

УДК 614.841.413:662.766

DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.30.67.002>

EDN: <https://elibrary.ru/flqfox>

ОСНОВЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ АЦЕТИЛЕНА В ОБОРУДОВАНИИ

Леонид Петрович Вогман, Александр Валерьевич Ильичев, Дмитрий Вадимович Долгих, Наталья Борисовна Аверкина

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Аннотация. Рассмотрены основы обеспечения пожаровзрывобезопасности при обращении ацетилена. Безопасная работа с ацетиленом в оборудовании может быть обеспечена локализацией очага горения следующими способами: флегматизацией среды; установкой защитных устройств, основными из которых являются огнепреградители (их действие основано на явлении гашения пламени в узких каналах); выбором условий транспортировки горючего газа. Для предотвращения взрыва при аварийном истечении ацетилена и тушения факела в закрытых объемах минимальная концентрация диоксида углерода составляет 57 % (об.), азота 70 % (об.). С помощью критерия Пекле могут быть оценены и установлены значения критического пламягасящего диаметра для исследуемой горючей смеси. По условиям безопасности транспортирование ацетилена должно осуществляться при низких начальных давлениях в трубопроводах малого диаметра и с низким гидравлическим сопротивлением насадки огнепреградителя.

Ключевые слова: ацетилен, защитное устройство, флегматизация, транспортирование, пожарная безопасность

Для цитирования: Основы предотвращения горения и детонации ацетилена в оборудовании / Л.П. Вогман, А.В. Ильичев, Д.В. Долгих, Н.Б. Аверкина // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 4 (22). С. 15–23. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2024.30.67.002. EDN FLQFOX.

FUNDAMENTALS FOR PREVENTING ACETYLENE COMBUSTION AND DETONATION IN EQUIPMENT

Leonid P. Vogman, Alexander V. Ilyichev, Dmitry V. Dolgikh, Natalia B. Averkina

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Abstract. The scientific and technical bases for ensuring fire and explosion safety in the handling of acetylene are considered. Safe operation with acetylene in the equipment can be ensured by localization of the combustion source by the following methods: phlegmatization of the medium; installation of protective devices, the main of which are fire barriers (their action is based on the phenomenon of flame extinguishing in narrow channels); choice of conditions for combustible gas transportation. To prevent explosion in case of emergency acetylene expiration and to extinguish the flame in closed volumes, the minimum concentration of carbon dioxide is 57% (vol.), nitrogen 70% (vol.). With the help of the Pecle criterion, the values of the critical flame

extinguishing diameter for the investigated combustible mixture can be estimated and established. According to safety conditions, acetylene transportation should be carried out at low initial pressures, in pipelines of small diameter and with low hydraulic resistance of fire barrier nozzle.

Keywords: acetylene, protective device, phlegmatization, transportation, fire safety

For citation: Vogman L.P., Ilyichev A.V., Dolgikh D.V., Averkina N.B. Fundamentals for preventing acetylene combustion and detonation in equipment. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2024, no. 4, pp. 15-23. (In Russ.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2024.30.67.002. EDN FLQFOX.

Введение

Ацетилен характеризуется как вещество с уникальными свойствами, такими как широкий диапазон распространения пламени в воздухе, вплоть до полного отсутствия окислителя в горючей смеси, что обусловлено его термическим разложением; низкое значение огнегасящего диаметра; высокие значения теплоты сгорания, скорости дефлаграционного горения и детонации. Меры по обеспечению безопасной работы с ацетиленом в оборудовании включают в себя, прежде всего, установку в оборудовании защитных устройств, основными из которых являются огнепреградители, флегматизацию среды и др. Вместе с тем недостаточно проанализированными остаются вопросы, касающиеся детализации эффекта огнепреграждения в оборудовании, применения флегматизации ацетилена при его разложении и в окислительной среде, влияния подвижности горючей среды на пожаровзрывоопасность в оборудовании.

