
БЕЗОПАСНОСТЬ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ И ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

ОГНЕЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС

А.В. Федоров, доктор технических наук.

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики.

А.А. Кузьмин, кандидат педагогических наук, доцент;

Н.Н. Романов, кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проанализированы особенности использования водяных завес для защиты от теплового излучения пожара объектов нефтегазового комплекса. Описывается структура интегрированной диалоговой системы, включающей в себя электронную таблицу Microsoft Office Excel и семейство макросов на Visual Basic for Applications, которая позволяет на основе разветвленного алгоритма расчета теплового режима открытого пожара на объекте нефтегазового комплекса вычислить толщину водяной завесы и необходимый расход воды.

Ключевые слова: нефтегазовый комплекс, пожар, тепловое излучение, водяная завеса, водяная пленка, отражающий экран, поглощающий экран

FIRE PROTECTION OF OBJECTS OF OIL AND GAS COMPLEX ON THE BASIS OF USING WATER

A.V. Fedorov.

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics.

A.A. Kuzmin; N.N. Romanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article analyzes the features of using water curtains to protect from the thermal radiation from the fire of oil and gas complex objects. The structure of an integrated dialog system is described that includes a Microsoft Office Excel spreadsheet and a macro family for Visual Basic for Applications that allows you to calculate the thickness of the water curtain and the required water flow based on a branched algorithm for calculating the thermal mode of an open fire at an oil and gas facility.

Keywords: oil and gas complex, fire, thermal radiation, water curtain, water film, reflective screen, absorbing screen

В состав нефтегазового комплекса Российской Федерации входят предприятия, которые характеризуются присутствием пожаровзрывоопасных продуктов и сырья, что создает реальную опасность возникновения крупных техногенных аварий и катастроф, сопровождающихся пожарами и взрывами. Статистика и структура таких аварий приведена в работе [1]. Поэтому повышение пожаровзрывобезопасности нефтедобывающих предприятий, нефтеперерабатывающих заводов и предприятий по транспортировке и сбыту

нефти и нефтепродуктов, а также локализация последствий пожаров на таких объектах является важнейшей составной частью обеспечения защищенности населения от угроз техногенного и экологического характера.

Крупные пожары на объектах нефтегазового комплекса характеризуются турбулизацией газовой среды в зоне пожара, сопровождающейся задымлением и загазованностью продуктами горения, а так же интенсивным конвективным теплопереносом. Однако большая часть тепла (до 90 %) на таких пожарах передается за счет интенсивного теплового излучения, что обусловлено зависимостью плотности теплового излучения от четвертой степени абсолютной температуры поверхности факела, которая для нефтепродуктов может превышать 1 200 °С [2].

Поток теплового излучения пожара, падающего на защищаемый объект можно вычислить при помощи уравнения:

$$Q = C_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{об}}{100} \right)^4 \right] H, \quad (1)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_{ϕ} – абсолютная температура поверхности факела, К; $T_{об}$ – абсолютная температура на поверхности объекта, К; ε_{np} – приведенная степень черноты определяемая уравнением:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\phi}} - 1 \right) \varphi_{1,2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{об}} - 1 \right) \varphi_{2,1}},$$

где ε_{ϕ} , $\varepsilon_{об}$ – степень черноты поверхности факела и объекта соответственно; $H = \varphi_{1,2} F_{\phi} = \varphi_{2,1} F_{об}$ – площадь взаимного облучения; F_{ϕ} , $F_{об}$ – площадь поверхности факела и объекта соответственно, м²; $\varphi_{1,2}$, $\varphi_{2,1}$ – углы взаимного облучения факела на объект и поверхности объекта на поверхности факела.

При оценке интенсивности теплового излучения при пожарах на объектах нефтегазового комплекса необходимо учитывать влияние химического состава образующихся продуктов горения на их излучательную и пропускательную способности.

Значительной излучательной и поглощательной способностью, имеющей практическое значение, обладают многоатомные газы: углекислота CO₂ и водяной пар H₂O, так как именно они образуются при горении нефтепродуктов и по сравнению с твердыми телами излучение и поглощение газов имеет ряд особенностей:

- в твердых телах испускание и поглощение лучистой энергии происходит в поверхностном слое, а в газах – в объеме;

- поглощательная способность газа зависит от температуры и парциального давления.

