

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 614.841

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-250-256>

Поступила в редакцию 30.03.2021

Received 30.03.2021

А. И. Кицак

НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГЕТЕРОГЕННОГО ИНГИБИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ПЛАМЕНИ СТРУЙНОЙ ГОРЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦАМИ ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА

Аннотация. Актуальность работы обусловлена отсутствием на настоящее время физической интерпретации процесса тушения струйных горящих систем огнетушащими порошками, важной для обеспечения эффективного тушения пожаров на газонефтяных комплексах и опасных химических производствах. Рассмотрена математическая модель кинетики реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйной горящей системы частицами огнетушащего порошка в неустановившемся режиме в приближении чисто молекулярного переноса вещества в зоне реакции. Установлены общие закономерности механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в условиях, когда активные частицы продуктов горения участвуют не только в диффузионном, но и в конвективном переносе. Показано, что конвективное движение активных центров пламени повышает скорость реакции гетерогенного ингибирования их частицами огнетушащего вещества. Полученные результаты позволяют оптимизировать условия подачи огнетушащего порошка в струйную горящую систему для эффективного подавления пламени.

Ключевые слова: огнетушащий порошок, струйная система, активные центры, гетерогенное ингибирование, время ингибирования

Для цитирования: Кицак, А.И. Моделирование механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйной горящей системы частицами огнетушащего порошка / А.И. Кицак // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №2. – С. 250–256. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-250-256>

Anatoli I. Kitsak

Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

MODELING OF THE MECHANISM OF HETEROGENEOUS INHIBITION OF THE ACTIVE FLAME CENTERS OF A JET BURNING SYSTEM BY FIRE EXTINGUISHING POWDER PARTICLES

Abstract. The relevance of the work is due to the lack of a physical interpretation of the process of extinguishing jet burning systems with fire extinguishing powders, which is important for ensuring effective fire extinguishing at gas and oil complexes and hazardous chemical industries. A mathematical model of the reaction kinetics of heterogeneous inhibition of active flame centers of a jet burning system by fire extinguishing powder particles in an unsteady mode is considered in the approximation of a purely molecular transfer of matter in the reaction zone. The regularities of the mechanism of heterogeneous inhibition of the active flame centers by the particles of the extinguishing powder under conditions when the active particles of the combustion products participate not only in diffuse, but also in convective transport are established. It is shown, that the convective motion of the active flame centers increases the reaction rate of heterogeneous inhibition of their particles of the extinguishing agent. The results obtained allow us to optimize the conditions for the supply of fire extinguishing powder to the jet burning medium for effective flame suppression.

Keywords: extinguishing powder, jet system, active centers, heterogeneous inhibition, inhibition time

For citation: Kitsak A. I. Modeling of the mechanism of heterogeneous inhibition of the active flame centers of a jet burning system by fire extinguishing powder particles. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 250–256 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-250-256>

Введение. Тушение пожаров струйных горящих систем, к которым можно отнести газовые, газоконденсатные, нефтяные и газонефтяные «компактные» фонтаны, а также некоторые возгорания при авариях на магистральных газопроводах и взрывах технологического оборудования с горючими веществами, находящимися под высоким давлением, является одним из наиболее сложных процессов как в тактическом, так и технологическом плане. Сложность технологии тушения струйных горящих систем перечисленных типов состоит в необходимости подачи в зону горения огнетушащего вещества в условиях мощного тепловыделения и больших скоростей горючей среды, что накладывает особые требования на выбор вида огнетушащего вещества, способов и технических средств тушения в каждом конкретном случае.

Форма «компактного» горящего газового фонтана имеет вид факела [1]. Высота факела может достигать ~80–100 м, а максимальный диаметр его у основания составлять ~10–15 м [2].

Процесс горения факелов компактных газовых фонтанов является диффузионным [3–5], то есть горючая газовая смесь формируется в результате диффузионного перемешивания молекул газа струи и кислорода из внешней воздушной среды. По мере удаления от устья фонтана скорость частиц горючего газа падает, и они начинают перемещаться (диффундировать) в сторону окружающей воздушной среды. В это же время внутрь струи проникают потоки воздуха, увлекаемые струей.