В статье эти вопросы рассматриваются достаточно полно. Работа направлена на изучение научно-технических основ в обеспечении пожаровзрывобезопасности при обращении ацетилена.

Флегматизация ацетилен-воздушных смесей

Предотвращение пожара методом флегматизации основано на разбавлении взрывоопасной среды до состояния, при котором эта среда не способна распространять пламя. Это состояние достигается при содержании разбавителя, соответствующего «пику» на кривой зависимости, построенной на графике в координатах «концентрация горючего компонента в смеси с воздухом, % (об.)» (ось ординат) и «концентрация флегматизатора, % (об.)» (ось абсцисс). Область составов, ограниченная кривой флегматизации и осью ординат, является горючей, а область вне кривой флегматизации – негорючей. «Пиковые» концентрации флегматизатора определяются экспериментально на установках для измерения концентрационных пределов распространения пламени или расчетом [1]. Согласно документам [1–4], газы и пары жидкостей могут быть расположены в ряд по убыванию флегматизирующей (ингибирующей) эффективности по отношению к ацетилену: C_4H_{10} , C_3H_8 , CO_2 , N_2 , C_2H_4 , He, H_2 . Некоторые из них, например, хлор-, бромсодержащие углеводороды, а также ацетон, повышают давление распада ацетилена. В то же время четыреххлористый углерод и хлороформ являются промоторами реакции разложения ацетилена и снижают давление распада ацетилена, то есть повышают его пожаровзрывоопасность. Аргон и гелий, имеющие одинаковую теплоемкость, оказывают одинаковое флегматизирующее воздействие на ацетилен, хотя их коэффициенты теплопроводности отличаются в 8 раз. А водород и азот, имея близкие по значению теплоемкости, наоборот, существенно различаются по флегматизирующей способности горения ацетилена. Следовательно, теплопроводность инертных и горючих разбавителей не оказывает влияния на снижение горючести ацетилена [2–4].

Следует отметить, что если какое-либо вещество при разбавлении горючей смеси проявляет флегматизирующее действие, то и другие параметры, характеризующие пожаровзрывоопасность этой смеси, имеют тенденцию к снижению горючести: скорость распространения пламени, температура горения и теплота сгорания снижаются, а энергия зажигания, размер пламягосящих каналов и давление, при котором реализуется воспламенение, растут. Например, экспериментально показано, что при разбавлении ацетилен-воздушных смесей азотом снижается нормальная скорость распространения пламени при увеличении концентрации азота с 40 до 60 % (об.). При увеличении в таких смесях содержания азота снижается и максимальное давление взрыва, а предельное давление, при котором происходит распространение пламени, растет [3].

Для предупреждения взрыва при аварийном истечении ацетилена и тушении факела в закрытых объемах минимальная концентрация диоксида углерода должна составлять 57 % (об.), азота 70 % (об.) [5].

Защитные устройства (огнепреградители). Основы локализации очага горения путем гашения пламени в узких каналах

Процессы горения, как правило, редко проявляются как адиабатические, т. е. без потери тепла. Отвод тепла в исходную горючую смесь нельзя назвать теплотерями, однако существуют по меньшей мере два основных фактора, способствующих неадиабатичности процесса: отвод тепла в стенки сосуда, в котором происходит горение, и теплоотдача в бесконечное пространство путем излучения. Очевидно, что интенсивность горения не зависит от аппаратурных условий и определяется специфическими свойствами самого процесса горения. В то же время теплоотдача в стенки существенно зависит от размеров, материала стенки сосуда, заключающего горючую среду, но главное – от скорости распространения пламени и, следовательно, от времени теплоотдачи [2].

