

кандидат физ.-мат. наук А.И. Кицак / A.I. Kitsak, Ph.D.<sup>a)\*</sup>

<sup>a)</sup>Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь / Research Institute of Fire Safety and Emergencies (RIFSE) Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus

\*Corresponding author: kitsak48@yandex.ru

## Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения

The Dynamics of Dry Chemical Powder Particles Towards the Fire Source During Their Pulse Feeding into the Combustion Zone

Dynamika cząsteczek proszku gaśniczego podczas podawania go w kierunku pożaru metodą impulsową

### АННОТАЦИЯ

**Цель:** В настоящее время для тушения пожаров широко используются модульные установки порошкового пожаротушения (МУПП) импульсного типа. Данные установки состоят, как правило, из узлов управления и модулей порошкового пожаротушения (МПП), заполненных огнетушащим порошком и газом, закачанным внутрь модуля под высоким давлением.

Подача огнетушащего порошка из МПП в очаг пожара осуществляется при воздействии на него нагретого воздуха тепловой колонки очага пожара, обладающего подъемной силой. Величина этой силы зависит от мощности пожара и интенсивности воздухообмена в помещении. Очевидно, в данных условиях эффективность тушения пожара МУПП будет определяться не только огнетушащей способностью порошка, но и его динамическими характеристиками при движении к очагу пожара.

Для решения задач проектирования МУПП импульсного типа, а также при испытании МПП актуальным является учет влияния на динамику газопорошковой смеси, выбрасываемой из МПП, сопротивления воздушной среды и подъемной силы нагретых газов тепловой колонки очага пожара.

Целью работы является определение зависимости скорости единичной массы огнетушащего порошка от расстояния от выходного отверстия модуля порошкового пожаротушения (МПП) импульсного типа при заданных пневмо-загрузочных характеристиках модуля, дисперсных параметрах огнетушащего порошка и мощности пожара.

**Проект и методы:** Достижение поставленной цели осуществлялось методом математического моделирования процессов истечения огнетушащего вещества из МПП и движения его в открытом пространстве к очагу пожара.

**Результаты:** Разработана математическая модель динамики газопорошковой смеси в открытом пространстве на пути к поверхности горения при заданных эксплуатационных характеристиках МПП и энергетических параметрах пожара.

Получено соотношение для оценки скорости частиц огнетушащего порошка на различных расстояниях от выходного отверстия МПП при движении их к очагу пожара заданной мощности.

Проведены экспериментальные исследования динамики фронта газопорошковой смеси, выбрасываемой из МПП импульсного типа. Анализ полученных результатов свидетельствует о удовлетворительном согласии их с численными оценкам.

**Выводы:** Полученные результаты могут быть использованы при проведении испытаний МПП импульсного типа для оценки пространственно-энергетических параметров очагов пожара, которые могут быть ими потушены, а также в задачах проектировании МУПП для определения пневмо-загрузочных параметров МПП по известным техническим характеристикам применяемого огнетушащего вещества, предполагаемым значениям мощности очага пожара и высоты расположения МПП.

**Ключевые слова:** модульная установка порошкового пожаротушения, огнетушащий порошок, скорость огнетушащего порошка, мощность очага пожара, тепловой поток

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

Принята: 09.02.2018; Рецензирована: 26.03.2018; Одобрена: 10.04.2018;

Просим ссылаться на статью следующим образом: ВіТР Vol. 49 Issue 1, 2018, pp. 76–85, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.7;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

**ABSTRACT**

**Objective:** Currently, the pulse-type dry chemical extinguishing system (DCES) is extensively used for extinguishing fires. These units generally consist of a control junction and powder extinguishing modules (PEM) filled with fire extinguishing powder and gas pumped into the module under the high pressure. Giving extinguishing powder from the PEM in the fire source is carried out when exposed to the heated air of the thermal column generating lift. The magnitude of this force depends on the power of fire and intensity of air change in the room. The efficiency of fire extinguishing with the DCES in these conditions will be determined not only by the powder extinguishing ability but also its dynamic characteristics when approaching the fire.

In the design of pulse-type fire extinguishing systems using PEMs it should be considered that during testing PEMs the dynamics of the gas powder mixture released from the module is impacted by the air resistance and the lift of the heated gases from the thermal column from the fire source.

**Aim:** The aim of this work is to determine the ratio of the unit weight of dry chemical extinguishing powder depending on the distance from the nozzle of the DCES for the defined pneumatic and loading characteristics of the system, disperse parameters of dry chemical powder and the fire power.

**Project and methods:** To reach the aim of the study, a mathematical model approach was applied for the flow process the extinguishing substance from the DCES and its movement in open-air space towards the fire.

**Results:** A mathematical model was developed to calculate the movement dynamics of the gas-powder mixture in an open-air space towards the fire source under specific performance parameters of the DCES and the power of the fire.

A correlation for estimating the extinguishing powder particle velocity at different distances from the DCES nozzle during their movement towards the fire of a given power was obtained.

An experimental study of the dynamics of the front of the powder mixture ejected from the pulse-type PEM was performed. The analysis of the results showed their satisfactory level of compliance with numerical calculations.

**Conclusions:** The obtained results can be used for analyses of pulse-type PEMs with a goal of assessing the spatial and energy parameters of fires which can be extinguished using this method. The results can be used during the design of such installations in order to specify the pneumatic and load parameters of the module associated with the given technical characteristics of the extinguishing agent, the assumed power level of the fire source and the height of the PEM.

**Keywords:** dry chemical extinguishing system, dry chemical powder, velocity of the dry chemical powder, power of the fire source, heat wave

**Type of article:** original scientific article

Received: 09.02.2018; Reviewed: 26.03.2018; Accepted: 10.04.2018;

Please cite as: BiTP Vol. 49 Issue 1, 2018, pp. 76–85, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.7;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

**ABSTRAKT**

**Wprowadzenie:** W obecnych czasach modułowe proszkowe instalacje gaśnicze typu impulsowego są powszechnie wykorzystywane do gaszenia pożarów. Instalacje te składają się zazwyczaj z modułów sterowania oraz modułów gaszenia proszkowego, które wypełnione są proszkiem gaśniczym i gazem pod wysokim ciśnieniem.