Законы излучения и поглощения газами имеют ряд существенных отличий от законов излучения и поглощения твердыми телами и жидкостями. Причина заключается в том, что газы излучают и поглощают энергию свободными или почти свободными атомами и молекулами. Особенность, которую надо учитывать в теплофизических расчетах, заключается в том, что спектры излучения и поглощения газов имеют селективный (избирательный) характер, то есть газы излучают и поглощают энергию лишь в определенных интервалах длин волн:

- углекислый газ имеет три основные полосы: 2,36÷3,02 мкм, 4,01÷4,8 мкм и 12,5÷16,5 мкм;

- водяной пар имеет полосы поглощения: 2,24÷3,27 мкм, 4,8÷8,5 мкм и 12÷25 мкм [3].

Вторая особенность заключается в том, что в отличие от твердых тел излучение и поглощение энергии в газах происходит не в поверхностном слое их оболочек, а во всем

объеме. При этом по мере прохождения излучения от внутренних областей к внешним областям часть энергии поглощается, из-за чего плотность мощности теплового излучения газа, строго говоря, оказывается пропорциональной не четвертой (в соответствии с законом Стефана-Больцмана), а более низкой степени абсолютной температуры. Например, для углекислого газа эта степень $\approx 3,5$; для водяного пара ≈ 3 . Однако для практических расчетов часто по-прежнему используют формулу вида (1), вводя в нее эмпирические поправочные коэффициенты.

Эти особенности серьезно затрудняют расчеты теплообмена с участием продуктов горения нефтепродуктов и делают их весьма приближенными. Для повышения точности целесообразно применять эмпирические формулы, справедливые при определенных условиях, и соответствующие графики, приводимые в специальной литературе [4].

Для случая теплового излучения пламени при горении разлившегося жидкого углеводородного топлива коэффициент пропускания атмосферы φ в НПБ 105-03 [5] рекомендуется определять по формуле:

$$\varphi = e^{-0,0007(r-0,5d)}$$

где r – расстояние между факелом и теплопоглощающей поверхностью объекта, м;
 d – диаметр пролива нефтепродукта, м.

Поскольку на объектах нефтегазового комплекса линейные размеры технологических установок, насосных станций, резервуарных парков, железнодорожных и автомобильных эстакад соизмеримы с линейными размерами факела, факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок могут различаться по величине, что увеличивает трудоемкость подобных расчетов. Зависимость плотности теплового потока от расстояния между факелом и объектом представлена на рис. 1 [6].

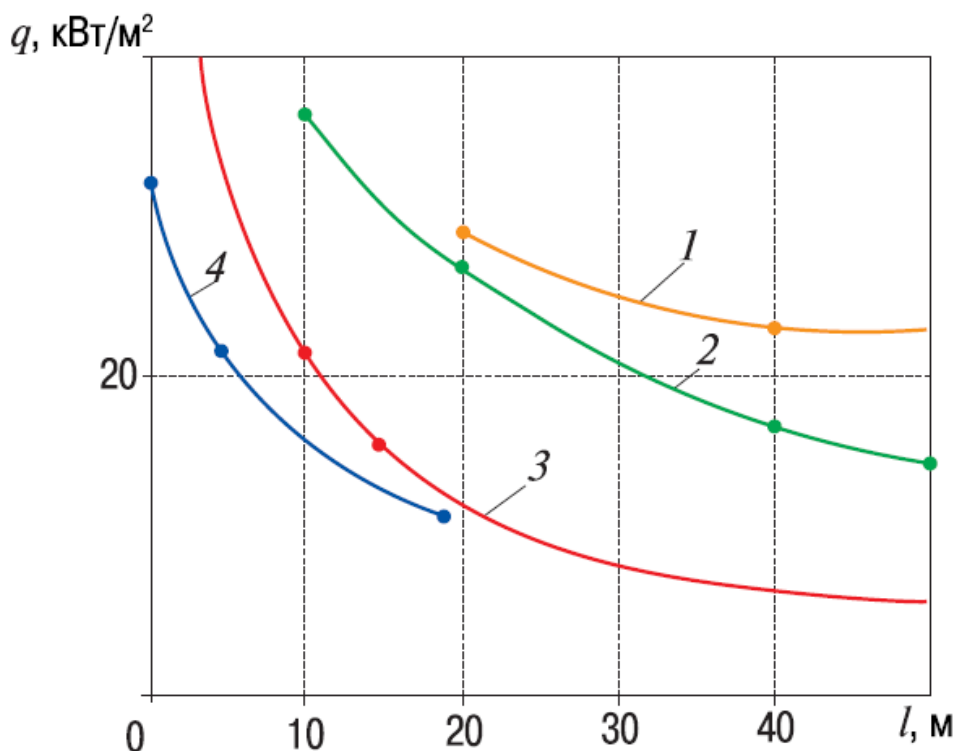


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от расстояния между факелом и объектом:
 1 – распыленный нефтяной фонтан с дебитом $2 \cdot 10^6$ м³/сутки; 2 – штабель пиломатериалов высотой 12 м; 3 – факел сжиженного углеводородного газа (СУГ) с расходом 10 кг/с; 4 – штабель пиломатериалов высотой 6 м