Относительная роль теплотерь в результате теплопроводности к стенкам и излучения возрастает с уменьшением скорости горения (к медленно горящим смесям относятся ацетилен-воздушные смеси и собственно ацетилен при термическом разложении при дефлаграционном режиме горения), так как при этом продолжительность процесса теплоотдачи возрастает. Напротив, для быстрых пламен (водород, сероуглерод, ацетилен при взрывном распаде) тепловые потери излучением незначительны, поскольку они лишь незначительно снижают температуру пламени. При определенном критическом значении тепловых потерь тепловой режим нарушается, и горение перестает быть стационарным. Скорость неадиабатического пламени уменьшается при охлаждении зоны реакции. Однако эта зона отдает в окружающее пространство сравнительно небольшое количество тепла. Более интенсивны теплотери, которые связаны с охлаждением слоев газа, прилегающих к зоне реакции. В то время как температура остывающих продуктов реакции оказывается меньше температуры зоны реакции, возникает температурный градиент, направленный в сторону сгоревшего газа. В результате зона реакции охлаждается путем теплопроводности от зоны реакции к зоне, примыкающей к стенке. В тепловых потерях также участвует нагретая, но не сгоревшая смесь, передающая тепло зоны реакции в окружающее пространство. Зона реакции прогрессивно охлаждается, происходит торможение реакции, и пламя затухает. Этот режим соответствует пределу распространения пламени.

Прекращение распространения пламени в результате тепловых потерь из зоны реакции – основной фактор обеспечения безопасности для горючих газовых смесей. Тепловые потери делают невозможным распространение пламени за определенными границами состава горючей смеси и аппаратурных условий.

При горении в узком канале механизм потерь тепла заключается в кондуктивной теплопроводности к стенкам канала. В этом случае охлаждается зона реакции взрывоопасных (горючий газ – окислитель) и взрывчатых (например, чистый ацетилен) газовых систем. В узких каналах возможны теплотери, приводящие к гашению наиболее быстрогорящих взрывчатых газовых систем. С увеличением диаметра канала уменьшается интенсивность тепловых потерь путем теплопроводности. В широких трубах тепловые потери в стенки невелики и в пределе (в трубах выше критического диаметра) совпадают с режимом сферического пламени, для которого потери путем теплопроводности становятся незаметными. Распространение пламени в аппаратуре становится невозможным только в том случае, когда тепловые потери излучением достигают определенного значения. По мере удаления состава смеси от стехиометрического или увеличения в ней содержания инертного компонента температура горения, а с ней и нормальная скорость пламени (u_n) понижаются настолько, что потери излучением приводят к заметной неадиабатичности процесса. При дальнейшем понижении концентрации недостающего компонента (горючего или окислителя) достигается критическое значение u_n , и горение становится невозможным. В связи с этим легко представить, что потери тепла излучением в бесконечном пространстве являются определяющими. Важная особенность гашения пламени в узких каналах заключается в том, что, хотя процесс имеет тепловую природу и обусловлен теплоотдачей от газа к твердой стенке, пределы гашения не зависят от свойств стенки, в том числе и от теплопроводности пламегасящих каналов. Она обусловлена, главным образом, большой разностью плотностей сгорающего газа и материала пламегасящей стенки, поскольку существенная часть процесса теплоотдачи реализуется в газовой, а не в твердой фазе, хотя тепло и отводится в последнюю. В результате сгорающий в огнепреградителе газ охлаждается, практически не нагревая стенки канала. Лишь длительное истечение сгоревшего газа (характерное для медленно горящих смесей) через канал может приводить к значительному нагреванию стенок. Таким образом, выбор материала огнепреградителей не связан с особенностями самого процесса гашения пламени. Материал выбирают, исходя из экономических соображений и возможности получения каналов нужных размеров, газопроницаемости и механической прочности.

В нижеуказанной таблице представлены результаты экспериментальных исследований пределов гашения пламени в огнепреградителях различных типов (шары, гравий, зерна тугоплавкого материала неправильной формы, а также кольца Рашига) при варьировании измеряемых параметров, в том числе в кислородной среде (α – коэффициент теплоотдачи; u_n – нормальная скорость распространения пламени при $P = 101$ кПа; $d_{кр}$ – диаметр пламегасящего канала; $P_{кр}$ – давление, при котором осуществлялись измерения; $Pe_{кр}$ – критерий Пекле). В данных экспериментах фиксировалось максимальное значение одного из трех параметров: u_n , $d_{кр}$ и $P_{кр}$ [2].