Na proszek gaśniczy podawany z modułów gaszenia proszkowego do ogniska pożaru oddziałuje nagrzane powietrze komina termicznego, generujące siłę nośną. Wielkość tej siły zależy od mocy pożaru i intensywności wentylacji pomieszczenia. W takich warunkach efektywność gaszenia pożaru za pomocą instalacji proszkowej będzie zależna nie tylko od skuteczności gaśniczej proszku, lecz także od jego charakterystyk dynamicznych, podczas gdy przemieszcza się w stronę źródła pożaru.

Przy projektowaniu modułów proszkowych instalacji gaśniczych typu impulsowego, a także podczas badań modułów gaszenia proszkowego należy uwzględnić, że na dynamikę ruchu mieszaniny gazowo-proszkowej wyzwolanej z modułu wpływają oporność powietrza oraz siła nośna rozgrzanych gazów komina termicznego ze źródła pożaru.

**Cel:** Celem pracy jest wyznaczenie zależności między prędkością jednostkowej masy proszku gaśniczego a lokalizacją otworu wylotowego modułu gaszenia proszkowego typu impulsowego w warunkach określonych charakterystyk pneumatycznych i obciążeniowych modułu, parametrów dyspersji proszku i mocy pożaru.

**Projekt i metody:** Aby zrealizować wyznaczony cel, zastosowano metodę modelowania matematycznego ubytku środka gaśniczego po jego wyzwoleniu oraz jego ruchu w kierunku źródła pożaru w przestrzeni otwartej.

**Wyniki:** Opracowano model matematyczny dynamiki ruchu mieszaniny gazowo-proszkowej, odbywającego się na przestrzeni otwartej w kierunku źródła pożaru oraz w określonych warunkach parametrów pracy modułów gaszenia proszkowego oraz energii pożaru.

Otrzymano zależność do oceny prędkości cząsteczek proszku gaśniczego w różnych odległościach od otworu wylotowego modułu gaszenia proszkowego, podawanego w stronę pożaru o określonej mocy.

Przeprowadzono badania eksperymentalne dynamiki przemieszczania się frontu gazowo-proszkowej mieszaniny wyrzucanej przez moduły gaszenia proszkowego typu impulsowego. Analiza otrzymanych wyników świadczy o zadowalającej zgodności z obliczeniami numerycznymi.

**Wnioski:** Otrzymane wyniki mogą być wykorzystane przy przeprowadzaniu badań modułów gaszenia proszkowego typu impulsowego mających na celu ocenę parametrów przestrzennych i energetycznych pożarów, które mogą być nimi ugaszone. Rezultaty można wykorzystać również podczas projektowania tego rodzaju instalacji w celu określenia parametrów pneumatycznych i obciążeniowych modułu związanych ze znanymi technicznymi charakterystykami środka gaśniczego, zakładanych wartości mocy źródła pożaru i wysokości umieszczenia modułu gaszenia proszkowego.

**Słowa kluczowe:** modułowa proszkowa instalacja gaśnicza, proszek gaśniczy, prędkość proszka gaśniczego, moc źródła pożaru, fala ciepła

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 09.02.2018; Zrecenzowany: 26.03.2018; Zatwierdzony: 10.04.2018;

Proszę cytować: BiTP Vol. 49 Issue 1, 2018, pp. 76–85, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.7;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Введение

В настоящее время для тушения пожаров широко используются модульные установки порошкового пожаротушения (МУПП) импульсного типа. Данные установки состоят, как правило, из узлов управления и модулей порошкового пожаротушения (МПП), заполненных огнетушащим порошком и газом, закачанным внутрь модуля под высоким давлением. Отличительной особенностью МУПП импульсного типа является их высокое быстродействие и ограниченность огнетушащего заряда модуля. Время выброса газопорошковой смеси (ГПС) из МПП в зону горения  $\leq 1$  с. Масса огнетушащего вещества, загружаемого в модуль, находится в пределах 3–20 кг.

Подача порошка в очаг пожара осуществляется при воздействии на него нагретого воздуха тепловой колонки, обладающего подъемной силой. Величина этой силы зависит от мощности пожара и интенсивности воздухообмена в помещении. Очевидно, в данных условиях эффективность тушения пожара МУПП будет определяться не только огнетушащей способностью порошка, но и его динамическими характеристиками при движении к очагу пожара.

На данный момент хорошо изучены нестационарные процессы истечения порошка из МПП. Исследование закономерностей истечения газопорошковой смеси (ГПС) через насадок-распылитель МПП проводилось в ряде работ [1–2]. Разработанная авторами данных работ модель истечения ГПС в виде двухфазного потока твердых частиц и газа в предположении запаздывания частиц порошка относительно частиц газа приблизила результаты расчета динамики давления к реальному процессу его изменения внутри МПП при истечении ГПС.

Анализ литературных данных показывает, что математическое моделирование процессов движения ГПС от выхода из МПП к очагу пожара до настоящего времени практически не проводилось. Экспериментальные результаты исследования пространственно-временных характеристик ГПС [3] свидетельствуют о том, что с увеличением расстояния от выходного отверстия МПП происходит удаление вытесняющего газа из струи вследствие его расширения и проникновение в свободные каналы порошковой среды окружающего воздуха и встречных нагретых потоков продуктов горения. Под действием этих факторов появляется горизонтальная составляющая скорости частиц порошка, приводящая к размытию контуров струи, и постепенное торможение движения частиц. Вследствие снижения скорости часть частиц порошка может не достичь поверхности горения и снизить эффективность тушения пожара.

Для решения задач проектирования МУПП импульсного типа, а также при испытании МПП актуальным является учет влияния на динамику газопорошковой смеси, выбрасываемой из МПП, сопротивления воздушной среды и подъемной силы нагретых газов тепловой колонки очага пожара.

Целью работы является определение зависимости скорости единичной массы огнетушащей смеси от расстояния от выходного отверстия МПП при заданных

пневмо-загрузочных характеристиках модуля, дисперсных параметрах огнетушащего порошка и мощности пожара.

