощности ударной волны в 180 Па для диффузионного пламени н-гептана. Экспериментально определено, что общим результатом действия ударной волны и огнетушащего газа будет значительное уменьшение времени тушения диффузионного пламени н-гептана, которое в случае CO_2 уменьшается до 7 раз, а для N_2 – до 4,2 раз, при сравнении с временем тушения самой ударной волной, время тушения которой составляет около 350 мс. Экспериментально определены особенности тушения диффузионного пламени н-гептана в условиях специальной камеры, предложенной комбинированной огнетушащей системой, которые заключаются в том, что время начала фрагментации значительно уменьшается и пламя при этом диспергируется меньше, что приводит к его более быстрому тушению.

Таким образом новая технология повышения эффективности газового пожаротушения может разрешить проблему тушения объектов на которых необходимо поддерживать определенный уровень кислорода, а также разрешит значительно уменьшить их выбросы в атмосферу при сохранении, и даже увеличении их огнетушащей эффективности.

Литература

- [1] Carbon dioxide CO_2 . Thing global green webservice, <http://www.thinkglobalgreen.org/carbondioxide.html> [accessed: 25.07.2016].
- [2] United Nation Environmental Program (UNEP), Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Report of the Halon Fire-extinguishing Agents Technical Options Committee, 1994.
- [3] Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf> [accessed: 25.07.2016].
- [4] Carhart H. W., Fielding F. J., *Applications of Gaseous Fire Extinguishants in Submarines*, Symposium on Appraisal of Halogenated Fire Extinguishing Agents, National Academy of Sciences, Washington DC 1972, 239-256.
- [5] Sakei R., Saito N., Saso Y., Ogawa Y., Inoue Y., Flame-extinguishing Concentrations of Halon Replacements for Flammable Liquids, Report of Fire Research Institute of Japan, 1995, 36-42.
- [6] Moore T.A., Yamada N., *Nitrogen gas as a halon replacement*, Halon Options Technical Working Conference 12–14 May. 1998, 330–338.
- [7] Fire suppression systems inert gases, <http://www.aft.net/products/fire-suppression/inert-gases> [accessed: 25.07.2016].
- [8] Saito N., Saso Y., Ogawa Y., Otsu Y., Kikui H., *Fire Extinguishing Effect Of Mixed Agents Of Halon 1301 And Inert Gases*, "Fire Safety Science" 1997, 5, 901–910.
- [9] Balanyuk V.M., Zhurbinskiy D.A., *Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays*, BiTP Vol. 32 Issue 4, 2013, pp. 53–58.
- [10] Węsierski T., Wilczkowski S., Radomiak H., *Wygazanie procesu spalania przy pomocy fal akustycznych*, BiTP Vol. 30 Issue 2, 2013, pp. 59-64.
- [11] Poisot T., Yip B., Veynante P., Trouve A., Samaniego J. M., Candel S., *Zero-g acoustic fire suppression system*, «Journal de Physique III», 1992, 2, 1331.
- [12] Anthony S., DARPA creates sound-based fire extinguisher, <http://www.extremetech.com/extreme/132859-darpa-creates-sound-based-fire-extinguisher>. [accessed: 25.07.2016].
- [13] Zeldovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Fyzyka udarnykh voln y vysokotemperaturnykh hydrodynamicheskikh yavleniy*, Nauka, Moskva 1966, 686.
- [14] Hryshyn A.M., Zyma V.P., Kasymov D.P., *Prymenenye vzryvchatykh veshchestv v ustroystvakh lokalizatsiy y tusheniya pryrodnykh pozharov*, „Pozharovzryvobezопасnost” 2015, 24(7).
- [15] Balaniuk V.M., Kopystynskiy Yu.O., Lavreniuk O.I. *Vzaiemodiia polumia i vohnehasnoho aeroliu rehovyny pid vplyvom udarnoi khvyli*, „Pozhezhna bezpeka” 2011, 18, 71-75.
- [16] Kurbatskiy N.P., Valendyk Ye.N., *Lokalizatsiya lesnykh pozharov nakladnyimi shnurovymy zariadamy*, Krasnoiariski rabochiy, Krasnoiarisk 1970, 320-332.
- [17] Reva H.V., Kutsenko L.M., *Metod otsinky intensyvnosti dii udarnoi khvyli napravlenoho vybuvu dlia hasinnia lisovykh pozhezh*, KhIPB, Kharkiv 1998, 80.
- [18] Grishin A., *Interaction of shockwaves with tree crowns and the front of crown forest fires*, Proceedings of the 19th International Symposium on Shock Waves Held at Marseille, France, 26-30 July 1993, Springer, 411-417.
- [19] Grishin, A.M., Perminov V.A., *Mathematical modeling of the ignition of tree crowns*, "Combustion, Explosion, and Shock Waves" 1998, 34(4), 378-386.
- [20] Grishin, A.M., Zima V.P., Mashovich A.Ya., Samoilov V.I., *Experimental study between shock generated with point charges and crowns [w:]*, Proceedings of international conference, Tomskiy Gosudarstvennyy Universitet, Tomsk 2000, 83-85.
- [21] 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" 2001, 37(5), 558-562.
- [22] Senchykhyn Yu.N., Huzenko V.A., *Tushenye lesnykh pozharov napravlenymy vzryvamy*, [w:] *Krupnye pozhary: preduprezhdenye y tushenye: Mater. 16 nauch.-prakt. konf. Ch. 2.*, VNIPO, Moskva 2001, 112-114.
- [23] Hryshyn A.M., Zyma V.P., RU 2458716 S1, 20.08.2011.
- [24] Hryshyn A.M., Zyma V.P., RU 2496539, 16.08.1998.
- [25] Hryshyn A.M., Zyma V.P. *Svidete'lstvo PM 10582 Rossyiskaia Federatsiya. Dezynhtehator fronta nyzovoho lesnoho pozhara s ohnehasiashchym patronom / №98120291 zaiavl.02.11.1998; opubl. 16.08.1998, Biul. №8.*
- [26] Hruzdev A.H., Kaidalov V.V., Osypkov V. N., Oryonov Yu.Э., Strelets A.V., Yashnev Yu.Y., *Sovremennye tekhnolohyy kombynyrovannoho tusheniya pozharov hazovykh, hazoneftiynykh y neftiynykh fontanov*, „Pozharnaia bezопасnost: sb. nauchn. dokl.” 2011, 3, 84-88.
- [27] Drysdale, D.D., *Vvedenye v dynamyku pozharov*, Bomshtein K.H. (transl.), Stroyizdat, Moskva 1985, 423.
- [28] Ruev H.A., Fedorov A.V., Fomyn V.M., *Razvytye neustoichyvosty Rykhtmaiera – Meshkova pry vzaymodeivyy dyffuzyonnoho sloia smesheniya dvUV hazov s udarnymy volnamy*, „Prykladnaia mekhanika y tekhnicheskaya fizyka” 2005, 46(3), 3-11.
- [29] Doig G., Johnson Z., Mann R., *Shock Wave Interaction with a Flame*, 18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston, Australia 3-7 December 2012, NSW 2052.
- [30] Abdurahymov Y.M., Hovorov V.Iu., Makarov V.E., *Fyzyko-khymicheskyye osnovy razvytyia y tusheniya pozharov*, VPTSh MVD SSSR, Moskva 1980, 255.
- [31] Balaniuk V.M. Kopystynskiy Yu.O., Lavreniuk O.I., *Vyznachennia efektyvnosti hasinnia vohnehasnoiu aeroliu rehovynoiu v umovakh zastosuvannia hazovykh udarnykh khvyli*, „Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. Prats” 2012, 21, 23-28.
- [32] Balaniuk V.M., Boiko T.B., Kopystynskiy Yu.O., Zhurbynskiy D.A., *Vykorystannia udarnykh khvyli pry hasinni dyfuziinoho polumia vohnehasnyimi aeroliamy*, „Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka: ChIPB” 2014, 18, 32-37.
- [33] Reva H.V., *Hasinnia verkhovykh lisovykh pozhezh udarnymy khvyliamy napravlenykh vybkhiv*, „Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka” 1999, 3-6.
- [34] Huzenko V.A., Senchykhyn Yu.M., Rudenko S.Iu., *Udoskonalennia metodu hasinnia lisovykh pozhezh napravlenym vybupom za rakhunok vykorystannia osoblyvostei formy udarnykh vybukhovykh khvyli*, „Problemy pozharnoi bezопасnosti” 2011, 29, 50-54.
- [35] Reva H.V., Kutsenko L.N., Kuleshov N.N., *Izobrazhenye fronta udarnoi volny, otrazhennoi tsylindricheskoi synusoidalnoi*