На некоторой высоте от устья фонтана и некотором удалении от условной оси газовой струи формируется слой газозадушной смеси с составом молекул горючего газа и кислорода, близким или равным стехиометрическому [2, 6]. При зажигании смеси в данном слое развиваются цепные реакции окисления продуктов горения, которые поддерживаются постоянной подпиткой зоны реакции свежими порциями горючего газа и воздуха. Зона химических реакций, или зона горения, отсвечивает пламенем, контуры которого (поверхность факела) располагаются между поверхностями верхнего и нижнего концентрационных пределов распространения пламени. Фронт пламени стабилизируется в нижней части факела, в слое со стехиометрическим составом горючей смеси, в котором процесс горения близок к кинетическому, и скорость фронта пламени равна скорости потоку смеси. Выше слоя стабилизации, вверх по фронту пламени, в слоях с обедненной концентрацией кислорода происходит фактически догорание продуктов горения. Толщина зоны горения не превышает ~10 мм [4]. Высота ее, определяемая вдоль направления, параллельного оси факела, очевидно, будет зависеть от расстояния от оси и может составлять десятки метров [7].

Тушение мощных газовых фонтанов (дебит $(5-8) \cdot 10^6$ м³/сут) может осуществляться огнетушащими порошками. Одним из перспективных способов тушения пожаров на газовых и газонефтяных скважинах является применение для тушения горящих фонтанов газопорошковых вихрей (патент RU 895 174 E21 B35//00 «Способ тушения пожаров на газовых и газонефтяных скважинах», авторы – Д. Г. Ахматов, Б. А. Луговцов, В. А. Мелетин, В. Ф. Тарасов, Н. Е. Чернухин; патент RU 2 616 039 C1 «Способ вихревого порошкового тушения горящих фонтанов на газовых, нефтяных и газонефтяных скважинах», автор – В. И. Забегаев).

Суть способа состоит в формировании ряда вихревых колец, заполненных частицами огнетушащего порошка, движущихся вдоль оси факела снизу вверх, при последовательном подрыве расположенных на металлическом поддоне концентрических кольцевых зарядов взрывчатого вещества, охватывающих горящий факел скважины, и распыления огнетушащего порошка, расположенного между зарядами. Тушение факела осуществляется вследствие отрыва фронта пламени от струи горючей смеси в результате резкого снижения скорости пламени, обусловленной ингибированием активных центров пламени частицами огнетушащего порошка.

Способ предполагает применение нанопорошка, которым заполняют первое вихревое кольцо (патент RU 2 616 039 C1). Последующие вихревые кольца заполняются обычным (не наноразмерным) огнетушащим порошком. Их назначение состоит в обеспечении надежности тушения

пожара. Порошок доставляется в зону горения энергией ударной волны, возникающей при подрыве заряда. Кроме движения вдоль оси факела, частицы огнетушащего порошка внутри вихря обладают круговым движением, причем линейная скорость их на начальном этапе образования вихря намного больше скорости вихря вдоль оси факела. Скорость вихря вдоль факела может составлять ~50–100 м/с (патент RU 895 174 E21 B35//00).

Особенностью реакции ингибирования активных центров пламени факела горящего фонтана, в частности гетерогенного ингибирования их частицами огнетушащего порошка, является то, что в зоне реакции активные частицы пламени участвуют как в диффузионном, так и в конвективном движении. Гетерогенное ингибирование происходит в зоне реакции, в каналах и микропустотах, образованных частицами огнетушащего порошка, и за время прохождения вихрем зоны горения. Наиболее важным моментом в процессе отрыва факела от горючей струи фонтана является быстрое и эффективное ингибирование частицами огнетушащего вещества активных центров пламени в зоне стабилизации факела.

Несмотря на имеющийся положительный опыт тушения газовых фонтанов, например, с применением пневматических порошковых пламеподавителей типа ППП-200 (патент RU 2 616 039 С1), на данный момент отсутствует анализ механизма тушения струйных горящих систем огнетушащими порошками и подходов к выбору режимов тушения.