Как следует из графика, даже на значительном расстоянии (20 м) плотность теплового потока теплового излучения пожара ($10\div 30$ кВт/м²) превышает допустимую (8,9 кВт/м²) для СУГ и других нефтепродуктов. Одним из технических решений, обеспечивающих пожарную безопасность объекта, может быть применение теплоотражательных экранов, при этом приведенная степень черноты системы «излучающая поверхность факела – теплоотражательный экран – теплопоглощающая поверхность объекта» может быть вычислена при помощи уравнения:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\phi}} + \frac{1}{\varepsilon_{об}} + \sum_{i=1}^n \frac{2}{\varepsilon_{\varepsilon_i}} - (n+1)},$$

где $\varepsilon_{\varepsilon_i}$ – степень черноты i -го экрана; n – число экранов.

Отражательные экраны из металлических листов для теплового излучения с длиной волны 4 мкм и более имеют коэффициент отражения более 0,8. Если применять полированный алюминий, можно добиться коэффициента отражения 0,85 для длины волны $0,8\div 0,9$ мкм, однако поддерживать такое состояние поверхности экрана достаточно затруднительно при практическом функционировании наружных установок объектов нефтегазового комплекса.

Опыт эксплуатации пожарной техники показывает, что вертикальные наружные поверхности при тепловых потоках плотностью $7\div 25$ кВт/м² могут прогреваться до $200\div 400$ °С, а внутренние поверхности – до значений $80\div 220$ °С [7]. Таких величин температуры достигают уже в течение $2\div 3$ мин, поэтому поверхности металлических экранов могут являться источниками вторичного теплового излучения, что уменьшает эффективность их применения.

Применение металлических сеток для защиты от тепловых потоков и излучения пожаров на объектах нефтегазового комплекса не может считаться эффективным, так как они не могут использоваться в качестве отражательных экранов (малая отражательная способность в следствии незначительной эффективной площади) и теплопоглощающих экранов: теплоемкость металлической сетки невелика, однако металл сеток быстро прогревается и уже сам становится источником теплового излучения [8].

Водяная завеса может также служить теплопоглощающим экраном, при этом толщина завесы в 1 мм позволяет поглощать тепловое излучение с длиной волны более 3 мкм, а увеличение толщины водяной завесы до 10 мм уменьшает длину волны теплового излучения до 1,5 мкм. Эффективность применения водяных завес можно увеличить, используя 1 % раствор медного купороса CuSO_4 , при этом длина волны теплового излучения, которая поглощается водяной завесой толщиной 10 мм, уменьшается до 0,8 мкм.

Водяные завесы, которые могут генерировать веерные распылители, способствуют рассеиванию облака газозадушной смеси вследствие пролива и интенсивного испарения СУГ с объемным расходом притока газозадушной смеси на завесу до $2\div 4$ м³/с [6].

Толщину водяной завесы можно определить при помощи эмпирического уравнения:

$$\delta = 0,357 \ln \left(\frac{q_{12}}{q_{дон}} \right) [\text{м}],$$

где q_{12} – плотность падающего теплового излучения; $q_{дон}$ – допустимая плотность теплового излучения, падающего на защищаемый объект.

При этом расход воды, для создания 1 м² водяной завесы можно определить по формуле:

$$G = \frac{2}{3} \rho g \ln \left(\frac{q_{12}}{q_{дон}} \right) \text{ [л/с]},$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Расход воды, необходимой для создания водяной завесы для защиты объектов нефтегазового комплекса от теплового излучения пожара, можно уменьшить, если использовать такую завесу в комбинации с металлической сеткой [9].

Принципиальная схема такой конструкции представляет собой две металлические сетки, между которыми предусмотрен определенный зазор, в котором и располагаются специальные форсунки для распыления воды с расходом 0,06÷0,1 л/м². В ходе подачи воды на металлических сетках образовывается водяная пленка, а в пространстве между сетками – многофазная водо-, паро- капельно-воздушная среда, которая непрерывно восстанавливает сплошную водяную пленку, разрушающуюся на поверхности металлических сеток под воздействием значительной тепловой нагрузки. При этом ослабление теплового излучения происходит за счет рассеивания инфракрасного излучения на водяных пленках, которые образуются на металлических сетках. Кроме того, тепловое излучение ослабляется в ходе взаимодействия электромагнитного излучения с мелкодисперсными водяными капельками в межсеточном пространстве, при этом вода, поступая на металлические поверхности, охлаждает их, аккумулируя тепловую энергию.

