

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

Przyjęty/Accepted/Принята: 16.10.2016;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 10.12.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.12.2016;

Особенности флегматизирования гептановоздушной среды бинарной смесью аэрозоля с азотом

Specific Nature of Phlegmatizing Air-Heptan Mixture using Aerosol and Nitrogen Binary Mixture

Specyfika flegmatyzacji mieszanki powietrza z heptanem przy pomocy mieszaniny binarnej aerozolu z azotem

АННОТАЦИЯ

Цель: Цель работы состоит в определении особенностей флегматизирования стехиометрической гептановоздушной среды бинарной смесью аэрозоля с азотом, а также в определении концентраций и времени сгорания горючей смеси при разных соотношениях компонентов указанных смесей.

Методы: Для определения особенностей флегматизирования n-гептана, бинарными смесями аэрозоля с азотом была использована установка в виде толстостенного цилиндрического стеклянного сосуда объемом 0,5 литра с мощным электрическим источником зажигания, расположенным внутри цилиндра, в котором смешивали азот с аэрозолем и с гептановоздушной смесью. Замедленная съемка процесса взрыва смесей проведена камерой Nikon 1 j4 с возможностью получения 1200 кадров в секунду.

Результаты: Результаты экспериментов показали, что значение флегматизирующей концентрации аэрозоля, полученного из АОС на основе идитола, для стехиометрической гептановоздушной смеси составляет 66 г/м³. Также получена зависимость флегматизирующей концентрации бинарной смеси от соотношения компонентов в ней, при условии, что индивидуальная флегматизирующая концентрация азота составляет 44%. Установлено, что оптимальные соотношения компонентов указанной смеси лежат в таких пределах: аэрозоль – 20-35 г/м³, N₂ – 15% – 8%. Подтвержден значительный огнепреградительный эффект бинарной смеси, который заключается в ограничении распространения фронта пламени на весь объем горючей смеси. При этом огненная сфера затухает, не достигая стенок цилиндра.

В результате проведенных экспериментов подтверждено также синергическое взаимодействие между компонентами бинарной аэрозольно-азотной смеси, что проявляется в резком снижении концентрации ее компонентов благодаря их комбинированному действию, которые действуют одновременно как тепловые флегматизаторы и химические ингибиторы. Получены раскадровки процессов взрывного сгорания при добавлении к стехиометрической смеси бинарных аэрозольно-азотных смесей, которые подтверждают значительный огнепреградительный эффект при одновременном снижении концентрации аэрозоля и концентрации азота до 3 раз, что обеспечивает концентрацию кислорода, необходимую для жизнедеятельности человека.

Выводы: В работе показан эффект ограничения распространения пламени на полный объем топливной смеси при добавлении бинарной аэрозольно-азотной смеси к горючей гептановоздушной смеси. Полученный эффект интересен с практической точки зрения: для обеспечения пожарной и взрывобезопасности на объектах с наличием легковоспламеняющихся газов, жидкостей и их смесей. Практическое применение бинарной смеси на тушение и флегматизация будут способствовать уменьшению масштабов разрушений в результате ограничения распространения пламени на весь объем однородной топливовоздушной смеси.

Ключевые слова: взрыв, пожар, флегматизация, азот

Вид статьи: оригинальная научная статья

ABSTRACT

Purpose: The purpose of the work is to determine the characteristics of phlegmatization of stoichiometric air-heptan mixture with aerosol-nitrogen binary mixture, as well as to determine the concentration and combustion time of the combustible mixture in different ratios of the components of these mixtures.

Methods: To determine the characteristics of n-heptan phlegmatization using aerosol-nitrogen binary mixtures, an installation was used of a thick-walled cylindrical glass vessel of 0.5 liter capacity with a powerful electric ignition source placed inside it. An aerosol-nitrogen mixture was combined with an air-heptane mixture. Time-lapse shots of the explosion process were captured by Nikon 1 j4 camera which can capture 1200 frames per second.

Results: The results of the experiments showed that the value of phlegmatization concentration of aerosol obtained on the basis of the mixture for

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

aerosol formulation based on iditol for the stoichiometric mixture is 66 g/m^3 . Also obtained was the dependence between the concentration of the mixture of the phlegmatizer and the proportion of the content of its ingredients, taking into account the condition that a single concentration of the phlegmatizer (the aerosol-nitrogen mixture) is 44%. It was also discovered that the optimum ratio of the components of the mixture are as follows: aerosol – $20\text{-}35 \text{ g/m}^3$, N_2 – 15%-8%. Significant fire resistant efficacy of the binary mixture has been shown, which is meant to reduce the spread of the flame front over the whole volume of the combustible mixture, when the fireball dies before touching the walls of the cylinder. As a result of the conducted experiments, the synergistic interaction between components of the binary aerosol-nitrogen mixture was also confirmed, which is manifested by a sudden decrease in concentration of its components due to their combined action. The components of the mixture act both as heat phlegmatizers and chemical inhibitors. Shots were obtained of combustion processes resulting from explosion while adding aerosol-nitrogen binary mixtures to a stoichiometric binary mixture. The shots confirmed the phenomenon that fire reduced by a phlegmatizer while the concentration of aerosol and nitrogen is decreased three times, which ensures maintaining the oxygen concentration at a level suitable to maintain human life processes

Conclusions: The paper presents the effect of reducing the spread of flames over the entire volume of the fuel mixture of heptane and air when the aerosol-nitrogen binary mixture was added. The effect is interesting from a practical point of view: in order to ensure fire safety and explosion protection of buildings (sites) where there are flammable gases, liquids and mixtures thereof. Practical application of the binary mixture for extinguishing and phlegmatization will result in reducing the scale of destruction due to limiting the spread of flames over the entire volume of the homogeneous fuel-air mixture.

Keywords: explosion, fire, phlegmatization, nitrogen

Type of article: original scientific article

ABSTRAKT

Cel: Celem pracy jest określenie specyfiki flegmatyzacji stechiometrycznej mieszaniny heptanu z powietrzem mieszaniną binarną aerosol-azot, a także określenie wartości stężeń i czasu spalania mieszaniny palnej przy różnych proporcjach składników obydwu tych mieszanin.

Metody: Do określenia cech charakterystycznych flegmatyzacji n-heptanu binarnymi mieszaninami aerosol-azot wykorzystano stanowisko w formie grubościennego cylindrycznego szklanego naczynia o objętości $0,5 \text{ l}$ z umieszczonym w środku elektrycznym źródłem zapłonu o dużej mocy. W naczyniu zmieszano mieszaninę aerosol-azot z mieszaniną heptan-powietrze. Poklatkowe ujęcia procesu wybuchu wykonano kamerą Nikon 1 j4 z możliwością otrzymania 1 200 klatek na sekundę.

Wyniki: Wyniki eksperymentów wykazały, że wartość stężenia aerosolu, otrzymanego z mieszaniny na bazie iditolu, konieczna do przeprowadzenia procesu flegmatyzacji stechiometrycznej mieszanki powietrza z heptanem wynosi 66 g/m^3 . Otrzymano również zależność między stężeniem mieszaniny flegmatyzatora a proporcją zawartości jego składników, z uwzględnieniem warunku, że pojedyncze stężenie flegmatyzatora (mieszaniny aerosolu z azotem) wynosi 44%. Stwierdzono, że optymalne proporcje składników danej mieszaniny są następujące: aerosol – $20\text{-}35 \text{ g/m}^3$, N_2 – 15%-8%. Udowodniono znaczną skuteczność ogniochronną mieszaniny binarnej, która polega na ograniczeniu rozprzestrzeniania się czoła płomieni na całej objętości mieszaniny palnej. Przy tym kula ognia wygasa przed dotknięciem ścian cylindra. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów potwierdzono również synergetyczne oddziaływanie między składnikami binarnej mieszaniny aerosol- azot, które przejawia się w nagłym spadku stężenia jej składników wskutek ich złożonego działania. Składniki mieszaniny działają jednocześnie w roli flegmatyzatorów cieplnych i inhibitorów chemicznych. Otrzymano ujęcia z procesów spalania spowodowanego wybuchem podczas dodawania do stechiometrycznej mieszaniny binarnych mieszanek aerosolu z azotem. Ujęcia potwierdziły zjawisko ograniczania ognia przez flegmatyzator przy jednoczesnym trzykrotnym spadku stężenia aerosolu i azotu, które zapewnia utrzymanie stężenia tlenu na poziomie odpowiednim do utrzymania procesów życiowych człowieka.