- poverkhnosti*, [w:] *Problemy horenyia y tusheniya pozharov na rubezhe vekov : mater. XV nauchno-praktycheskoi konferentsyy*, VNIPO, Moskva 1999, 1307- 1309.
- [36] Kopylov N.P., Moskvyl'n E.A., Zharkov V.H, Sushkyna Ye.Iu., *Tusheniye ochagov pozhara vzryvom*, [w:] *Krupnye pozhary: preduprezhdeniye y tusheniye: sb. tez. dokl. Materyaly XVI nauchno-praktycheskoi konferentsyy*, VNIPO, Moskva 2001, 27-28.
- [37] Balanyuk V.M., *Extinguishment of n-heptane diffusion flames with the shock wave*, BiTP Vol. 42, Issue 2, 2016, pp. 103-111.
- [38] Khytryn A.N., *Fizika gorenyia i vzryva*, Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moskva 1957, 442.
- [39] Morton B.R., Taylor G., Turner J.S. Turbulent gravitation convection from maintained and instantaneous sources, "Proc Roy Soc A" 1956, 234(1196).
- [40] BMP180 Digital pressure sensor data sheet, <https://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf> [accessed: 10.07.2016].
- [41] CoolTerm application, <http://freeware.the-meiers.org/> [accessed: 10.07.2016].

* * *

Баланюк Владимир Мирчевич – докторант, кандидат технических наук, доцент. В 2007 году защитил диссертацию по специальности пожарная безопасность. С 2007 года работал на кафедре процессов горения и общей 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.