В результате экспериментальных исследований [10] было установлено, что тепловой поток плотностью в диапазоне 25÷65 кВт/м² и температуре факела 1 200 °С может быть ослаблен до 50 раз.

В качестве исходных параметров при оценке эффективности использования того или иного вида экранов выступают температура факела и плотность потока теплового излучения, для чего необходимо:

- разработать структуру и произвести программную реализацию алгоритма расчета теплового режима открытого пожара на объектах нефтегазового комплекса, который бы учитывал возможности как развития пожара при диффузионном режиме выгорания пожарной нагрузки, так и быстрого полного разрушения резервуара с последующим возникновением «огненного шара», оценкой продолжительности существования и характеристикой его теплового излучения;

- разработать алгоритм расчета толщины водяной завесы и расхода воды для ее формирования с позиций надежности полученных решений и доступности их использования практическими работниками.

На рис. 2 представлен алгоритм расчета параметров теплового излучения открытого пожара при разгерметизации резервуара с перегретой горючей жидкостью, а так же сжиженным природным газом или горючим газом под давлением.

На основании представленного алгоритма была создана интегрированная диалоговая система, включающая в себя электронную таблицу Microsoft Office Excel и семейство макросов на Visual Basic for Applications. Реализованная концепция использования интерфейса электронной таблицы EXCEL в процессе ввода параметров объекта расширяет возможности использования практическими работниками федеральной противопожарной службы предлагаемого программного продукта.