Wnioski: W pracy przedstawiono zjawisko ograniczenia rozprzestrzeniania się płomieni na całej objętości mieszaniny paliwowej heptanu z powietrzem podczas dodania do niej binarnej mieszaniny aerosol-azot. Uzyskany efekt jest interesujący z praktycznego punktu widzenia: w celu zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego oraz zabezpieczenia przez wybuchem obiektów, w których znajdują się łatwopalne gazy, ciecze i ich mieszaniny. Praktyczne zastosowanie mieszaniny binarnej do gaszenia i flegmatyzacja będą skutkować zmniejszeniem skali zniszczeń dzięki ograniczeniu rozprzestrzeniania się płomieni na całej objętości jednorodnej mieszaniny paliwowo-powietrznej.

Słowa kluczowe: wybuch, pożar, flegmatyzacja, azot

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Вступление

Защита и предупреждение пожаров и взрывов является актуальной проблемой в связи с постоянным расширением спектра горючих веществ, которые могут образовывать гомогенные горючие паро-газовоздушные смеси способные гореть и взрываться при контакте с источником зажигания. В настоящее время остается открытым вопрос разработки компактных и недорогих систем для тушения и флегматизирования горючих сред с большими, сложными и опасными для доступа объемами, а также объектов с возможным пребыванием людей во время тушения или флегматизирования. В перечень таких объектов входят нефтяные танкеры, резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов, железнодорожные цистерны для горючих жидкостей, кабельные туннели, склады с легковоспламеняющимися жидкостями, боеприпасами, моторные отсеки боевых машин, самолетов, объекты энергетической промышленности машинные залы электростанций, электрические подстанции, а также объекты с возможным временным пребыванием

людей в условно герметичных объемах – трюмах кораблей, подводных лодках, гаражах и проч. Для предотвращения пожаров и взрывов горючих смесей на таких объектах сегодня используют в основном порошковые, хладоновые и газовые системы пожаротушения, но они имеют ряд недостатков: высокая стоимость, большие габариты, сложность монтажа, а их эффективность бывает недостаточной для обеспечения соответствующего уровня флегматизации горючей смеси при разгерметизации защищаемого объема. Известно, что объемные средства для достижения огнетушащего эффекта методом заполнения в большинстве случаев токсичны, особенно это касается хладонов. Кроме того, это может служить причиной летальных последствий в случае несанкционированного срабатывания таких систем и во время пребывания там людей. К тому же, в связи с климатическими изменениями на планете, остро стоит вопрос использования для пожаротушения экологически чистых средств пожаротушения и ограничения выброса хладонов, CO_2 и других парниковых газов в атмосферу.

В наше время существует альтернатива – применение экологически чистых огнетушащих компонентов, в частности азота, и огнетушащих аэрозолей, получаемых сжиганием аэрозольобразующих соединений, состоящих из окислителя и топлива пластификатора. Сочетание преимуществ азота, как экологически чистого, относительно эффективного и дешевого огнетушащего средства с преимуществами огнетушащего аэрозоля позволит получить эффективную бинарную смесь с такими заявленными параметрами, как высокая огнетушащая способность, экологическая чистота, невысокая стоимость и способность эффективно подавлять пламя при концентрации кислорода более 15%, что позволит обеспечивать жизнедеятельность человека в такой среде определенное время.

2. Анализ результатов последних исследований

В соответствии с Монреальским протоколом [1], CO_2 относится к парниковым газам, выброс которых регламентируется, а исследования инновационных экологически безопасных технологий являются приоритетными и соответствуют пункту 4 статьи 2 Протокола. С целью уменьшения выброса CO_2 в атмосферу и достижения пригодной для жизнедеятельности среды, как было указано в цели работы, целесообразно также использовать азот N_2 , который широко применяют в качестве экологически чистого флегматизирующего и огнетушащего агента [2-3]. Азот, как огнетушащий агент, имеет такие ценные характеристики: химически нейтрален к большинству веществ, недорогой, недефицитный, молярная плотность – 28.01 г/моль, что дает возможность равномерно заполнять объем. Огнетушащая концентрация N_2 составляет для этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 36,8%, гексана (C_6H_{14}) – 30,6% и для n-гептана (C_7H_{16}) – 33,6%, [3]. Минимальная расчетная флегматизирующая концентрация N_2 составляет 43,9%, что выше значения минимальной флегматизации для хладонов в 3-4 раза [4].

Существуют и смеси газов, которые разработчики представляют, как экологически чистые, но авторы [5] указывают, что смесь газов, содержащая 52% азота, 40% аргона и 8% диоксида углерода, не оставляет химических производных, не токсична в любых концентрациях. Указанная смесь при введении в объем тушит пламя путем уменьшения концентрации кислорода ниже уровня поддержания горения (12,5%), и это при одновременном увеличении концентрации кислорода CO_2 до 4% в защищаемом объеме. Соответственно такая газовая среда опасная для жизнедеятельности человека, хотя и является относительно экологически чистой. Как видно, указанные концентрации газа, являются достаточно высокими и обеспечивают флегматизацию только благодаря теплофизическим характеристикам и разбавлению горючей среды. Повысить эффективность флегматизирования газа можно путем добавления к инертному газу огнетушащего аэрозоля, принимая во внимание результаты исследований дисперсных смесей ингибиторов и газов.

Известно [6-7], что аэрозольобразующая смесь (АОС) состоит из окислителя – как правило KNO_3 , KClO_4 , KClO_3 , горючего пластификатора – идиитола, эпокси-диановой смолы, лактозы и др, и в отдельных рецептурах газифизирующих добавок – дициандиамида ($(\text{NH}_2)_2\text{C}=\text{N}-\text{C}=\text{N}$) дифениламида ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$) и проч. При горении АОС, в атмосферу выбрасываются ультрадисперсные неорганические соли калия – $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, KOH , KHCO_3 , и проч., а также в небольшом количестве – CO_2 , N_2 и другие газы. Образующийся аэрозоль может

быть устойчивым в воздухе и обеспечивает огнетушащую концентрацию 40-50 г/м³ около 20 минут [8]. Но учитывая размеры частиц аэрозоля, которые составляют в среднем около 5 мкм, огнетушащая эффективность аэрозолей соответственно на несколько порядков выше огнетушащей концентрации порошков и составляет для углеводов 30-70 г/м³ [9], что находится на грани безопасных концентраций для человека. В работах многих авторов освещается зависимость огнетушащей эффективности от размера частиц огнетушащего вещества. Так в работе [10] показано, что с уменьшением размера частиц от 100 до 20 мкм огнетушащая эффективность тушения дисперсными частицами солей KCl , NaCl , K_2CO_3 , KHCO_3 и проч., резко возрастает, как допускают авторы, благодаря теплопоглощению и испарению частиц в пламени. В работе [11] также показано, что огнетушащая эффективность всех огнетушащих порошков увеличивается с ростом степени дисперсности, а автор [12] указал, что чем мельче частицы, тем быстрее и больше они будут прогреваться и отбирать тепло от зоны химической реакции за единицу времени и тем быстрее будет остывать пламя. Однако разбавление зоны горения и отвод тепла частицами порошка является недостаточным для того, чтобы полностью прекратить горение. Так, в работе [13] было показано, что огнетушащий эффект порошков, благодаря ингибированию на основе солей щелочных металлов значительно превышает эффект охлаждения или разбавления, то есть аэрозольные частицы способны эффективно тормозить химические реакции горения, действуя как ингибиторы.