## Элементы математической модели поверхностного способа тушения пожара модульной установкой порошкового пожаротушения импульсного типа

Поверхностное тушение пожара МПП состоит в изоляции поверхности горящего вещества от доступа воздуха, охлаждении горячей поверхности, химическом торможении (ингибировании) реакции горения. Осуществляется оно подачей порошковой смеси непосредственно в очаг пожара.

В соответствии с принципом работы МПП и способом подачи порошка в зону пожара можно выделить следующие составные компоненты математической модели поверхностного способа тушения пожара:

- процессы изменения давления внутри корпуса МПП, массового расхода ГПС и ее скорости при истечении из МПП,
- динамика характеристик движения ГПС в открытом пространстве на пути к очагу пожара.

### Динамика истечения ГПС из МПП импульсного типа

Истечение порошка из модуля порошкового пожаротушения импульсного действия сопровождается процессами изменения давления внутри корпуса МПП, массового расхода ГПС и ее скорости на выходе из МПП. Для математического описания этих процессов можно воспользоваться псевдо-жидкостной моделью истечения ГПС, предложенной в работе [1], несколько ее модифицировав.

Суть модификации заключается в том, что истекающая из МПП газопорошковая смесь рассматривается как однофазное вещество с плотностью, равной насыпной плотности огнетушащего порошка. Уравнение изменения давления  $P(t)$  внутри МПП при истечении ГПС в данном случае можно представить в виде

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{P(t)G_{\text{сп}}(t)}{m_{\text{сп}}(t)} \quad (1)$$

где  $G_{\text{сп}}(t)$  – массовый расход ГПС за единицу времени,  $m_{\text{сп}}(t)$  – масса ГПС внутри корпуса МПП.  $t$  – текущее время.

Величина

$$G_{\text{сп}}(t) = \mu(t)S_{\text{н}}\rho_{\text{эф}}\sqrt{\frac{2[P(t)-P_{\text{ат}}]}{\rho_{\text{эф}}(t)}} \quad (2)$$

где  $\mu(t)$  – коэффициент расхода ГПС,  $S_{\text{н}}$  – площадь выходного сечения насадка или отверстия МПП,  $P_{\text{ат}}$  – атмосферное давление,  $\rho_{\text{эф}}$  – эффективная (насыпная) плотность ГПС.

Эффективная плотность ГПС  $\rho_{\text{эф}}$  определяется из соотношения

$$\rho_{эф}(t) = \frac{m_{gp}(t)}{W_{gp}(t)} \quad (3)$$

где  $W_{gp}(t)$  – объем, занимаемый ГПС в МПП.

Величина, равная квадратному корню в выражении (2), согласно формуле Торричелли соответствует скорости  $v_{gp}$  истечения ГПС из МПП

$$v_{gp}(t) = \sqrt{\frac{2[P(t) - P_{ат}]}{\rho_{эф}(t)}} \quad (4)$$

С учетом (2) и (3) уравнение (1) переписывается в виде

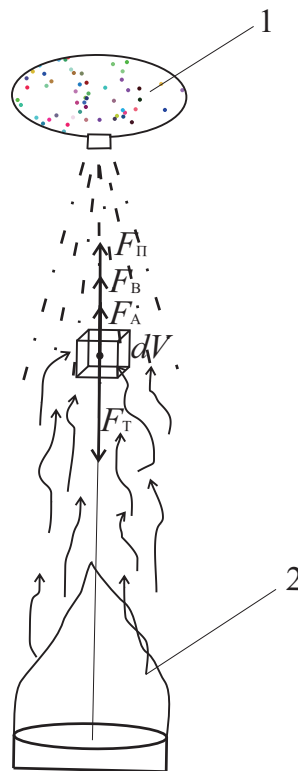
$$\frac{dP(t)}{dt} = - \frac{\mu(t) S_H P(t) \sqrt{2[P(t) - P_{ат}]} / \rho_{эф}}{W_{gp} - \mu(t) S_H \sqrt{2[P(t) - P_{ат}]} / \rho_{эф} t} \quad (5)$$

Данное уравнение не имеет аналитического решения, однако оценку динамики изменения давления можно получить при численном его решении с использованием

интегрированных систем компьютерной математики типа *Mathematica, Mathcad, Maple, Matlab*. При расчетах рекомендуется принимать коэффициент расхода ГПС постоянным и равным коэффициенту расхода капельной жидкости  $\mu(t) = 0,62$ . Также можно считать, что эффективная плотность ГПС не изменяется со временем. Решение уравнения (5) при данных условиях показало, что разница между расчетными и экспериментальными значениями давлений на начальной стадии выброса ГПС составляет не более 5%, а на конечном этапе – ~10%.

### Динамика характеристик движения ГПС в открытом пространстве на пути к очагу пожара

Условная схема тушения пожара МУПП представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Схема тушения пожара МУПП импульсного типа

**Figure 1.** A scheme of extinguishing a fire with impulse powder fire suppression system

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

На схеме изображен модуль порошкового пожаротушения 1, расположенный на некотором фиксированном расстоянии от очага пожара, и сам очаг пожара 2.

Определим силы, действующие в момент времени  $t$  на ансамбль частиц порошка, находящихся в элементарном слое ГПС объемом  $dV$ , движущимся в потоке нагретого воздуха тепловой колонки очага пожара. Будем предполагать, что плотность частиц порошка в выделенном слое однородна по его площади, а скорость частиц одинакова по горизонтальному сечению ГПС.

На выделенный ансамбль частиц действуют: сила тяжести  $\vec{F}_T$ , направленная вертикально к Земле; сила Архимеда  $\vec{F}_A$ , направленная противоположно силе тяжести; сила сопротивления воздуха  $\vec{F}_B$ , направленная в сторону, противоположную вектору скорости частиц порошка; подъемная сила  $\vec{F}_P$  потока теплового воздуха тепловой колонки очага возгорания, направленная противоположно направлению вектора скорости частиц порошка.