Пределы гашения ацетилен-кислородных и ацетилен-воздушных смесей

Горючая смесь	α	u_n (при $P = 101$ кПа), см/с	$d_{кр}$, мм	$P_{кр}$ 102, кПа	$Pe_{кр}$
33,4 % C_2H_2 + 66,6 % O_2	0,8	1540	0,041	2	72
10 % C_2H_2 + воздух	0,76	156	0,59	1,5	73
5 % C_2H_2 + воздух	1,6	72	0,3	6	67
7,75 % C_2H_2 + воздух	1	133	0,3	3,5	72
4 % C_2H_2 + воздух	2,02	35	5,04	1,0	88

Из данных таблицы видно, что величина $Pe_{кр}$ сохраняет удовлетворительное постоянство в широком диапазоне критических параметров, не обнаруживая какой-либо тенденции к систематическим отклонениям от среднего значения. С учетом разнообразия смесей с воздухом и кислородом других горючих газов различного состава (H_2 , CH_4), не указанных в таблице, величина $Pe_{кр}$ может быть консервативно принята равной 65 – это универсальное значение.

Из анализа теоретических основ горения газовых смесей в узких каналах вытекает задача практического использования этих знаний и описанных закономерностей для разработки рационального устройства огнепреградителей, в частности, для ацетилен-воздушных пламен и собственно чистого ацетилена в оборудовании.

Локализация пламен ацетилена в узких каналах

Работа огнепреградителей любого вида заключается в создании таких условий в системе, при которых пламя и детонационная волна не могут распространяться по огнепреградителю, и возможность для вторичного воспламенения за огнепреградителем исключена. Наиболее известный и простой способ выполнения условия, при котором пламя и детонация не могут распространяться по огнепреградителю, основан на явлении гашения пламени в узких каналах. По этому принципу работают и насадочные огнепреградители: сосуд заполняется насадкой с большим количеством проходных отверстий малого диаметра ниже критического размера для данной горючей смеси. Согласно теории горения Я.Б. Зельдовича [6], для определения условий гашения пламени в канале, диаметр которого равен постоянной величине, можно воспользоваться критерием Pe :

$$Pe = u_n d_{кр} C_p P / R \lambda T_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где u_n – нормальная скорость распространения пламени; $d_{кр}$ – критический диаметр канала, ниже которого распространение пламени и (или) детонационной волны невозможно; C_p – теплоемкость; P – давление горючей смеси; λ – коэффициент теплопроводности смеси; T_0 – температура среды. Как отмечалось выше, значение критерия Pe находится в диапазоне 55–71 [2]. Поэтому с помощью этого критерия можно оценивать значение критического пламегасящего диаметра для исследуемой горючей смеси [1, 2, 6]. Для взрывного распада чистого ацетилена в диапазоне давления от $3 \cdot 10^1$ до $36 \cdot 10^1$ КПа, флегматизированного азотом, в трубках, насадках из гранул и металлокерамических пластин происходит гашение при $Pe_{кр} = 75–95$, а при давлении до $5 \cdot 10^2$ кПа в трубах среднее значение $Pe_{кр} = 51$. Во всех случаях значение $Pe_{кр}$ не более чем в два раза отличается от универсального значения, равного 65.

Например, выполним расчет $d_{кр}$ ацетилен-воздушной смеси стехиометрического состава (~ 10 %) [9] из условия $Pe = 65$ при нормальном давлении ($P = 10^5$ Па) и комнатной температуре (~ 300 К).