Авторы работ [14-17] показали, что существует прямая зависимость между размерами частиц и огнетушащей эффективностью огнетушащего вещества дисперсной фазы, которая проявляется благодаря возможному испарению этих частиц в пламени, которые потом действуют по схеме гетерогенно-гомогенного механизма. Подтверждают это авторы [18], которые обнаружили, что дисперсные соли KHCO_3 и NaHCO_3 с уменьшением размеров частиц 63 мкм до 38 мкм при тушении пропан-воздушного бунзеновского факела увеличивают свою эффективность благодаря уменьшению огнетушащей концентрации 100 г/м³ до 30 г/м³. Известно, что аэрозольобразующие соединения при сгорании образуют аэрозоль с размерами частиц 1-5 мкм с соотношением до 80% [9]. Так, например, аэрозольобразующая смесь СТК-5-1 которая состоит из идиитола ($\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_2$), нитрата калия (KNO_3) и технических добавок, при горении выделяет $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, KOH , KNO_2 , CO_2 , N_2 , с распределением размеров частиц $D < 2\mu\text{m}$ (42%) $D = 2-5\mu\text{m}$ (38%) $D > 5\mu\text{m}$ (20%) [9]. При этом в продуктах горения АОС различного состава, которые зависят от вида горючего пластификатора и окислителей, а также от их соотношения, может находиться в среднем 0,5 л газовых компонентов (CO_2 , H_2O , N_2), причем продукты неполного сгорания (N_xO_y , CO) во внимание не принимали, исходя из условия, что их содержание незначительно. Примерные соотношения газовых компонентов аэрозоля, который образуется в результате сгорания 1 г АОС на основе лактозы и идиитола, показаны в таблице 1 [19].

При добавлении азота к указанному аэрозолю огнетушащая эффективность полученной бинарной аэрозольно-азотной смеси (БААС) должна увеличиться. Получение такого эффекта подтверждают авторы, [20] указывающие на синергизм физических и химических компонентов смеси и в результате снижение огнетушащей концентрации физического компонента при добавлении лишь 1,52% химического ингибитора. Значительное увеличение огнеподавляющей эффективности при

Таблица 1. Характеристики рецептур АОС на основании органических горючих [19]
Table 1. Specifications of the mixture for aerosol formulation recipes based on organic fuels [19]

Соотношение компонентов АОС [% масс] / Components ratio of the mixture for aerosol formulation [% weight]				Продукты горения / Combustion products			
				газовая фаза V/гр АОС / gas phase V l/g AMM			V газов л/г АОС Gas V l/g mixture for aerosol formulation
Горючее / Fuel		KNO ₃	KClO ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂	
Идитол / Iditol	17	83	-	0,2522	0,1164	0,0916	0,47
Лактоза / Lactose	32	68	-	0,2354	0,2354	0,075	0,55
Идитол / Iditol	15	69	16	0,2118	0,0977	0,0767	0,39
Лактоза / Lactose	27,6	60	12,4	0,2063	0,2063	0,0666	0,48

комплексном применении дисперсных огнетушащих средств и газов подтверждают и другие авторы. Так в работе [21] отмечается, что с помощью смеси свободных радикалов-производителей и агентов N₂ или CO₂, может быть достигнуто уменьшение концентрации химических агентов в 3-4 раза. Анализ общих закономерностей процессов ингибирования показывает, что повысить эффективность ингибирующих средств можно снизив содержание окислителя в горючей смеси, причем не во всем помещении, а только в зоне действия ингибирующих веществ, то есть в зоне горения. Таким образом, делает вывод автор [22], негорючие газообразные компоненты дополнительно разбавляют горючую систему, снижают концентрацию кислорода и тем самым резко повышают эффективность огнетушащего действия ингибитора. При этом авторы [23] указывают, что добавление азота приводит к уменьшению в 2,5 раза огнетушащей концентрации хладона 2402 при тушении н-гептана. Так, например, разбавление смеси «природный газ + воздух» на 10% азотом снижает огнетушащую концентрацию хладона в 2 раза, а при разведении на 20%, огнетушащая концентрация хладона составляет всего 0,5-0,6%. Подобный эффект наблюдается и при использовании CO₂. Из работы [19] известно, что добавление небольшого количества CO₂ до аэрозоля, образованного из АОС на основе лактозы, значительно повышает флегматизирующую эффективность полученной газоаэрозольной смеси, которая хорошо флегматизирует гексановоздушную смесь при соотношении аэрозоля - 15 г/м³ и 9% CO₂, что хорошо согласовывается с результатами работы [24], где CO₂ в смеси с хладон 1301 дает низшие огнетушащие концентрации, чем азот и аргон. Причем авторы [24] на основе расчетов температуры пламени указали, что инертные газы ведут к снижению температуры пламени, а ингибирующий эффект пламени был усилен благодаря уменьшению температуры пламени, что привело к синергическому повышению эффективности пожаротушения смесью хладона-1301 и CO₂.

Таким образом, принцип объемного тушения аэрозолей с добавкой газов- флегматизаторов уместно рассматривать как комбинированное действие огнетушащих средств, которые сочетают в себе эффекты охлаждения, ингибирования и разбавления, что приводит к значительному конечному огнетушащему эффекту.

Исходя из анализа исследований огнетушащих эффектов от добавок газов- флегматизаторов к огнетушащим веществам, можно утверждать, что незначительная добавка азота к аэрозольному ингибитору приведет к существенному росту огнетушащей эффективности газоаэрозольной смеси благодаря синергизму между аэрозолем и азотом.

В общем, процесс флегматизации газоаэрозольной смесью такой: БААС, которая состоит из двух компонентов – твердой фазы огнетушащего аэрозоля – смеси неорганических солей калия – K₂O, K₂CO₃•2H₂O, KHCO₃, KOH, KCl, KNO₃, подается в защищаемый объем вместе с газом N₂, (CO₂).

Учитывая проведенный обзор, из особенностей взаимного влияния компонентов бинарных газоаэрозольных смесей на эффективность флегматизирования горючих углеводородных сред, в замкнутых помещениях, можно утверждать о значительной актуальности использования указанных бинарных смесей. Определение эффективности и особенностей флегматизирования бинарной аэрозольно-азотной смесью является основой для создания огнетушащих и флегматизирующих систем на основе БААС. Системы могут сохранять концентрацию кислорода, нужного для жизнедеятельности человека, являются экологически чистыми и могут применяться для противопожарной защиты объектов различного назначения, где возможно возникновение взрывов и пожаров классов А, В, С и Е.

3. Цель работы

Исходя из этого, можно отметить, что целью работы является теоретическое обоснование и экспериментальное определение эффективности и особенностей флегматизирования бинарными аэрозольно-азотными смесями на примере гомогенной горючей стехиометрической гептановоздушной смеси.

4. Методы исследований

Для определения флегматизирующей эффективности и особенностей предложенной бинарной аэрозольно-азотной смеси использовали следующие материалы и устройства. Аэрозольобразующая смесь (АОС), состоит из идитола (C₁₃H₁₂O₂) – 20 % и нитрата калия (KNO₃) – 80 %. АОС готовят предварительным перемешиванием, измельчением и прессованием соответствующих масс заряда. Азот – N₂, химически чистый. Видеофиксацию взрывного сгорания проводили фотокамерой Nikon 1 J4, которая может получать 3-х секундные видеоролики с частотой 1200 кадров в 1 секунду при разрешении 416 x 144 p [25].

Также были использованы экспериментальная установка и методика.

Основной установки (рис. 1) служит толстостенная стеклянная цилиндрическая емкость объемом 0,5 л с мощным электрическим источником зажигания, расположенным внутри цилиндра. Верхняя и нижняя части

цилиндра закрыты крышками. На нижней крышке расположены: источник зажигания 2; спиральный воспламенитель АОС 5, а в верхней крышке есть отверстие, закрытое резиновой пробкой 4. Стекланный корпус цилиндра 1 закреплен на станине на двух вертикальных стойках 6. Крепление стекланный цилиндра дает возможность вращать его в вертикальной плоскости. В резиновой пробке держится газовая труба, по которой подают газ.

Зажигание навески АОС проводили спиральным электрическим воспламенителем, дозировку газа проводили с помощью поршневого мерника объемом 100 мл. Эксперимент проводили следующим образом: Цилиндр подогревали до 50 °С, капали соответствующее количество n-гептана для получения концентрации, близкой к стехиометрической, после чего в объеме цилиндра сжигали навеску АОС и вносили соответствующее дополнительное количество азота N_2 , перемешивали полученную смесь и поджигали нажатием кнопки электровоспламенителя 3. Результаты испытаний регистрировали на видеоролик с такими состояниями – «взрыв», «отказ», «замедленное сгорание».

5. Результаты исследований

5.1. Процесс взрыва стехиометрической гептановоздушной смеси

С целью сравнения скорости сгорания и установления первичной картины процесса взрывного сгорания гомогенной стехиометрической гептановоздушной горючей смеси было проведено видеофиксацию взрыва в установке «цилиндр». Результаты раскадровки представлены на рисунке 2.