Цель работы – оценка эффективности ингибирования активных центров пламени струйных горящих систем частицами огнетушащего порошка в условиях нестационарного взаимодействия для выявления оптимальных режимов тушения.

Математическая модель кинетики реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйной горячей системы частицами огнетушащего порошка в неустановившемся режиме. Будем полагать, что в область реакции зоны стабилизации факела с установившейся в ней скоростью горения, примерно равной среднеквадратичному значению составляющей пульсационной скорости струи горючего газа в направлении ее движения [4], подается огнетушащий порошок. Подача порошка может осуществляться как с использованием вихревых колец, так и импульсным вбрасыванием с применением пневматических пушек.

В некоторый момент времени t в области горения сформируется слой порошка по контуру зоны стабилизации факела. Картина заполнения частицами огнетушащего порошка зоны стабилизации факела представлена на рис. 1.

В каналах слоя, а также микрополостях, образованных частицами порошка, будут протекать реакции гетерогенного ингибирования активных частиц пламени поверхностью частиц порошка за время нахождения их в зоне горения. Данные микроструктуры исполняют роль своеобразных огнепреградительных элементов.

Проведем оценку изменения концентрации активных центров пламени C в результате реакции гетерогенного ингибирования. Для простоты выкладок рассмотрим процесс гетерогенной реакции, проходящей в отдельном канале слоя. Выбор такого приближения типа реактора возможен вследствие того, что размеры активных частиц на два-три порядка меньше размеров частиц порошка. Зазоры, образуемые частицами порошка, достаточно велики в масштабе активных частиц пламени и допускают адсорбцию их поверхностью частиц порошка и восстановление этих активных частиц другими родственными или неродственными активными частицами, которые с ними столкнутся, в результате диффузионного или конвективного движения внутри данного реактора.

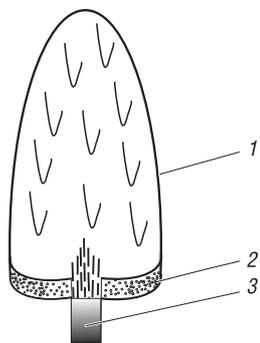


Рис. 1. Модельная структура факела: 1 – фронт пламени, 2 – зона стабилизации пламени, 3 – струя горючего газа

Fig. 1. Model structure of the flambeau: 1 – flame front, 2 – flame stabilization zone, 3 – jet of combustible gas

Предположим, что канал имеет структуру полого, неограниченного в масштабе размеров активных частиц пламени цилиндра с эквивалентным диаметром d_{eq} . Условное изображение такого канала, образованного частицами порошка в зоне горения, показано на рис. 2.

Поскольку задачей работы является получение общих закономерностей гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйных горящих сред в условиях нестационарности протекания реакции ингибирования, запишем уравнение переноса активных центров пламени внутри канала только для молекулярной части этого процесса. Учет вклада турбулентной составляющей переноса активных частиц пламени, очевидно, будет важен при планировании проведения измерений интенсивности ингибирования активных частиц.

С учетом участия активных частиц как в диффузионном, так и в конвективном движении внутри канала получим следующее уравнение переноса вещества в реакторе:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w_a \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

где $C = C(t, z, r)$ – концентрация активных частиц пламени, кг/м^3 ; z, r – продольная и поперечная координаты системы отсчета, связанной с центром канала; w_a – модуль скорости конвективного движения активных частиц пламени, равный примерно среднеквадратичному значению продольной компоненты пульсационной скорости струи горючего газа, м/с ; D – коэффициент молекулярной диффузии частиц, $\text{м}^2/\text{с}$.

Уравнение (1) записано в предположении малости коэффициента продольной молекулярной диффузии активных частиц пламени по сравнению с коэффициентом конвективного переноса их.

Дополним уравнение (1) граничными и начальными условиями [8]:

$$\left(D \frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R_{\text{eq}}} = - \left(\frac{\gamma u}{4} C \right)_{r=R_{\text{eq}}}; \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=0} = 0; \quad (3)$$

$$C(t=0, z=0, r=0) = C_0; \quad (4)$$

$$C(t \rightarrow \infty) = 0. \quad (5)$$

Здесь γ – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью частицы порошка; u – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с ; C_0 – исходная концентрация активных частиц пламени, кг/м^3 , R_{eq} – радиус канала, м .