Модуль силы тяжести, действующей на частицы порошка, равен

$$F_t = mg = \rho_n dV_0 g \quad (6)$$

где  $m$  – масса частиц порошка,  $dV_0$  – объем слоя, занимаемый данными частицами,  $\rho_n$  – плотность частиц порошка,  $g$  – ускорение свободного падения.

Модуль силы Архимеда, действующий на частицы порошка, равен

$$F_A = \rho_{нг} dV_0 g \quad (7)$$

где  $\rho_{нг}$  – плотность нагретых газов.

При движении в воздушной среде слоя дисперсной среды, какой является огнетушащий порошок, через свободные каналы этой среды будет проходить воздух, оказывая тормозящее действие на частицы порошка. На противоположных границах слоя появится разность давлений  $\Delta p$ , которая может быть оценена, исходя из модифицированного уравнения Бернулли для потери давления на трение в трубопроводе [4]:

$$\Delta p = \lambda \frac{H \rho_{нг} v_b^2}{2d_3} \quad (8)$$

В формуле (8)  $\lambda$  – коэффициент трения,  $H$  – длина каналов, равная высоте слоя,  $v_b$  – скорость воздуха в каналах,  $d_3$  – эквивалентный диаметр, соответствующий суммарному поперечному сечению свободных каналов в слое огнетушащей среды.

По определению [4] величина  $d_3$  равна

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi} \quad (9)$$

где  $S$  – площадь сечения свободных каналов,  $\Pi$  – периметр сечения свободных каналов.

Для газопорошковой струи, в которой основная масса огнетушащего порошка, истекающего из МПП, сосредоточена возле ее оси, величина  $d_3$ , равна

$$d_3 = \sqrt{\varepsilon d_{отв}} \quad (10)$$

где  $\varepsilon = \frac{dV - dV_0}{dV} = 1 - \frac{\rho_{эф}}{\rho_p}$  – порозность порошка,  $d_{отв}$  – диаметр выходного отверстия МПП.

Скорость воздуха в свободных каналах порошковой смеси  $v_b$  связана со скоростью частиц порошка  $v_n$  зависимостью [5]:

$$v_b = \frac{v_n}{\varepsilon} \quad (11)$$

Параметр  $\lambda$  определяется уравнением [4]:

$$\lambda = \frac{133\zeta}{v_b d \rho_{нг}} + 2,34 \quad (12)$$

где  $\zeta$  – коэффициент вязкости воздуха,  $d$  – диаметр шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка.

Подставляя в формулу (8) выражения (10)–(12), получим следующее соотношение для определения величины разности давлений  $\Delta p$

$$\Delta p = 133 \frac{\zeta H v_n}{\rho_{нг} d \varepsilon \sqrt{\varepsilon} d_{отв}} + 2,34 \frac{\rho_{нг} H v_n^2}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon} d_{отв}} \quad (13)$$

Первый член данного выражения описывает сопротивление, оказываемое частицам порошка воздухом, при

его ламинарном движении по свободным каналам огнетушащей порошковой среды. Ламинарный режим движения реализуется, когда модифицированное на случай движения воздуха в зернистом слое критическое число Рейнольдса  $Re = \frac{v_n d \rho_{нг}}{\varepsilon \zeta} < 1$  [4]. Если  $Re \gg 1$ , будет преобладать турбулентное движение воздуха в каналах порошковой смеси. Данный режим описывается вторым членом выражения (13).

Модуль силы сопротивления воздуха равен

$$F_B = \Delta p S_0 = 133 \frac{\zeta v_n}{\rho_{нг} d \varepsilon \sqrt{\varepsilon} d_{отв}} dV_0 + 2,34 \frac{\rho_{нг} v_n^2}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon} d_{отв}} dV_0 \quad (14)$$

где  $S_0$  – площадь сечения слоя порошковой среды занятого частицами порошка.

Найдем соотношение для оценки величины модуля подъемной силы  $F_n$  потока теплового воздуха тепловой колонки очага пожара. Согласно закону Архимеда подъемная сила некоторого объема газа (теплого воздуха) равна разности веса воздуха  $P_b$ , замещенного объемом газа  $V_g$  тепловой колонки, и веса  $P_g$  самого газа. Модуль подъемной силы равен:

$$F_n = P_b - P_g = dV_g (\rho_b - \rho_{нг}) g \quad (15)$$

где  $\rho_b, \rho_{нг}$  – плотности воздуха и нагретых газов,  $dV_g$  – объем газа через сечение колонки на заданной высоте от поверхности горения.

Исходя из формулы, связывающей величины плотностей воздуха и нагретых газов с их температурами при постоянном давлении

$$\frac{\rho_b}{\rho_{нг}} = \frac{T_{нг}}{T_b} \quad (16)$$

выражение (15) запишется в виде:

$$F_n = \left( \frac{T_{нг} - T_b}{T_b} \right) dV_g \rho_{нг} g \quad (17)$$

Величину температуры  $T_{нг}$  нагретых газов в тепловой колонке очага пожара можно оценить из соотношения [6]:

$$T_{нг} = T_b + \frac{Q_{пож}(1-\chi)}{c_p G} \quad (18)$$

где  $T_b$  – температура окружающей среды.

Тогда

$$F_n = \left( \frac{Q_{пож}(1-\chi)}{T_b c_p G} \right) dV_g \rho_{нг} g \quad (19)$$

где  $Q_{пож} = \eta \psi_{уд} Q_H S_n$  – интенсивность тепловыделения ( $\eta$  – коэффициент полноты горения,  $\psi_{уд}$  – удельная массовая скорость выгорания материала,  $Q_H$  – низшая рабочая теплота сгорания материала,  $S_n$  – площадь пожара),  $\chi$  – коэффициент теплопередачи в строительные конструкции,  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость нагретого газа,

$G = 0,21 \left[ \frac{g \rho_b^2 Q_{пож}(1-\chi)}{c_p T_b} \right]^{\frac{1}{3}} (y + y_0)^{\frac{5}{3}}$  – массовый расход газа через сечение колонки, отстоящей от поверхности горения на расстоянии  $y$ ,  $y_0 = 1,5 \sqrt{S_n}$  – расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горения.