Полное время взрыва составило около 100 мс. Как видно из раскадровки, взрывное горение стехиометрической гептановоздушной смеси (СГВС), можно условно разделить на 2 этапа. На 1 этапе (позиция 2.1-2.7) происходит быстрое распространение фронта пламени в цилиндре, при близкой к стехиометрической концентрации, о чем свидетельствует насыщенный голубой цвет фронта пламени (позиция 2.1-2.10) за время равное около 42 мс. При этом фронт пламени равномерно распространяется

в обе стороны в позиции 2.6. Затем с верхнего отверстия под действием давления фронта ударной волны вылетает пробка – (позиция 2.7). Далее начинается 2 этап, где в процессе взрывного горения происходит догорание горючей смеси (позиция 2.8), которая осталась в нижней части цилиндра, причем распространение пламени несколько замедляется и догорание проходит почти в два раза дольше чем горение на первом этапе (рис 2. поз. 2.1-2.6).

При горении в нижней части цилиндра происходит выход нагретых продуктов горения, о чем можно судить по желто-красному цвету газов (показано стрелками на поз. 2.11), где появляется желтая зона газов к поз. 2.15 – где желтая зона выбрасывается наружу через верхнее отверстие (показано стрелкой поз. 2.15). В конечном результате (позиции 2.16-2.19) пламя распространяется на нижнюю часть цилиндра, что приводит к конечному выгоранию смеси в объеме цилиндра. Разделение зоны горения и продуктов горения показано стрелками (позиции 2.11-2.19). Далее идет процесс загорания, что сопровождается остыванием продуктов горения в цилиндре (рис. 2. поз. 2.20-2.24). Соответственно полное сгорание гептановоздушной смеси с остыванием продуктов горения и остывание их остатка в цилиндре в целом происходит за время примерно равное 100 мс.

5.2. Процесс взрыва СГВС с добавкой N_2

Из проведенного анализа известно, что добавки азота уменьшают скорость горения смеси и поэтому, с целью определения характера влияния добавок азота на горючую смесь провели эксперимент с добавкой 10% азота к СГВС.

Результаты протекания взрыва СГВС с добавкой 10% N_2 показаны в раскадровке процесса на рисунке 3.

Как видно из раскадровки, добавка к горючей смеси всего 10% N_2 уже значительно снижает скорость распространения пламени, что можно определить по увеличению времени взрывного горения, которое возросло до 220 мс. Причем во время взрывного сгорания во всех случаях (6 попыток) присутствовали характерные этапы, показаны и указаны стрелками на примере на раскадровке на рисунке 3. Первый этап, который показан на рис. 3, поз. 3.1.-3.4 включал в себя распространение сферы фронта горения, причем цвет пламени изменился

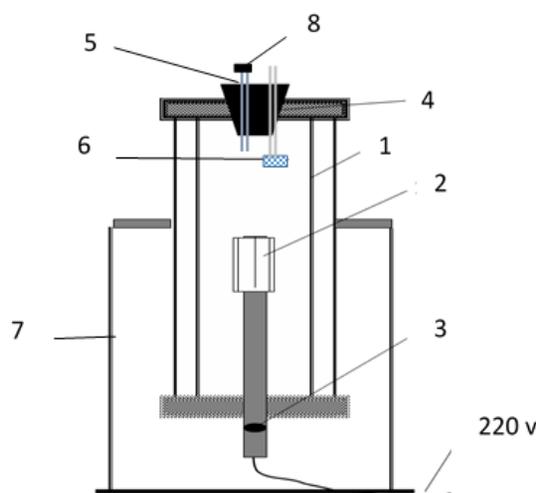


Рис. 1. Прибор для определения концентрации флегматизирующей смеси газов и аэрозолей. 1. Стекланный корпус цилиндра.

2. Электрический воспламенитель. 3. Кнопка электрического поджига. 4. Резиновая пробка. 5. Газовая труба. 6. Спиральный воспламенитель. 7. Вертикальные стойки. 8. Заглушка

Fig. 1. Device for determining the concentration of phlegmatizing mixture of gas and aerosol. 1. Glass body of the cylinder. 2. Electric igniter.

3. Electric igniter button. 4. Rubber cork. 5. Gas pipe. 6. Spiral igniter. 7. Vertical bar. 8. Plug.

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

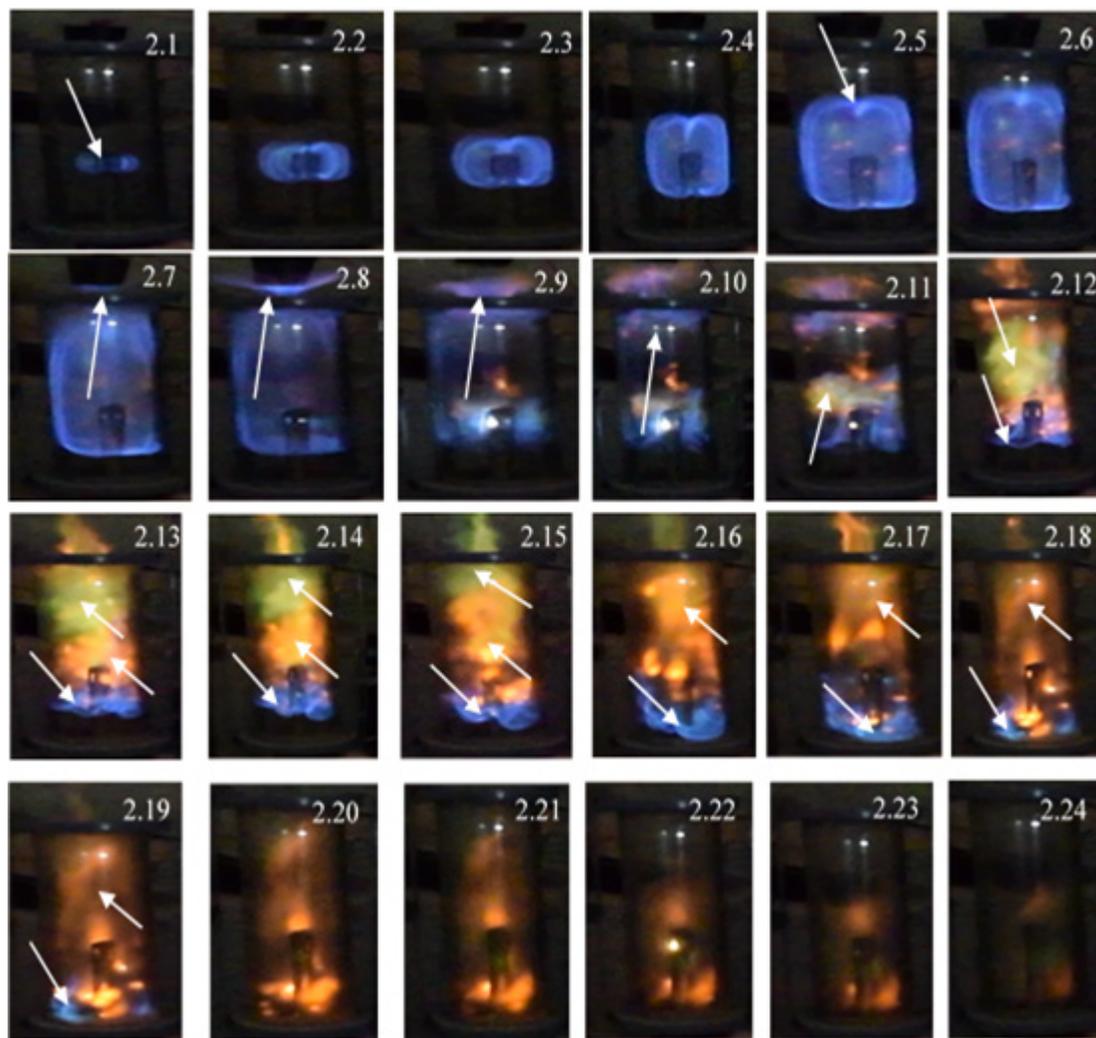


Рис. 2. Раскадровка взрыва СГВС. Время взрыва $\tau_v \approx 100$ мс
 Fig. 2. A storyboard of the explosion of stoichiometric gas-air mixture. Time of explosion ≈ 100 ms