Условие (2) отражает динамику гетерогенного ингибирования активных частиц в кинетической области реакции. Условие (3) свидетельствует о конечном значении концентрации активных частиц на оси канала. Условие (5) указывает на то, что решение (1) должно быть затухающим при больших значениях t .

Уравнение (1) с условиями (2)–(5) не имеет аналитического решения. Учитывая то, что в нашей задаче основной интерес представляет изучение влияния нестационарности процесса взаимодействия частиц огнетушащего порошка с активными центрами пламени на эффективность тушения пламени, данное решение может быть получено, если в уравнении (1) и условиях (2)–(5) перейти от концентрации C к концентрации \bar{C} , усредненной по направлению z , то есть

$$\bar{C}(t, r) = \frac{1}{l} \int_0^l C(t, z, r) dz, \quad (6)$$

где l – эффективная толщина зоны реакции, м .

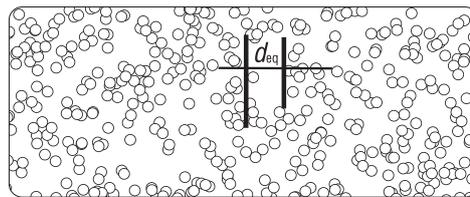


Рис. 2. Условная картина распределения частиц огнетушащего порошка в зоне стабилизации пламени факела в фиксированный момент времени

Fig. 2. Conditional picture of the distribution of fire extinguishing powder particles in the flame stabilization zone of the torch at a fixed time

Перейдя в уравнениях (1) и (2)–(5) от C к \bar{C} и решая полученную систему уравнений относительно \bar{C} , получим для изменения концентрации \bar{C}_k активных частиц в кинетической области реакции следующее соотношение:

$$\bar{C}_k = C_0 J_0 \left(\sqrt{\frac{\gamma u}{d_{\text{eq}} D}} \cdot r \right) \exp \left(-\frac{t}{\tau_k} \right), \quad (7)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого рода нулевого порядка; $d_{\text{eq}} = 2R_{\text{eq}}$ – эквивалентный диаметр канала, м; $\tau_k = \frac{1}{(\gamma u / d_{\text{eq}}) + (w_a / l)}$ – время обрыва цепи горения, с.

Уравнение (7) характеризует изменение средней концентрации активных частиц пламени вдоль радиуса канала r в заданный момент времени t .

За время взаимодействия t_{int} частиц огнетушащего порошка с активными центрами пламени, концентрация \bar{C}'_k ингибированных активных частиц будет равна

$$\bar{C}'_k = C_0 \tau_k \left(\frac{t_{\text{int}}}{\tau_k} - J_0 \left(\sqrt{\frac{\gamma u}{d_{\text{eq}} D}} \cdot r \right) \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{t_{\text{int}}}{\tau_k} \right) \right) \right), \quad (9)$$

где $t_{\text{int}} = l/v$, $v = \sqrt{v_{\text{pa},x}^2 + v_{\text{pa},y}^2}$ – модуль относительной скорости движения частиц огнетушащего порошка и струи горючего газа в зоне стабилизации пламени; $v_{\text{pa},x}$ и $v_{\text{pa},y}$ – проекции относительных скоростей на координатные оси x и y .

Анализ эффективности гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйных горящих систем частицами огнетушащего порошка в условиях нестационарного взаимодействия. Предложенная модель механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в струйных горящих средах типа факела газового фонтана является достаточно грубым отображением реального процесса тушения газового фонтана огнетушащим порошком. Особенностью ее является то, что она позволяет выявить общие закономерности тушения огнетушащим порошком движущейся горячей среды.

Анализ выражения (9) для концентрации активных центров пламени струйной горячей системы, ингибированных частицами огнетушащего порошка, показывает, что эффективность ингибирования определяется как дисперсными характеристиками огнетушащего порошка, задающими величину параметра d_{eq} , так и кинетическими параметрами активных центров и условиями тушения. Процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше дисперсность частиц порошка и время взаимодействия t_{int} их с активными центрами пламени и чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования τ_k .