Данные для расчета:

нормальная скорость распространения пламени u_n : 1,57 м/с или 157 см/с [2] или таблица [2];

теплоемкость C_p при 298,1 К 10,59 Ккал/моль · град [3];

давление $P = 10^5$ Па;

$R = 8,314$ Дж/К · моль (газовая постоянная);

λ – теплопроводность при 20 °С (при концентрации ацетилена 0,9 (мольные доли) 5,3 кал/с · см [3]

$d_{кр} = 65 \cdot 8,314 \cdot 300 \cdot 5,3 / 157 \cdot 8,314 \cdot 300 \cdot 10^5 = 0,51$ см (0,05 мм). Для принятых условий расчетное значение $d_{кр}$ может быть приемлемым.

Поскольку пределы распространения пламени (по концентрации и давлению) уже, чем пределы распространения ударной волны при детонации, то при достижении режима гашения пламени в каналах детонация невозможна. Предотвращение воспламенения смеси за огнепреградителем объясняется тем, что глубина проникновения пламени смеси и продуктов горения в насадке мала (диаметр насадки всегда должен быть меньше величины критического диаметра). В случае распространения в системе ударной волны, она, разрушаясь в насадке, вырождается в пламя, которое гаснет на некотором расстоянии, а ударная волна отрывается от зоны реакции, уходит вперед и постепенно затухает. Продукты реакции в детонационной волне движутся в ту же сторону, что и волна. Давление в прямой и отраженной волне высокое и превышает начальное в 20–50 раз. Это способствует прохождению волны через насадку. Разрушение детонационной волны обусловлено тем, что ингибиторы (например, хлор, бром, фторсодержащие углеводороды) уменьшают разность удельных скоростей разветвления и обрыва цепей и, соответственно, скорость цепного процесса [7]. Предотвращения распространения ударной волны и воспламенения смеси за насадкой добиваются выбором такой ее длины (расчетом или экспериментально), за которой уже не последует распространения пламени. Например, для огнепреградителей с гранулированными насадками поперечный размер корпуса должен превышать размер одной гранулы не менее чем в 20 раз, а высота слоя насадки должна превышать диаметр ее канала не менее чем в 100 раз.

В работе [8] определены критические размеры диаметров и предельные уровни давления для ацетилена и его смесей с азотом для различных типов насадков (трубки, шары, сетки, гранулы из корунда, металлокерамика). В качестве огнепреградителя при горении ацетилена рекомендуются орошаемые водой насадки из колец Рашига $35 \cdot 35$ мм и $50 \cdot 50$ мм при высоте слоя насадков 1,5 и 2,0 м соответственно, при давлении до 25 МПа. Скорость движения ацетилена через огнепреградитель не должна превышать 10 м/с.

Воспламенение и (или) развитие детонации в оборудовании с горючей смесью, заполненного элементами огнепреграждения, сопровождается повышением давления.

Размеры пламягасящих каналов огнепреградителя (δ), рассчитанных для начального давления P_0 , т. е. без повышения давления, выбираются из условия $\delta < d_{кр}$, где $d_{кр}$ – это критический диаметр гашения пламени при давлении P_0 . Поскольку $d_{кр} \sim 1/P_0$, то огнепреградитель при повышении давления должен надежно работать при любом давлении ($P > P_0$).

Вместе с тем горение в закрытых объемах (коммуникациях, аппаратах, баллонах) с ацетиленом может сопровождаться повышением давления по отношению к начальному в 10–12 раз. В реальных условиях, когда размеры оборудования значительны и его длина (l) существенно больше диаметра (d), часть тепла за время горения рассеивается через стенки оборудования, и поэтому давление, величина которого зависит от скорости распространения пламени и размеров оборудования, растет в меньшей степени. При $l/d < 300$ и скорости пламени в несколько десятков или сотен метров в секунду максимальное давление в оборудовании может достигать 3–7 P_0 . В силу высокой теплоемкости продуктов распада ацетилена, даже в течение нескольких секунд после горения, давление остается на уровне 1,5–3,0 P_0 . Таким образом, когда горение не перешло в детонацию или оно не возникло у входа в огнепреградитель, в оборудовании наблюдается повышение давления. Иначе говоря, огнепреградитель оказывается в условиях, на работу в которых он не рассчитан. В этом случае