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

с красного (рис 3. поз. 3.1-3.6) на бирюзовый (рис. 3, поз. 3.9-3.11). Время 1 этапа в течение которого происходило распространение пламени наружу к выбросу из верхнего отверстия пробки составляло около 125 мс (рис. 3, поз. 3.1-3.6). После чего фронт горения изменил цвет на красный (рис. 3. поз. 3.2-3.3) увеличивался и длился около 50 мс (рис. 3, поз. 3.4-3.7) и достигнув верхней стенки пламени резко выталкивал пробку наружу (рис. 3, поз. 3.8-3.12) за время около 25 мс, после контакта со стенкой. После выталкивания пробки, во втором этапе, цвет пламени резко менялся на красный, причем в верхней части цилиндра, там где смесь контактировала с воздухом цвет пламени приобретал голубой окрас (показано стрелками на рис. 3.10-3.12), что свидетельствует о большей полноте сгорания смеси. После выхода фронта пламени наружу, цвет нагретых газов также резко приобретал красную окраску. Газы не меняли цвета внутри цилиндра к полному затуханию и остывания (рис. 3, поз. 3.12-3.16). Исходя из результата эксперимента, добавка всего 10% N_2 привела к уменьшению скорости горения гептановоздушной смеси до 2-х раз. При дальнейшем увеличении концентрации азота было определено, что минимальная флегматизирующая концентрация азота для СГВС в условиях цилиндра составляет 43%.

5.3. Процесс взрыва СГВС при концентрации аэрозоля – 60 г/м^3

В следующей серии испытаний было определено что флегматизирующая концентрация, самого аэрозоля, составляет 66 г/м^3 . Раскадровка процесса горения при добавлении к гептановоздушной смеси указанного аэрозоля при концентрации несколько ниже флегматизирующей, а именно при 60 г/м^3 , показана на рисунке 5.

В процессе сгорания СГВС, при наличии аэрозоля, четко наблюдался эффект замедления распространения пламени. Даже при концентрациях гептана, близких к стехиометрических, при добавке аэрозоля $45\text{-}60 \text{ г/м}^3$, наблюдалось частичное распространение пламени по объему СГВС. Время сгорания увеличилось в 7 раз по сравнению с горением чистой стехиометрической гептановоздушной смеси. Как видно на рис. 4 (поз. 4.1-4.5), распространения пламени, происходило только вверх, в виде круглой сферы от источника зажигания без распространения по всей смеси. Нижний край фронта пламени оставался приблизительно на уровне начального горения. При этом во всех случаях пламя имело красный цвет, что свидетельствует о невысокой скорости сгорания, и подтверждается большим временем сгорания СГВС.

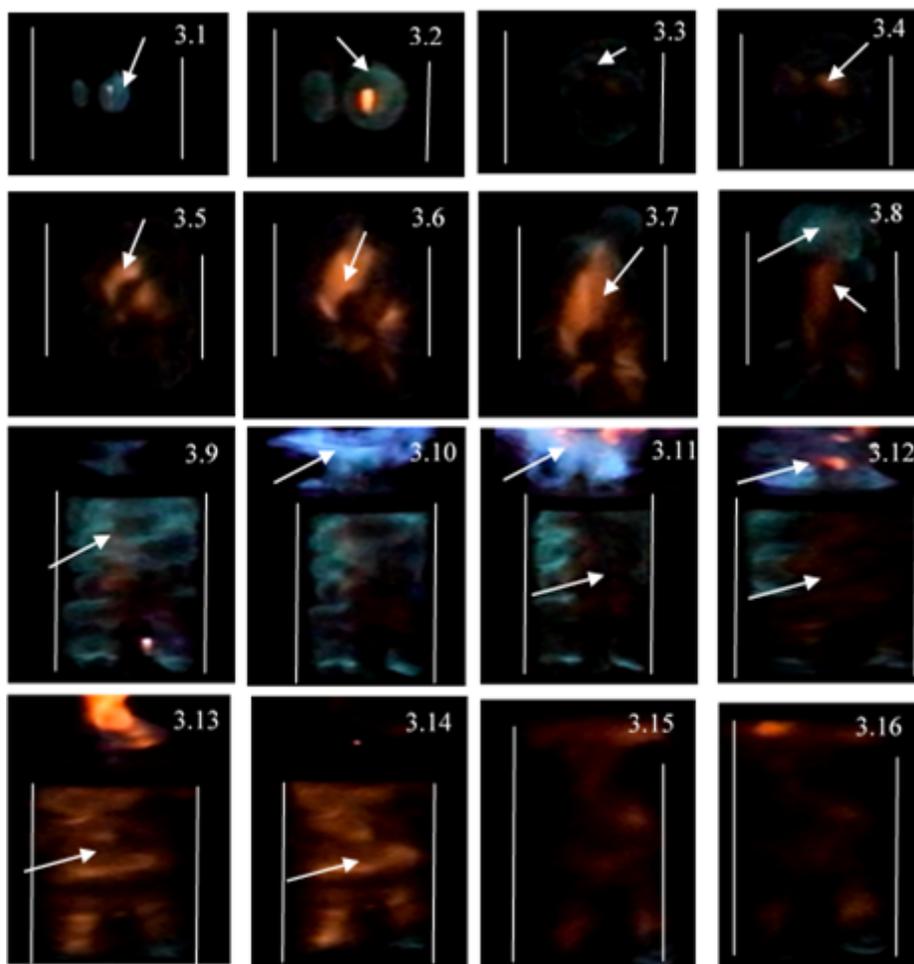


Рис. 3. Раскадровка взрывного горения СГВС с добавкой %10 азота. Время взрыва $t_{\text{в}} \approx 210$ мс
Fig. 3. A view of the explosive combustion of stoichiometric gas-air mixture with additive of 10 % nitrogen. Time of explosion ≈ 210 ms
Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

5.4. Изменение флегматизирующей концентрации для СГВС в зависимости от соотношения аэрозоля и азота в БААС

Для подтверждения выдвинутой мысли о том, что совместное действие аэрозоля с добавками азота приведет к значительному повышению флегматизирующей эффективности бинарной смеси, была проведена серия экспериментов и получены соответствующие зависимости, показанные на рисунке 5. График зависимости флег-

матизирующей концентрации был построен с условием того, что флегматизирующая концентрация для аэрозоля составляла 66 г/м^3 , а для азота – до 43%.

На рисунке 5 приведен график зависимости изменения флегматизирующей концентрации для СГВС от соотношения содержания огнетушащего аэрозоля, и азота при совместной их подачи в испытательную камеру. Как видно из графика, экспериментальные значения компонентов БААС, расположены ниже значений,

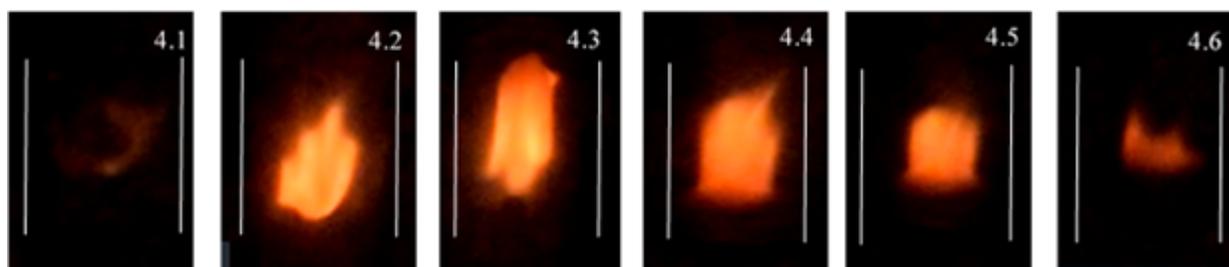


Рис. 4. Раскадровка взрыва СГВС при концентрации аэрозоля – 60 г/м^3 . Время взрыва $t_{\text{в}} \approx 575$ мс
Fig. 4. A storyboard of a stoichiometric gas-air mixture explosion at aerosol concentration – 60 г/м^3 . Time of explosion ≈ 575 ms
Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

которые бы соответствовали точкам на пунктирной прямой в случае аддитивности, то есть зафиксирован эффект синергизма между указанными компонентами бинарной аэрозольно-азотной смеси.