Из полученного выражения для длительности реакции ингибирования τ_k видно, что скорость реакции ингибирования зависит не только от характеристик диффузионного молекулярного движения активных частиц пламени, но и их продольной скорости в зоне горения. Причем скорость реакций ингибирования возрастает с увеличением продольной скорости активных частиц. Это явление способствует уменьшению времени обрыва цепей горения и улучшает условия тушения горячей струйной системы.

Оценка скорости $k_k = \gamma u / d_{\text{eq}}$ реакции гетерогенного ингибирования молекул кислорода с молярной массой $\mu = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и диаметром $1,5 \cdot 10^{-10}$ м в кинетической области ее течения, обусловленной только их диффузионным движением, показывает, что она равна $k_k = 3,39 \cdot 10^5$ 1/с.

Расчет скорости производился в предположении, что температура в зоне горения $T = 973$ К, атмосферное давление $P = 10^5$ Па, $\gamma = 10^{-2}$, $u = 1,13 \cdot 10^3$ м/с, $D = 5,84 \cdot 10^{-5}$ м²/с, диаметр d_p частиц огнетушащего порошка равнялся 50 мкм.

Для определения d_{eq} использовалась формула [9]

$$d_{\text{eq}} = \frac{2\Phi\varepsilon d_p}{3(1-\varepsilon)}, \quad (11)$$

где Φ – фактор формы частиц (для шарообразных частиц $\Phi = 1$); $\varepsilon = (V - V_0)/V$ – порозность частиц порошка в слое; V – общий объем, занимаемый слоем частиц, м^3 ; V_0 – объем, занимаемый частицами порошка в слое, м^3 ; d_p – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м . При расчетах применялся параметр $\varepsilon = 0,5$.

Добавка $\Delta k = v_a/l$ к скорости реакции гетерогенного ингибирования активных частиц, обусловленная их конвективным движением, например, при скорости $v_a = 100$ м/с и эффективной толщине зоны реакции $l = 10$ мм равна $\Delta k = 10^5$ $1/\text{с}$,

Из сопоставления величин k_k и Δk следует, что они примерно одного порядка. Таким образом, конвективное движение активных частиц пламени способствует повышению эффективности ингибирования их частицами огнетушащего порошка.

Другим важным фактором при тушении струйных горящих сред является обеспечение необходимой скорости частицам огнетушащего порошка в зоне горения. Важна не только величина абсолютного значения скорости, но и ее направление. Из определения выражения времени взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени следует, что длительность процесса увеличивается с уменьшением относительной скорости частиц порошка и скорости горючей смеси в зоне стабилизации пламени. Эта скорость будет минимальна, если абсолютная скорость частиц порошка будет приближаться к абсолютной скорости горючей струи в зоне стабилизации пламени, и совпадать с ней по направлению.

Такие условия почти идеально создаются при тушении факелов фонтанов газопорошковыми вихрями, движущимися снизу вверх по оси факела. Частицы порошка перемещаются в зоне горения по спиралевидным траекториям, обладая составляющей скорости в направлении движения горючей смеси, приближающейся по абсолютному значению к абсолютному значению скорости смеси.

Заключение. Разработана математическая модель кинетики реакции гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйной горячей системы частицами огнетушащего порошка в неустановившемся режиме.

Установлены закономерности механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в условиях, когда активные частицы продуктов горения участвуют не только в диффузионном, но и в конвективном переносе.

Из соотношения для усредненной концентрации ингибированных активных частиц пламени, полученного для неустановившегося процесса тушения, следует, что эффективность ингибирования тем выше, чем меньше размер частиц порошка и чем меньше их порозность (чем больше их объемная концентрация). С уменьшением данных параметров увеличивается как интенсивность ингибирования активных частиц, так и скорость реакции гетерогенного ингибирования. Скорость реакции повышается также вследствие участия активных частиц в конвективном движении, причем она тем больше, чем больше скорость частиц и чем меньше эффективная толщина зоны реакции.