Определим скорость частиц огнетушащего порошка в направлении оси газопорошковой струи, истекающей из

МПП, в зависимости от расстояния  $h$  от выходного отверстия МПП. Для этого запишем уравнение движения частиц порошка в слое ГПС объемом  $dV$  в заданный момент времени под действием сил, приложенных к нему

$$G_{gp}(t)\Delta t a = G_{gp}(t)\Delta t v_n \frac{dv_n}{dh} = \vec{F}_T + \vec{F}_a + \vec{F}_B + \vec{F}_n \quad (20)$$

где  $\Delta t$  – элементарный интервал времени выброса порошка,  $a$  – ускорение частиц порошка,  $v_n$  – скорость частиц порошка на расстоянии  $h$  от выходного отверстия МПП.

Подставляя в уравнение (20) найденные ранее зависимости для модулей сил, действующих на ансамбль частиц в объеме  $dV$ , получим с учетом  $\rho_n \gg \rho_{nr}$  и направлений действий этих сил следующее уравнение движения частиц порошка

$$v_n \frac{dv_n}{dh} = g - 133 \frac{\mu v_n}{\rho_{nr} d \varepsilon \sqrt{\varepsilon d_{отв}}} - 2,34 \frac{\rho_{nr} v_n^2}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon d_{отв}} \rho_n} - \frac{Q_{пож}(1-\chi)}{T_b c_p G(t)} g \quad (21)$$

Решение данного уравнения будем искать при начальном условии  $v_n(h=0) = v_0(t)$  ( $v_0(t) = v_{gp}(t)$  – скорость ансамбля частиц порошка на выходе МПП в заданный момент времени  $t$ ), и в предположении, что режим движения воздуха в свободных каналах порошковой среды – турбулентный. При данных условиях вместо (21) получим

$$v_n \frac{dv_n}{dh} = g - 2,34 \frac{\rho_{nr} v_n^2}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon d_{отв}} \rho_n} - \frac{Q_{пож}(1-\chi)}{T_b c_p G(t)} g \quad (22)$$

Для удобства решения перепишем (22) в виде

$$\frac{d(v_n^2)}{dh} = c - b v_n^2 \quad (23)$$

где  $c = 2g \left( 1 - \frac{Q_{пож}(1-\chi)}{T_b c_p G(t)} \right)$ ,  $b = 4,68 \frac{\rho_{nr}}{\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon d_{отв}} \rho_n}$

Решение (23) имеет вид:

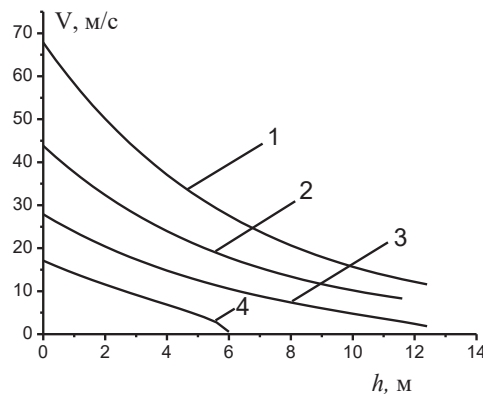
$$v_n = \left( cb^{-1} (1 - \text{Exp}[-bh]) + v_0^2(t) \text{Exp}[-bh] \right)^{1/2} \quad (24)$$

Полученное соотношение позволяет оценить скорость частиц порошка элементарного слоя ГПС, выброшенных из МПП в момент времени  $t$  с начальной скоростью  $v_0(t)$ , на различных расстояния  $h$  от выходного отверстия МПП при заданных пневмо-загрузочных параметрах МПП, известных дисперсных характеристиках частиц порошка и прогнозируемых энергетических параметрах пожара.

### Численные оценки скорости частиц огнетушащего порошка, выбрасываемого из МПП импульсного типа, в зависимости от расстояния от выходного отверстия МПП

На рисунке 2 изображено семейство кривых, описывающих зависимость скоростей частиц огнетушащего порошка, истекающих в различные моменты времени из МПП, от расстояния  $h$  от его выходного отверстия. Кривые построены для МПП марки МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 „Тунгус“ со следующими параметрами. Начальное давление в корпусе модуля  $P(t=0) = 2,2 \text{ МПа}$ . Диаметр выходного отверстия модуля  $d_{отв} = 36 \text{ мм}$ . Объем корпуса модуля  $W = (0,009 \pm 0,00045) \text{ м}^3$ . Объем модуля полностью заполнен порошком, масса которого равна  $m_p = (8,6 \pm 0,43) \text{ кг}$ . Насыпная плотность порошка, составляет  $\rho_{эф} = 955,55 \text{ кг/м}^3$ . Плотность частиц порошка равна  $\rho_n = 1920 \text{ кг/м}^3$ .

Модуль предназначен для тушения пожара с высоты 13 м. Мощность очага пожара, для которой производились расчеты, соответствовала мощности тестового очага пожара 55 В.



**Рисунок 2.** Зависимости скоростей частиц огнетушащего порошка от расстояния от выходного отверстия МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 „Тунгус“, выбрасываемых в различные моменты времени: 1.  $v_0(t=0) = 67,85 \text{ м/с}$ ; 2.  $v_0(t=0,25 \text{ с}) = 43,83 \text{ м/с}$ ; 3.  $v_0(t=0,6 \text{ с}) = 27,91 \text{ м/с}$ ; 4.  $v_0(t=0,8 \text{ с}) = 18,37 \text{ м/с}$ ;  $Q_{пож} = 4,25 \text{ МВт}$ ;  $c_p = 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $T_b = 20^\circ \text{C}$   $\varepsilon = 0,5$ ;  $\rho_{nr} = 1,1 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_n = 1920 \text{ кг/м}^3$