5.5. Зависимость флегматизирующей эффективности бинарной аэрозольно-азотной смеси (БААС) для СГВС от изменения концентрации N_2 при постоянной концентрации аэрозоля в 20 г/м^3

Для выявления особенностей, зависимостей и эффективности флегматизации, при изменении всего лишь концентрации азота в бинарной газоаэрозольной смеси было проведено исследование при увеличении концентрации азота от 2% до 15% при постоянной концентрации аэрозоля в 20 г/м^3 .

Результаты исследований показали, что при добавлении азота в диапазоне от 2% до 6% происходит распространение пламени на весь объем цилиндра. Дальнейшее увеличение концентрации азота в БААС приводит к ограничению распространения пламени на весь объем цилиндра, при этом значительно увеличивается время зажигания горючей смеси. При увеличении концентрации азота до 10%, распространение пламени происходит лишь на верхнюю часть цилиндра. При концентрации N_2 от 12% до 14%, пламя вообще распространяется лишь в пределах сферы от первичного зажигания, которая самозатухает. Давление при этом слишком низкое даже для выталкивания пробки из отверстия цилиндра. Результаты и характеристики процессов взрывного сгорания таких смесей число с добавлением БААС приведены в таблице 2.

5.6. Взрыв СГВС в результате добавки БААС при соотношении аэрозоля – 15 г/м^3 , азота – 10%

С целью определения влияния изменения концентрации аэрозоля на флегматизирующую эффективность БААС было исследовано флегматизирующую эффективность БААС с таким соотношением ее компонентов: аэрозоль – 15 г/м^3 и N_2 – 10%.

Результаты эксперимента (рис. 6.) показали, что при уменьшении концентрации аэрозоля до 15 г/м^3 пламя будет распространяться на весь объем цилиндра, но вре-

мя взрывного горения СГВС так и остается – около 600 мс. На рис. 6 представлена раскадровка взрывного горения на которой стрелками показано, что на первом этапе происходит медленное распространение фронта пламени (поз. 6.1.-6.6). После контакта фронта со стенкой цилиндра происходит резкое ускорение реакции (поз. 6.7.-6.19) с образованием турбулентного фронта пламени, который приводит к резкому увеличению скорости реакции и выталкиванию пробки (поз. 6.9.) после чего реакция резко ускоряется (поз. 6.10-6.12.), и заканчивается тем, что пламя меняет цвет на красный и затухает (поз. 6.13-6.15.)

5.7. Сравнение времени взрывного сгорания СГВС при флегматизировании добавками азота, аэрозоля и БААС

Для сравнения времени прохождения процессов взрывного горения СГВС, при добавлении азота, аэрозоля, и БААС была построена соответствующая блок-схема (рис. 7), на которой визуализированы во времени процессы протекания взрывного горения в указанных условиях.

При добавлении к СГВС 10% N_2 , время взрывного горения увеличивается в два раза – до 210 мс, как было сказано, по сравнению с горением СГВС без флегматизирующей добавки, (поз. 7.2.). Как видно из рис. 7.2, когда горение СГВС уже закончилось на 100 мс, при добавлении N_2 , на 125 мс, только происходит распространение сферы пламени (рис. 7.2), после чего пламя за короткое время распространяется по всему объему смеси за 135-150 мс и прекращает гореть на 210 мс. Добавка аэрозоля к СГВС в количестве 60 г/м^3 значительно уменьшает скорость, и пламя теряет четкие очертания первичной сферы горения и медленно распространяется по СГВС сначала с увеличением времени (рис. 7.3.) 125-500 мс, а затем с уменьшением на 500-525 мс. Причем пламя не достигает даже стенок цилиндра и затухает на 575 мс. При уменьшении концентрации аэрозоля с 60 г/м^3 до 15 г/м^3 происходит тоже распространение пламени, но при этом пламя так же, как и в предыдущем случае, увеличивается в размере до 374 мс, после чего происходит резкая активизация горения и вылетает под давлением пробка из цилиндра. Далее пламя активно распространяется на весь объем смеси и после 423 мс начинает уменьшаться в размерах и затухает. Причем догорания и остывания

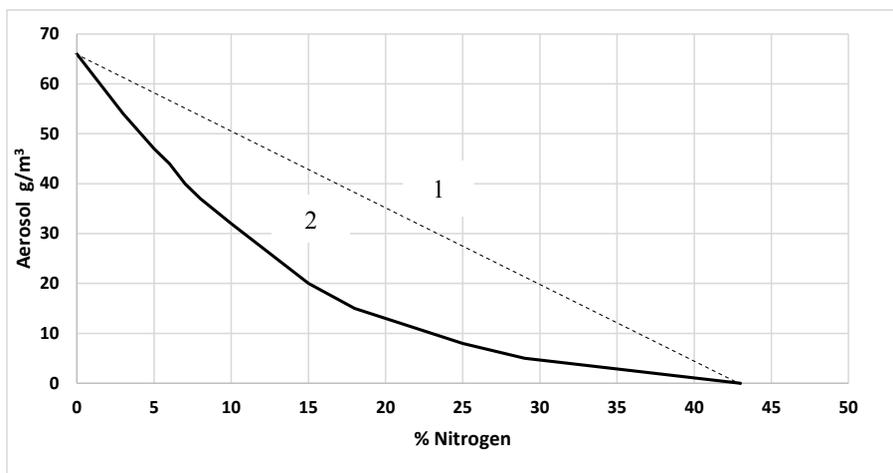


Рис. 5. График изменения флегматизирующей концентрации для СГВС, в зависимости от соотношения аэрозоля и азота: 1 – прямая зависимости (теоретическая) в случае аддитивности; 2 – кривая зависимости по экспериментальным данным
Fig. 5. Schedule of change of phlegmatizing concentration for stoichiometric gas-air mixture, depending on the ratio of aerosol and nitrogen: 1 – Direct line of dependence (theoretical) in case of additivity; 2 – Curve of dependence according to the experimental data

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Таблица 2. Зависимость флегматизирующей эффективности бинарной аэрозольно-азотной смеси (БААС) и характера взрывного горения СГВС от изменения концентрации N_2 при постоянной концентрации аэрозоля в 20 г/м^3

Table 2. Influence of the phlegmatizing efficiency of the binary aerosol-nitrogen mixture and the nature of explosive combustion of stoichiometric gas-air mixture on the changes in the concentration of N_2 at constant aerosol concentration of 20 г/м^3

№ / No.	N_2 , %	Результат / Result
1	4	Возгорание после действия источника зажигания 1 с. Медленное распространение пламени. Незначительное увеличение давления. Распространение пламени на весь объем паровоздушной смеси. Ignition initiated by the source of ignition starts within 1 second. Slow spread of the flame. A slight increase of pressure. The spread of the flame within the whole volume of vapour-air mixture.
2	6	Возгорание после действия источника зажигания 2 с. Медленное распространение пламени. Незначительное увеличение давления. Распространение пламени на весь объем паровоздушной смеси. Ignition initiated by the source of ignition starts within 2 seconds. Slow spread of the flame. A slight increase of pressure. The spread of the flame within the whole volume of vapour-air mixture.
3	8	Возгорание после действия источника зажигания 2 с. Медленное распространение пламени. Незначительное увеличение давления. Ограниченное распространение пламени на 80 % объема. Ignition initiated by the source of ignition starts within 2 seconds. Slow spread of the flame. A slight increase of pressure. Flame spread over 80% of the volume.
4	10	Возгорание после действия источника зажигания 3 с. Медленное распространение пламени. Незначительное увеличение давления. Ограниченное распространение пламени на 50% объема. Ignition initiated by the source of ignition starts within 3 seconds. Slow spread of the flame. A slight increase of pressure. Flame spread over 50% of the volume.
5	12	Возгорание после действия источника зажигания 3с. Медленное распространение пламени. Незначительное увеличение давления. Ограниченное распространение пламени в пределах первичной сферы. Ignition initiated by the source of ignition starts within 3 seconds. Slow spread of the flame. A slight increase of pressure. Flame spread throughout the primal sphere.
6	15	Флегматизация / Phlegmatization.