Выявлено также, что эффективность тушения пламени струйной горячей системы зависит от времени взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени. Это время тем больше, чем ближе абсолютная скорость частиц порошка к среднеквадратичному значению пульсационной скорости струи горючего газа и чем ближе направление движения их к направлению движения струи.

Полученные результаты позволяют оптимизировать условия подачи огнетушащего порошка в струйную горящую систему для эффективного подавления пламени. Огнетушащий порошок следует доставлять в зону стабилизации пламени по направлению, как можно более близкому к продольному направлению струи горячей системы, а скорость частиц порошка должна приближаться к среднеквадратичному значению пульсационной скорости струи горючего газа в зоне стабилизации пламени. Для тушения пламени струйной горячей системы следует применять огнетушащий порошок с высокой дисперсностью и необходимо обеспечивать высокую объемную плотность его в зоне стабилизации пламени.

Список использованных источников

1. Бобков, С. А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
2. Ахматов, Д. Г. Тушение пожаров на газонефтяных скважинах с помощью вихревых колец / Д. Г. Ахматов, Б. А. Луговцов, В. Ф. Тарасов // Физика горения и взрыва. – 1980. – № 5. – С. 8–14.
3. Вулис, Л. А. Основы теории горения факела / Л. А. Вулис, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярин. – Ленинград: Энергия, Ленинград. отд-ние, 1968. – 203 с.
4. Маскаева, Л. Н. Теоретический расчет основных параметров горения газового фонтана / Л. Н. Маскаева, В. Ф. Макаров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 27 с.
5. Крыжановский, Ю. В. Структура и расчет газового факела / Ю. В. Крыжановский В. Н. Крыжановский. – К.: Освіта України, 2012. – 96 с.
6. Андросов, А. С. Теория горения и взрыва / А. С. Андросов, И. Р. Бегишев, Е. П. Салаев. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 248 с.
7. Абдурагимов, И. М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения / И. М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 4. – С. 60–82.
8. Реакции гибели активных частиц на стенке в струевых условиях / Ю. М. Гершензон [и др.] // Докл. Акад. наук СССР. – 1972. – Т. 205, № 4. – С. 871–874.
9. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.

References

1. Bobkov S. A. *Physical and Chemical Bases of Fire Development and Extinguishing*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2014. 210 p. (in Russian).
2. Ahmatov D. G., Lugovtsov B. F., Tarasov V. F. Extinguishing fires at gas and oil wells with the help of vortex pumps. *Combustion, Explosion and Shoch Waves*, 1980, vol. 16, no. 5, pp. 490–494. <https://doi.org/10.1007/bf00794922>
3. Vulis L. A. *Fundamentals of the Theory of Combustion Fountains*. Leningrad, Energia Publ., 1968. 203 p. (in Russian).
4. Maskaeva L. N. *Theoretical Calculation of the Main Parameters of the Combustion of a Gas Fountains*. Yekaterinburg, State Educational Institution of Higher Professional Education Ural State Technical University, 2008. 27 p. (in Russian).
5. Krijanovski Yu. V. *Structure and Calculation of the Gas Fountains*. Kiev, Osvita Ukraїni Publ., 2012. 96 p. (in Russian).
6. Androsov A. S. *Combustion and Explosion Theory*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2015. 248 p. (in Russian).
7. Abduragimov I. M. About the mechanism of fire extinguishing action of fire extinguishing means, *Pozharovzrivobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 60–82 (in Russian).
8. Gershenzon Yu. M., Rozenshtein V. B., Spasskii A. P., Kogan A. M. Reactions of active particle death on the wall under jet conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1972, vol. 205, no. 4, pp. 871–874 (in Russian).
9. Kasatkin A. G. *Basic Processes and Devices of Chemical Technology*. Moscow, Publ. House “Alliance” Ltd., 2004. 753 p. (in Russian).

Информация об авторе

Кицак Анатолий Ильич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследований автоматических средств обнаружения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (ул. Солтыса, 183а, 220046, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kitsak48@yandex.ru

Information about the author

Anatoli I. Kitsak – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Research Department of Automatic Means of Detection and Elimination of Emergencies, Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (183a, Soltys Str., 220046, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kitsak48@yandex.ru