**Figure 2.** Relationship between the velocity of extinguishing powder particles and the distance from the nozzle МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 “Tungus” emitted at different time points: 1.  $v_0(t=0) = 67.85 \text{ m/s}$ ; 2.  $v_0(t=0.25 \text{ s}) = 43.83 \text{ m/s}$ ; 3.  $v_0(t=0.6 \text{ s}) = 27.91 \text{ m/s}$ ; 4.  $v_0(t=0.8 \text{ s}) = 18.37 \text{ m/s}$ ;  $Q_{пож} = 4.25 \text{ MW}$ ;  $c_p = 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_b = 20^\circ \text{C}$   $\varepsilon = 0.5$ ;  $\rho_{nr} = 1.1 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_n = 1920 \text{ kg/m}^3$

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

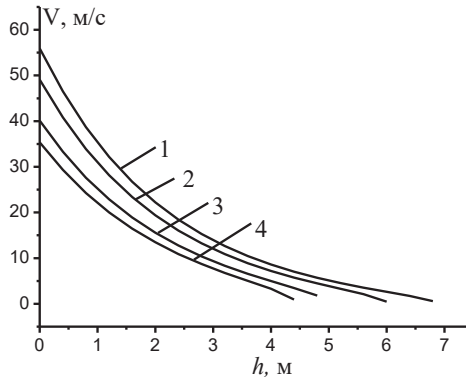
Их хода кривых следует, что практически вся масса огнетушащего порошка, за исключением незначительной части, выбрасываемой из модуля, начиная с 0,8 секунды

(кривая 4), достигнет плоскости очага пожара и будет участвовать в его тушении.



На рисунке 3 представлены зависимости, аналогичные изображенным на рисунке 2, но для случая истечения огнетушащего порошка из модуля МПП(н) 2,5 -КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг». Параметры модуля следующие. Начальное давление в корпусе модуля  $P(t=0)=(1,5\pm 0,1)$  МПа.

Диаметр выходного отверстия модуля  $d_{отв} = 12$  мм. Модуль загружен огнетушащим порошком с насыпной плотностью  $\rho_{эф} = 960$  кг/м<sup>3</sup>. Плотность частиц порошка равна  $\rho_{п} = 1920$  кг/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 3.** Зависимости скоростей частиц огнетушащего порошка от расстояния от выходного отверстия МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 „Миг”, выбрасываемых в различные моменты времени: 1.  $v_0(t=0) = 59,9$  м/с; 2.  $v_0(t=0,25) = 49,06$  м/с; 3.  $v_0(t=0,6) = 40,01$  м/с; 4.  $v_0(t=0,8) = 35,36$  м/с,  $Q_{пож} = 1$  МВт;  $c_p = 10^3$  Джкг<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>;  $T_B = 20^\circ\text{C}$   $\varepsilon = 0,5$ ;  $\rho_{нр} = 1,1$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{п} = 1920$  кг/м<sup>3</sup>

**Figure 3.** Relationship between the velocity of extinguishing powder particles and the distance from the nozzle МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 “Mig” emitted at different time points: 1.  $v_0(t=0) = 59.9$  m/s ; 2.  $v_0(t=0.25\text{ s}) = 49.06$  m/s; 3.  $v_0(t=0.6\text{ s}) = 40.01$  m/s; 4.  $v_0(t=0.8\text{ s}) = 35.36$  m/s,  $Q_{пож} = 1$  MW;  $c_p = 10^3$  Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>;  $T_B = 20^\circ\text{C}$   $\varepsilon = 0.5$ ;  $\rho_{нр} = 1.1$  kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{п} = 1920$  kg/m<sup>3</sup>

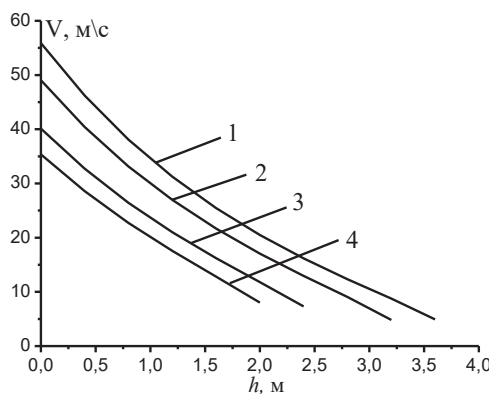
**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

Модуль предназначен для тушения пожара с высоты 2,5–3 м. Мощность очага пожара, для которой производились расчеты, соответствовала мощности тестового очага пожара 13 В.

Ход кривых данного рисунка свидетельствует о том, что вся масса выброшенного из модуля огнетушащего порошка будет участвовать в тушении очага пожара. В то же время,

как видно из рисунка 4, при тушении очага пожара мощностью  $Q_{пож} = 4,25$  МВт (тестовый очаг пожара 55 В) при той же высоте расположения модуля часть огнетушащего порошка, выбрасываемая из МПП после 0,6 с, не будет обладать достаточной скоростью, чтобы достичь очага возгорания. Данные частицы порошка будут выброшены из зоны горения конвективными тепловыми потоками нагретых газов.



**Рисунок 4.** Зависимости скоростей частиц огнетушащего порошка от расстояния от выходного отверстия МПП(н) 2,5 -КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг», выбрасываемых из модуля в различные моменты времени: 1.  $v_0(t=0) = 59,9$  м/с; 2.  $v_0(t=0,25) = 49,06$  м/с; 3.  $v_0(t=0,6) = 40,01$  м/с; 4.  $v_0(t=0,8) = 35,36$  м/с,  $Q_{пож} = 4,25$  МВт;  $c_p = 10^3$  Джкг<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>;  $T_B = 20^\circ\text{C}$   $\varepsilon = 0,5$ ;  $\rho_{нр} = 1,1$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{п} = 1920$  кг/м<sup>3</sup>

**Figure 4.** Relationship between the velocity of extinguishing powder particles and the distance from the nozzle МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 “Mig” emitted at different time points: 1.  $v_0(t=0) = 59.9$  m/s; 2.  $v_0(t=0.25) = 49.06$  m/s; 3.  $v_0(t=0.6) = 40.01$  m/s; 4.  $v_0(t=0.8) = 35.36$  m/s,  $Q_{пож} = 4.25$  MW;  $c_p = 10^3$  Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>;  $T_B = 20^\circ\text{C}$   $\varepsilon = 0.5$ ;  $\rho_{нр} = 1.1$  kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_{п} = 1920$  kg/m<sup>3</sup>

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

## Экспериментальное исследование динамики фронта огнетушащего порошка, вбрасываемого МПП импульсного типа в зону очага возгорания

Для оценки корреляции результатов теоретического анализа скорости движения частиц огнетушащего порошка в открытом пространстве над очагом пожара, полученных на основе предложенной математической модели движения порошковой смеси, с реальной ее динамикой на пути к очагу возгорания были проведены экспериментальные исследования скоростей фронтов ГПС, истекающих из МПП с различными техническими характеристиками.