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

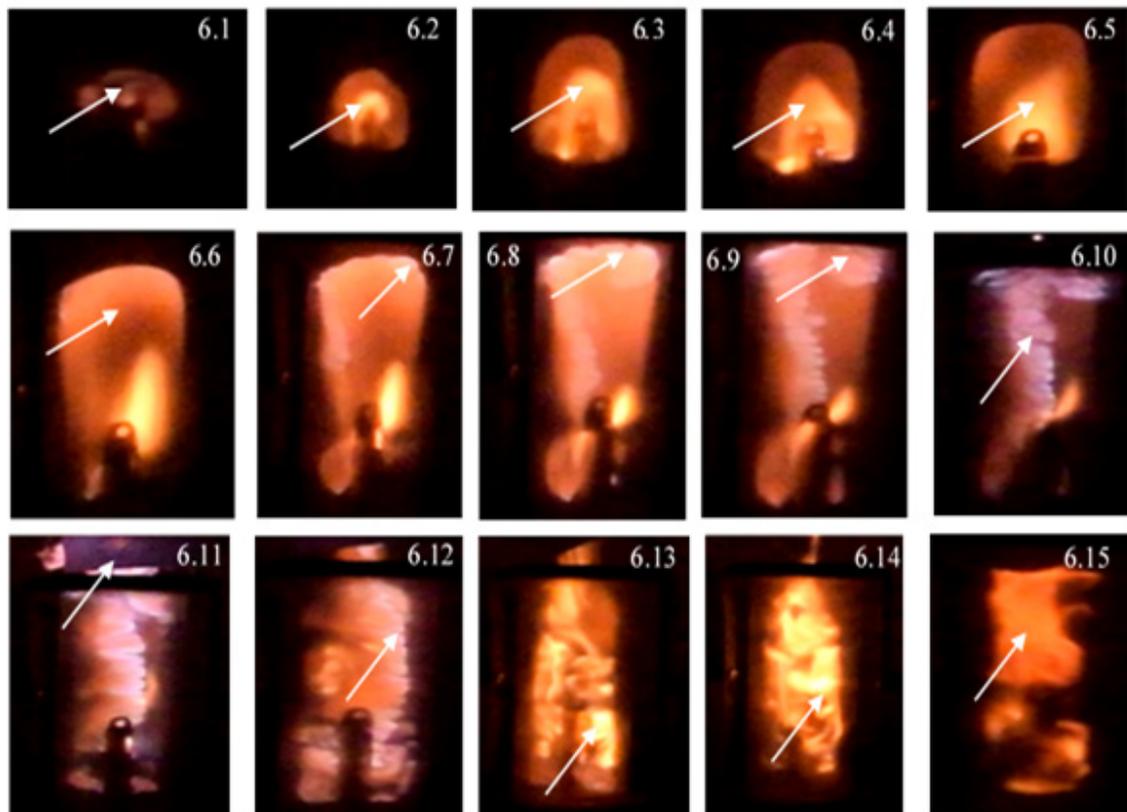


Рис. 6. Раскадровка взрыва СГВС в результате добавления БААС при соотношении: аэрозоля – 15 г/м^3 , азота – 10%. Время взрыва $\approx 623 \text{ мс}$
Fig. 6. A view of the explosion of the stoichiometric gas-air mixture when the binary aerosol-nitrogen mixture is added; at the ratio: aerosol – 15 г/м^3 , nitrogen – 10%. Time of explosion $\approx 623 \text{ ms}$

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

смеси происходит в течение 200 мс, с 423 мс до 623 мс. Соответственно время уменьшения и прекращения горения как в случае с добавкой аэрозоля, так и при добавке БААС (рис. 7.4) есть почти одинаково, но концентрация аэрозоля при этом в 4 раза меньше. При увеличении концентрации аэрозоля до 20 г/м^3 и $\text{N}_2 - 12,5\%$ (рис. 7.5) пламя едва распространяется, при этом теряет очертания первичной сферы и хаотично приобретает максимальный в этом случае размер на 250 мс, после чего начинает незначительно уменьшаться в размерах после 250 мс до 575 мс, а на 625 мс происходит окончательное догорание и остывание. Таким образом флегматизирующее действие на СГВС, БААС с соотношением аэрозоля 20 г/м^3 и $12,5\% - \text{N}_2$, является самым эффективным учитывая полученные результаты – наименьшая скорость сгорания СГВС и небольшие размеры первичной сферы. Аэрозоль при указанной концентрации, опираясь на исследования авторов по токсичности аэрозоля и его влиянию на живые организмы [26-27], представляет опасность при огнетушащих концентрациях $40-50 \text{ г/м}^3$. При этом аэрозоли, полученные из генераторов аэрозоля без блоков-охладителей, обеспечивали 100% выживаемость белых крыс, а аэрозоли, полученные с блоками-охладителями, были значительно более токсичны, но и при этом смертность белых крыс составляла от 10-50%. Концентрация кислорода при добавлении в воздух БААС с соотношением компонентов $15\% \text{ N}_2$ и 20 г/м^3 аэрозоля, составит более 16%, что будет соответствовать условиям жизнедеятельности человека [27-28].

6. Вывод

Результаты экспериментов показали, что значение флегматизирующей концентрации аэрозоля, полученного из АОС на основе идигола, для стехиометрической гептановоздушной смеси составляет 66 г/м^3 . Также получена зависимость флегматизирующей концентрации БААС от соотношения компонентов в ней, в диапазоне концентраций: для аэрозоля до 66 г/м^3 и азота до 44%. Установлено, что оптимальные соотношения компонентов указанной смеси лежат в таких пределах: аэрозоль – $20-35 \text{ г/м}^3$, $\text{N}_2 - 15-8\%$.

В результате проведенных экспериментов подтверждено также синергическое действие между компонентами бинарной аэрозольно-азотной смеси, что проявляется в резком снижении концентрации ее компонентов благодаря комбинированному действию компонентов бинарной аэрозольно-азотной смеси, которые действуют одновременно как тепловые флегматизаторы и химические ингибиторы. Получены раскадровки процессов взрывного сгорания при добавлении к стехиометрической смеси бинарных аэрозольно-азотных смесей, которые подтверждают значительный огнеподавляющий эффект при снижении концентрации аэрозоля и концентрации азота до 3 раз, что обеспечивает концентрацию кислорода, необходимую для жизнедеятельности человека. Определено, что в указанном диапазоне время горения смеси возрастает почти в 6 раз с одновременным резким уменьшением давления и значительным ограни-

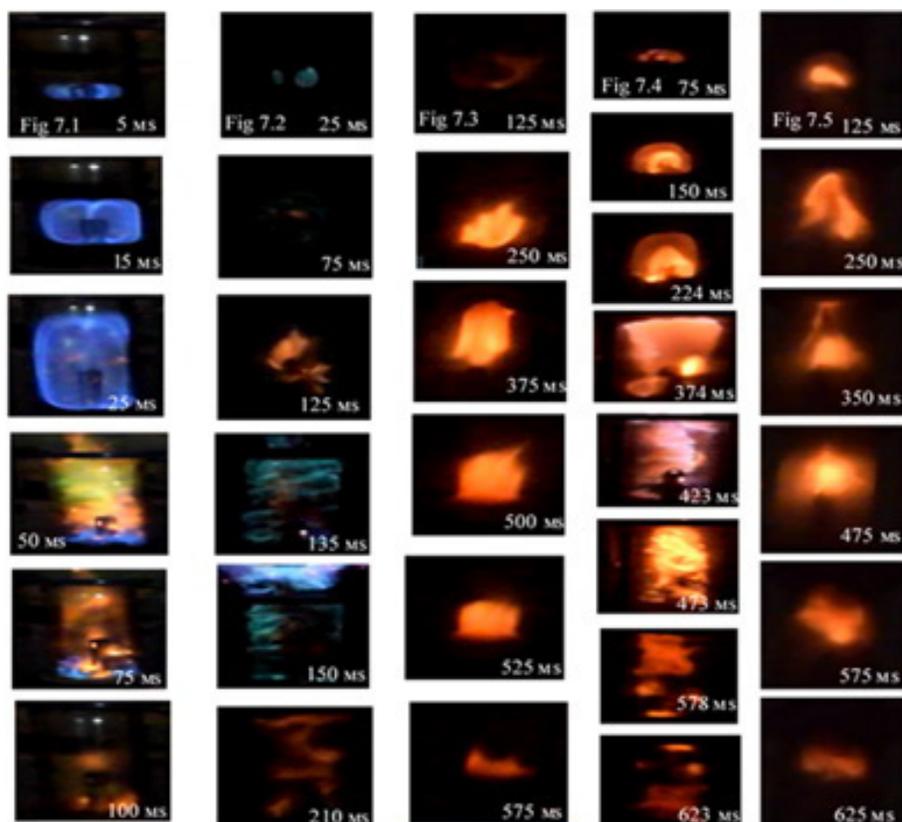


Рис. 7. Визуализация процессов взрывного сгорания СГВС: 7.1 Взрывное горение стехиометрической гептановоздушной среды. 7.2. Добавка $10\% \text{ N}_2$. 7.3. Добавка аэрозоля 60 г/м^3 . 7.4. Добавка БААС с соотношением аэрозоля – 15 г/м^3 , $\text{N}_2 - 10\%$. 7.5. Добавка БААС с соотношением аэрозоля – 20 г/м^3 , $\text{N}_2 - 12,5\%$