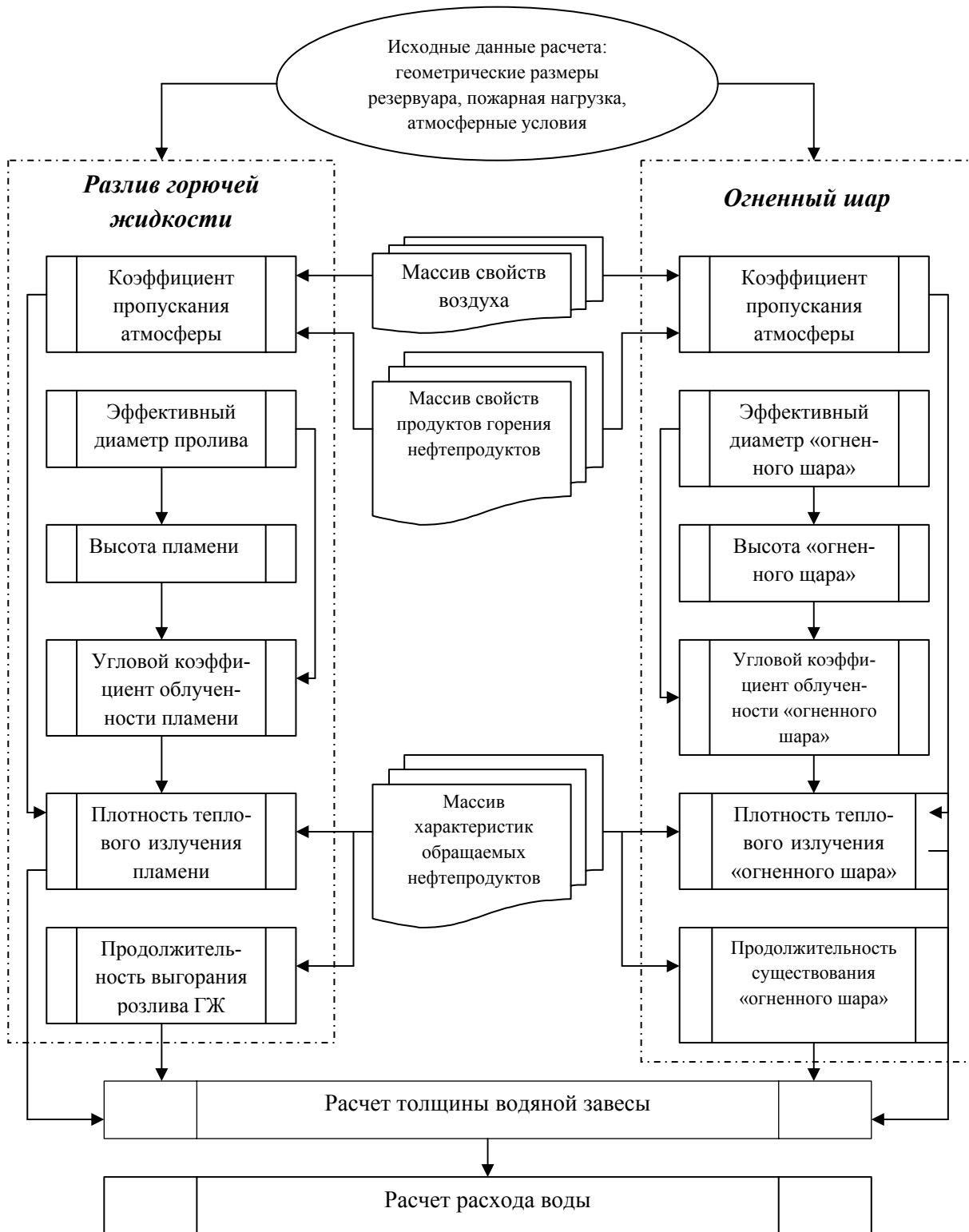


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров водяной завесы для защиты от теплового излучения пожара на объектах нефтегазового комплекса

Литература

1. Информация об авариях, произошедших на предприятиях, подконтрольных территориальным органам Федеральной службы по экологическому, технологическому, атомному надзору // Ростехнадзор. URL: <http://www.rostehnadzor.ru/chronicle.html> (дата обращения: 21.04.2017).
2. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова; пер. с англ. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
4. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 664 с.
5. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: Госстандарт России, 2003. 34 с.
6. Копылов Н.П., Хасанов И.Р. Эффективность применения теплозащитных экранов для защиты от тепловых потоков при пожарах // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 11. С. 40–42.
7. Пожарная техника: учеб. / под ред. М.Д. Безбородько. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2004. 550 с.
8. Крутолапов А.С., Чешко И.Д. Огнепреграждающие сеточные экраны для защиты технологического оборудования нефтегазопроводов // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России. 2014. № 1. С. 67–72.
9. Шимко В.Ю. Использование водопленочных теплозащитных экранов для защиты от теплового излучения при горении сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 12. С. 63–67.
10. Усманов М.Х. Влияние термического воздействия на ограждающие конструкции: новые методы экспертизы мест пожаров и теплозащиты. Ташкент: Высшая техническая школа пожарной безопасности МВД РУз, 2008. 291 с.

References

1. Informaciya ob avariayah, proizoshedshih na predpriyatiyah, podkontrol'nyh territorial'nyh organam Federal'noj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu, atomnomu nadzoru // Rostekhnadzor. URL: <http://www.rostehnadzor.ru/chronicle.html> (data obrashcheniya: 21.04.2017).
2. Drajzdel D. Vvedenie v dinamiku pozharov / pod red. Yu.A. Koshmarova, V.E. Makarova; per. s angl. M.: Strojizdat, 1990. 424 s.
3. Landsberg G.S. Optika. M.: Nauka, 1976. 926 s.
4. Boren K., Hafmen D. Pogloshchenie i rasseyaniye sveta malymi chasticami: per. s ang. M.: Mir, 1986. 664 s.
5. NPB 105-03. Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnyh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti. M.: Gosstandart Rossii, 2003. 34 s.
6. Kopylov N.P., Hasanov I.R. Ehffektivnost' primeneniya teplozashchitnyh ehkranov dlya zashchity ot teplovyh potokov pri pozharah // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2016. № 11. S. 40–42.
7. Pozharnaya tekhnika: ucheb. / pod red. M.D. Bezborod'ko. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2004. 550 s.
8. Krutolapov A.S., CHeshko I.D. Ognepregrazhdayushchie setochnye ehkrany dlya zashchity tekhnologicheskogo oborudovaniya neftegazoprovodov // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii. 2014. № 1. S. 67–72.
9. Shimko V.Yu. Ispol'zovanie vodoplenochnykh teplozashchitnyh ehkranov dlya zashchity ot teplovogo izlucheniya pri gorenii szhizhennogo prirodno go gaza // Pozharovzryvobezopasnost'. 2013. T. 22. № 12. S. 63–67.
10. Usmanov M.H. Vliyanie termicheskogo vozdejstviya na ograzhdayushchie konstrukcii: novye metody ehkspertizy mest pozharov i teplozashchity. Tashkent: Vysshaya tekhnicheskaya shkola pozharnoj bezopasnosti MVD RUz, 2008. 291 s.