Для проведения исследований использовались модули порошкового пожаротушения типа МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг» и МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 «Тунгус».

Модули жестко закреплялись на указанных в инструкции по эксплуатации высотах относительно поверхности расположения предполагаемых очагов пожара. Высота крепления модуля МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг» равна 3 м, а МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 «Тунгус» – 13 м.

Исследования проводились при температуре воздушной среды  $\sim 25^\circ\text{C}$ . Горизонтальная скорость воздушных потоков не превышала 7 м/с.

Тестовые очаги пожара класса 1 А ( $Q_{\text{пож}} \sim 0,250$  МВт) располагались по периметру защищаемой площади модулей согласно СТБ 11.13.19-2010 «Система стандартов

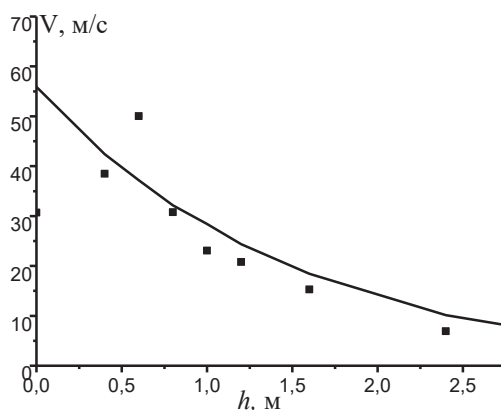
пожарной безопасности. Установки порошкового пожаротушения автоматические. Модули – общие технические требования. Методы испытаний».

Выходные клапана МПП открывались после времени горения штабелей, включая время горения используемого для поджога горючего в поддоне, равного 3 мин.

Процесс истечения ГПС из МПП регистрировался на скоростную видеокамеру «Olympus». В камере предусмотрены два режима работы. Видеозапись можно осуществлять с пространственным разрешением  $640 \times 480$  пикселей и 120 кадрами в секунду либо  $320 \times 240$  пикселей и 240 кадрами в секунду.

Обработка зарегистрированной информации велась покадрово. Каждый кадр видеозаписи переносился на бумажный носитель. По изображению кадра определялся масштаб съемки и путь, пройденный фронтом огнетушащего порошка. Для каждого кадра при выбранном режиме записи определялась средняя скорость фронта ГПС на зарегистрированных участках пути от выхода из МПП до очага пожара.

Результаты экспериментального исследования зависимости скорости фронта ГПС для МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг» от расстояния от выходного отверстия модуля представлены на рисунке 5 в виде кривой, отображаемой экспериментальными точками. Запись процесса движения фронта огнетушащего порошка к очагу пожара осуществлялась со скоростью 240 кадров в секунду и пространственным разрешением  $320 \times 240$  пикселей.



**Рисунок 5.** Зависимость скорости фронта ГПС от расстояния от выхода из МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг»:  $v_0(t=0) = 55,9$  м/с;  $Q_{\text{пож}} = 0,25$  МВт;  $c_p = 10^3$  Джкг $^{-1}$ К $^{-1}$ ;  $T_b = 20^\circ\text{C}$   $\varepsilon = 0,5$ ;  $\rho_{\text{нр}} = 1,1$  кг/м $^3$ ;  $\rho_{\text{п}} = 1920$  кг/м $^3$

**Figure 5.** Relationship between the velocity of the GPM (gas-powder mixture) front velocity and the distance from the nozzle МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 «Миг»:  $v_0(t=0) = 55,9$  m/s;  $Q_{\text{пож}} = 0,25$  MW;  $c_p = 10^3$  Jkg $^{-1}$ K $^{-1}$ ;  $T_b = 20^\circ\text{C}$   $\varepsilon = 0,5$ ;  $\rho_{\text{нр}} = 1,1$  kg/m $^3$ ;  $\rho_{\text{п}} = 1920$  kg/m $^3$

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

Сплошная кривая на этом рисунке отображает расчетную зависимость скорости фронта огнетушащего порошка от пройденного расстояния.

Мощность пожара при расчетах принималась равной  $Q_{\text{пож}} \sim 0,250$  МВт.

Из хода построенных кривых видно удовлетворительное согласие во второй половине пути движения фронта

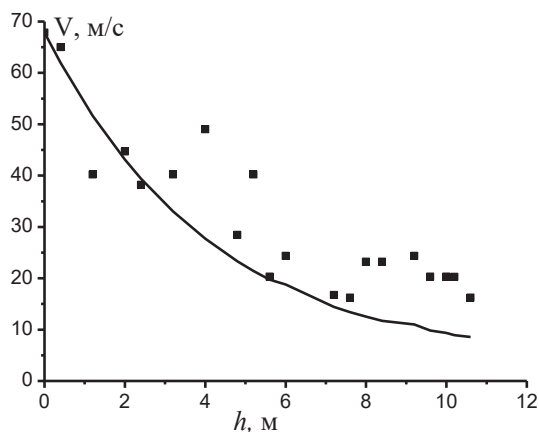
ГПС к очагу пожара расчетных величин его скоростей с измеренными значениями. Отсутствие корреляции рассчитанных и измеренных скоростей фронта ГПС на начальном этапе движения к очагу пожара и наличие максимума скорости в экспериментальной кривой можно объяснить особенностями формирования струи ГПС используемым в эксперименте типом МПП. Выпуск огнетушащего порошка из