Fig. 7. A view of the explosive combustion processes of the stoichiometric gas-air mixture: 7.1 Explosive stoichiometric combustion of heptane and air mixture. 7.2. Additive of $10\% \text{ N}_2$. 7.3. Additive of aerosol 60 г/м^3 . 7.4. Additive of BAMM in ratio of aerosol – 15 г/м^3 , $\text{N}_2 - 10\%$. 7.5. Additive of the binary aerosol-nitrogen mixture in ratio of aerosol – 20 г/м^3 , $\text{N}_2 - 12,5\%$

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

чением объема распространения пламени по горючей смеси, что должно значительно уменьшить объемы разрушений в таких средах при условии, что взрыв все-таки состоялся.

Исходя из результатов работы, можно отметить, что аэрозоль и бинарные аэрозольно-азотные смеси являются эффективными флегматизаторами горючих газопаровоздушных систем, и могут быть альтернативой для использования в системах и устройствах пожаротушения, которые можно использовать на нефтяных танкерах, резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов, железнодорожных цистернах для горючих жидкостей, кабельных туннелях, складах с легковоспламеняющимися жидкостями, складах с боеприпасами, моторных отсеках боевых машин, самолетах, труднодоступных объемах на объектах энергетической, химической промышленности, а также на объектах с возможным временным пребыванием людей в условно герметичных объемах – трюмах кораблей, подводных лодках, гаражах и других объектах с пребыванием людей при сохранении жизнепригодной среды.

Литература

- [1] 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, [electr. doc.] <http://ozone.unep.org/en/information-material>, [accessed: 10.11.2016].
- [2] Linteris G.T., *Clean Agent Suppression of Energizer Equipment Fires*, National Institute of Standards and Technology, January 2009.
- [3] Moore T.A., Yamada N., *Nitrogen gas as a halon replacement*, Halon Options Technical Working Conference, 12-14 May, 1998, pp. 330-338.
- [4] Tsapko O.Yu., Tsapko Yu.V., Balanyuk V.M., *Determination of fire extinguishing and inerting ability of ozone safe gaseous fire extinguishing substances*, "Fire safety" 2011, 19, 156-162.
- [5] Inergen-extinguishing systems. Tyco, <http://www.tycofis.co.uk/products/Gaseous-Fire-Suppression/inergen-overview>, [accessed: 10.11.2016].
- [6] Agafonov V.V., Kopylov N.P., "Aerosol Extinguishing System: Elements and Characteristics, [in:] *Design, Erection and Operation*, VNIPO, Moscow 1997, 232.
- [7] Silin N.A., Emel'janov V.N., *Pyrotechnic Aerosol Generating Compositions and Fire Suppressing Systems*, [in:] *Conversion Concepts for Commercial Applications and Disposal Technologies of Energetic Systems*. Volume 14 of the series NATO ASI Series, 121-129.
- [8] Agafonov V.V., Kopylov N.P., *Design, assemblage and usage of aerosol installations for fire protection*, VNIPO, Moscow 1999, (in Russian).
- [9] Agafonov V.V., Kopylov S.N., Sychev A.V., Uglov V.F., Zhyganov D.B., *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols*, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings, HOTWC 2005, 1-10.
- [10] C.T. Ewing, Faith F.R., Romans J.B., Hughes J.T., Hower W.C., *Flame extinguishment properties of dry chemicals: extinction weights for small diffusion pan fires and additional evidence for flame extinguishment by thermal mechanisms*, "J. Of Fire Prot. Engr." 1992, 4(2), 35-52, doi: 10.1177/104239159200400201.
- [11] Fischer G., Leonard J.T., *The Effectiveness of Fire Extinguishing Powders Based on Small Scale Fire Suppressant Tests*, Naval Research Laboratory, NRVMMW6180-95-7778, Washington DC 1995.
- [12] Shorin S.N., Balin, V.A. *The effect of inert dust to the normal speed of propagation of flame in combustible gas mixtures, theory of combustion*, proceedings of the all-Moscow seminar on the theory of combustion: collection of scientific papers, Science, Moscow 1970, 93-100.
- [13] Gogol L.A., Kononenko K.M., et. al., *The inhibition of propane combustion aerosols of metal salts. Inhibition of chain gas reactions*, [in:] *Proceedings of the workshop on the mechanism of inhibition of chain gas reactions*, Alma-ATA 1971, 205-213.
- [14] Dewitte M. Vrebosh J. Van Tiggelen A., *Inhibition and Extinction of Premixed Flames by Dust Particles*, "Combustion and Flame" 1984, 8(4), 257-266, doi: 10.1016/0010-2180(64)90079-3.
- [15] Fleming J.W., Reed M.D., et. al., *Extinction studies of propane/air counterflow diffusion flames: the effectiveness of aerosols*, Halon Options Technical Working Conference 12-14 May 1998.
- [16] Mc Hale E.T., *Flame Inhibition by Potassium Compounds*, "Combust and Flame" 1975, 24(2), 277-279, doi: 10.1016/0010-2180(75)90159-5.
- [17] Mitani T., Niioka T., *Comparison of Experiment and Theory on Heterogeneous Flame Suppressants*, "Nineteenth Symposium on Combustion: The Comb. Inst." 1982, 19(1), 869-875, doi: 10.1016/S0082-0784(82)80262-2.
- [18] Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S., *Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type*, NIST Special Publications, 2002.
- [19] Balanyuk V.M., Zhurbinskiy D.A., *Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays*, BiTP Vol. 32 Issue 4, 2013, pp. 53-58, doi:10.12845/bitp.32.4.2013.6.
- [20] Christian S.D., Kerr P., Tucker E.E., Sliepevich C.M., Hagen A.P., *Synergism in flame extinguishment: New results for mixtures of physical and chemical agents*, Halon Options Technical Working Conference 6-8 May 1997, pp. 88-105.
- [21] Lott J.L., Christian S.D., Sliepevich C.M., Tucker E.E., *Synergism Between Chemical and Physical Fire-Suppressant Agents*, "Fire Technology" 1996, 323, 260-271, doi: 10.1007/BF01040218.
- [22] Zhartov'skyy V.M., Otkidach M.Ya., Tsapko Yu.V., Tropinov O.H., *Studies to determine the fire extinguishing effectiveness of mixtures of retardants and inert diluents*, "Naukoviy Visnik UkrNDIPB" 2003, 2(8), 5-10.
- [23] Yongfeng Z., Xiang J., Guangxuan L., Ni X., *Experimental study of the fire-extinguishing effectiveness of 1-bromo-3,3,3-trifluoropropene/nitrogen mixtures*, "Journal of fire sciences" 2007, 25, 177-187, doi: 10.1177/0734904107067914.
- [24] 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, doi:10.3801/IAFSS.FSS.5-901.
- [25] Nikon 1J4, <http://imaging.nikon.com/lineup/acil/bodies/j4/spec.htm> Nikon 1 J4, [accessed: 10.11.2016].
- [26] Smith F.A., Kimmel E.C., English J.H., Carpenter R.L., *The assessment of toxicity after exposure to a pyrotechnically-generated aerosole*, HOTWC, 95.
- [27] Kopylov N.P., Ilitchkine V.S., Potanine B.V., Novikov I.A., *Toxic hazard associated with fire extinguishing aerosols: the current state of the art and a method for assessment*, Halon Options Technical Working Conference, 24-26 April 2001.

* * *

Баланык 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.