безопасность оборудования определяется только запасом по $d_{кр}$ огнепреградителя и величиной повышения давления P . Если P таково, что размеры насадок огнепреградителя оказываются выше $d_{кр}$, то пламя свободно проходит через огнепреградитель. Однако здесь возникает еще одна проблема. Можно подобрать огнепреградители с насадками, имеющими размеры пламягасящих каналов менее критических, при P для давлений в 1,5–12 раз больше P_0 . Но при этом увеличивается гидродинамическое сопротивление. Например, при $P = 1,4$ МПа $d_{кр}$ составляет 65 мм, при $P_0 = 2$ МПа $d_{кр} \sim 15$ мм, а при 14 МПа $d_{кр}$ менее 1 мм. В этом случае безопасность оборудования может быть обеспечена повышением его прочностных характеристик.

Транспортирование ацетилена

По трубопроводам ацетилен транспортируется, как правило, в чистом виде.

По условиям безопасности транспортирование ацетилена должно осуществляться при низких начальных давлениях, в трубопроводах малого диаметра и с низким гидравлическим сопротивлением насадки огнепреградителя. Однако выполнение данных условий маловероятно по техническим и экономическим соображениям. В связи с этим выбор трубопроводов и параметров транспортирования ацетилена должен быть основан на анализе всех аспектов обеспечения безопасности: технических, экономических и др.

Гашение пламени в потоке, как правило, происходит легче, чем в неподвижной среде. Наиболее важным параметром является начальное давление ацетилена P_0 . Из условий безопасности его следует выбирать минимальным. Однако распад ацетилена может происходить и при давлении, ниже атмосферного. Оптимальным принято считать давление в ацетиленопроводе от 1,3 до 1,35 МПа. Для указанного давления диаметр огнегасящих каналов, в зависимости от размещения трубопровода в пространстве (горизонтально, вертикально, под наклоном), составляет 50–95 мм. Следовательно, и гидравлическое сопротивление в трубопроводе будет незначительным. Например, трубопровод диаметром 400 мм и толщиной стенок 10 мм выдерживает давление воспламенения при распаде ацетилена и даже детонацию, при которой давление достигает 27 МПа. При этом следует обратить внимание на перегибы, повороты и тупики в трубопроводе, которые могут быть повреждены или деформированы при взрыве.

Скорость движения ацетилена не должна быть более 10–15 м/с, так как возможно возникновение, накопление и разряд статического электричества, а также увеличение скорости движения пламени при воспламенении ацетилена и вынос потока продуктов распада из насадки.

Энергия зажигания ацетилена, движущегося в трубопроводе при повышении давления, снижается (при скорости потока 10 м/с и давлении 1,2 МПа она составляет 280 Дж, а при давлении 1,33 МПа – 125 Дж), поскольку для пламени распада ацетилена величина нормальной скорости возрастает (при давлении $1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3$ кПа величина минимальной энергии зажигания становится сопоставимой с этой величиной для углеводород-воздушных смесей), однако абсолютные значения минимальной энергии зажигания в условиях низких и высоких давлений остаются большими. В связи с этим требования по ограничению скорости потока ацетилена являются излишними. Что касается проявлений статического электричества, то по оценочным данным энергия зажигания от статического электричества ацетилена еще выше [2], чем энергия воспламенения при этих давлениях. Скорость потока ацетилена в трубопроводе следует устанавливать исключительно из характеристики гидравлического сопротивления

в огнепреградителе и механической прочности оборудования. Однако следует помнить, что ввиду возможности большого роста давления, даже в отсутствие детонации, механическая прочность не может гарантировать его сохранность. Таким образом, безопасность ацетиленопроводов следует обеспечивать, прежде всего, исключением источников зажигания.