МПП(н) 2,5-КД1-Б2-3-УХЛ1-141 „Миг” осуществлялся в результате разрушения теплового замка запорно-пускового устройства при достижении установленной температуры разрушения. Поток газопорошковой смеси на расстоянии 40 мм от выходного отверстия попадает на перпендикулярно ориентированный к направлению движения частиц порошка плоский распылитель. В результате неупругого соударения с ним начальная скорость частиц огнетушащего порошка резко падает. Часть потока частиц, отраженных от распылителя в направлении, обратном начальному, взаимодействует с частицами порошка исходного потока. В результате взаимодействия часть частиц исходного потока отклоняется от начального направления и проходит мимо распылителя по направлению к очагу пожара. Вследствие снижения скорости частиц порошка сопротивление воздуха, которое пропорционально квадрату их скорости,

будет незначительно тормозить их движение. Скорость частиц огнетушащего порошка при этом будет расти под действием силы тяжести. При возрастании скорости частиц начнет увеличиваться сопротивление воздуха, что приведет в совокупности с действием восходящих тепловых потоков пожара к снижению их скорости при дальнейшем движении к очагу пожара. Рассмотренные процессы объясняют малую скорость частиц огнетушащего порошка в начале пути их движения и появление максимума скорости на некотором расстоянии от выходного отверстия МПП.

На рисунке 6 отображены зависимости скорости фронта огнетушащего порошка, выбрасываемого из МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 „Тунгус”, от пути, пройденного от выходного отверстия МПП. Модуль крепился на высоте 13 м от поверхности расположения тестовых очагов пожара класса 1А.



**Рисунок 6.** Зависимость скорости фронта ГПС от расстояния от выхода из модуля МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 „Тунгус”:

$$v_0(t=0) = 67,85 \text{ м/с}; Q_{\text{пож}} = 0,25 \text{ МВт}; c_p = 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}^{-1}; T_B = 20^\circ\text{C} \quad \varepsilon = 0,5; \rho_{\text{гр}} = 1,1 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{п}} = 1920 \text{ кг/м}^3$$

**Figure 6.** Relationship between GPM (gas-powder mixture) front velocity and the distance from the exit of nozzle МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6

“Tungus”:  $v_0(t=0) = 67.85 \text{ m/s}; Q_{\text{пож}} = 0.25 \text{ MW}; c_p = 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}^{-1}; T_B = 20^\circ\text{C} \quad \varepsilon = 0.5; \rho_{\text{гр}} = 1.1 \text{ kg/m}^3; \rho_{\text{п}} = 1920 \text{ kg/m}^3$

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

Сплошная кривая на рисунке отображает расчетную динамику изменения скорости фронта ГПС, а дискретная кривая построена по результатам измерения этой скорости на различных расстояниях от МПП.

Мощность пожара при расчетах принималась равной  $Q_{\text{пож}} \sim 0,250 \text{ МВт}$ . Запись процесса движения фронта огнетушащего порошка к очагу пожара осуществлялась со скоростью 120 кадров в секунду и пространственным разрешением  $640 \times 480$  пикселей.

Сопоставление результатов теоретических оценок скорости фронта ГПС на различных удалениях от выходного отверстия МПП и полученных экспериментальных способом свидетельствуют о их качественном соответствии.

Наблюдаемое различие между оценочными и измеренными значениями скорости фронта ГПС в рассматриваемом примере тушения пожара МПП типа МПП(н)9-КД1-Б2-ГЭ-У2-1/6 «Тунгус» можно объяснить двумя причинами. Во-первых, несовершенством предложенной

теоретической модели движения ГПС к очагу пожара, которая не учитывает изменение (увеличение) эквивалентного диаметра струи при удалении от модуля. Учет данного фактора особенно важен при высотном тушении пожара, как в рассматриваемом случае. Другой причиной расхождения результатов экспериментальной и теоретической оценки скоростей фронта ГПС является большая погрешность в данном эксперименте графического способа определения скорости фронта ГПС.

## Выводы

Разработана математическая модель динамики газопорошковой смеси в открытом пространстве на пути к поверхности горения при заданных эксплуатационных характеристиках МПП и энергетических параметрах пожара;

Получено соотношение для оценки скорости частиц огнетушащего порошка на различных расстояниях от

выходного отверстия МПП при движении их к очагу пожара заданной мощности.

Полученные результаты могут быть использованы при проведении испытаний МПП импульсного типа для оценки пространственно-энергетических параметров очагов пожара, которые могут быть ими потушены, а также в задачах проектировании МУПП для определения пневмо-загрузочных параметров МПП по известным техническим характеристикам применяемого огнетушащего вещества, предполагаемым значениям мощности очага пожара и высоты расположения МПП.

## Литература

- [1] Kulyavtsev E.Y., Kazantsev V.R., Kuimov R.I., *Modeling of gas-dynamic processes actuation dry chemical extinguishing module using analogy droplet liquid-pseudoliquid*, "Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promichlenosti" 2013, 11, 76–82.
- [2] Kazantsev V.R., Ovcharenko E.A., Kulyavtsev E.Y., Sipin E.V., Tupkin N. U., *Modeling of the two-phase gas-powder mixture through the expiration of the short nozzles considering the high solids content in the gas phase*, "Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promichlenosti" 2015, 1, 31–35.
- [3] Kulyavtsev E.Y., Kazantsev V.R., Ovcharenko A.G., Petrov E.A., *Some features of the application of powder extinguishing modules*, "Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promichlenosti" 2012, 1, 74–82.
- [4] Kasatkin A.G., *The main processes and devices of chemical technologies*, 6-edition, Goschemizdat, Moskva 1975.
- [5] Stabnikov V.N., *Processes and devices of food manufactures*, Agropromizdat, Moskva 1985.
- [6] Koshmarov U.A., *Prediction of fire hazards in the room*, Academy of GPS MVD Russia, Moskva 2000.

**КИЦАК АНАТОЛИЙ ИЛЬИЧ** – ведущий научный сотрудник отдела исследований автоматических средств обнаружения и ликвидации чрезвычайных ситуаций НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси, кандидат физико-математических наук. Область интересов: физическая оптика, лазерная физика, когерентная и нелинейная оптика, радиофизика, теплофизика.