Заключение

В целях локализации очага горения для обеспечения безопасной работы с ацетиленом в оборудовании можно применить один из следующих способов: флегматизация среды; использование защитных устройств, например, огнепреградителей, действие которых основано на явлении гашения пламени в узких каналах; определение условий транспортировки горючего газа.

По убыванию флегматизирующей эффективности по отношению к ацетилену газы и пары жидкостей могут быть расположены в ряд: C_4H_{10} , C_3H_8 , CO_2 , N_2 , C_2H_4 , He, Ar, H_2 . Для предотвращения взрыва при аварийном истечении ацетилена и тушения факела в закрытых объемах минимальная концентрация диоксида углерода составляет 57 % (об.), азота 70 % (об.).

С учетом проведенного анализа особенностей пожаровзрывоопасных свойств ацетилена и условий обеспечения безопасной работы защитных устройств можно сформулировать основные требования к таким устройствам, как огнепреградители:

- а) обеспечение защиты при распаде ацетилена в различных режимах: дефлаграции, при нестационарном быстром горении и детонации;
- б) наличие минимального гидравлического сопротивления;
- в) соответствие конструкции оптимальным размерам и массе, что обеспечивает их простоту и надежность в работе по прямому и обратному направлению.

Оценивать значение критического пламягасящего диаметра для исследуемой горючей смеси можно с помощью критерия Пекле.

При большей скорости движения ацетилена возможно возникновение, накопление и разряд статического электричества, а также увеличение скорости движения пламени при воспламенении ацетилена в насадке и вынос потока продуктов распада из насадки. Скорость движения ацетилена в трубопроводе должна быть более 10–15 м/с.

Энергия зажигания движущегося в трубопроводе потока ацетилена при повышении давления повышается. В части вопроса проявлений статического электричества по оценочным данным энергия зажигания ацетилена по этой причине на два порядка выше, чем энергия воспламенения от источника зажигания. Таким образом, скорость потока ацетилена в трубопроводе следует устанавливать исключительно из характеристики гидравлического сопротивления в огнепреградителе и прочности оборудования.

Список литературы

1. Баратов А.Н. Горение – пожар – взрыв – безопасность. Москва: ВНИИПО МЧС России, 2003. 363 с.
2. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. Москва: Химия, 1972. 365 с.
3. Иванов Б.А. Физика взрыва ацетилена. Москва: Химия, 1969. 180 с.
4. Миллер А.С. Ацетилен, его свойства, получение и применение. Ленинград: Химия, 1969. Т. 1. 680 с.

5. *Корольченко А.Я., Корольченко Д.А.* Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник в 2 ч. Москва: Ассоциация «Пожнаука», 2004. 774 с.

6. *Зельдович Я.Б.* Теория предела распространения тихого пламени // Журнал экспериментальной теплофизики. 1941. № 11. С. 159.

7. *Азатян В.В.* Цепные реакции горения, взрыва и детонации. Химические методы управления. Москва: Объединенный институт высоких температур РАН. Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 2020. 360 с.

8. *Заказнов В.Ф., Стрижевский И.И.* Огнепреградитель для ацетилена высокого давления // Химическая промышленность. 1965. № 4. С. 285.

**Статья поступила в редакцию 30.08.2024;
одобрена после рецензирования 30.09.2024;
принята к публикации 25.10.2024.**

Вогман Леонид Петрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник; **Ильичев Александр Валерьевич** – начальник отдела; **Долгих Дмитрий Вадимович** – начальник сектора; **Аверкина Наталья Борисовна** – старший научный сотрудник. E-mail: 3.5.2@vniipo.ru.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия

Leonid P. Vogman – Doctor of Technical Sciences, Main Researcher; **Alexandr V. Ilyichev** – Head of Department; **Dmitry V. Dolgikh** – Head of Sector; **Natalia B. Averkina** – Senior Researcher. E-mail: 3.5.2@vniipo.ru

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.