

Памяти Игоря Александровича Корольченко

Определение условий самовозгорания отложений горючих пылей на оборудовании, в вентиляционных системах и аспирационных установках зданий и сооружений

© Л.П. Вогман¹, Д.А. Корольченко², А.В. Хрюкин³✉

- 1 Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИПО, 12)
- 2 Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)
- 3 Специальное управление ФПС № 37 МЧС России (Россия, 394006, г. Воронеж, ул. Бахметьева, 1а)

АННОТАЦИЯ

Введение. Определение научно обоснованной периодичности очистки воздухопроводов местных отсосов производственных зданий и сооружений является одной из задач в области пожаробезопасности промышленных производств. В работе представлены расчетные методы, в частности метод определения периода индукции при самовозгорании отложений пыли в воздухопроводах вентиляционных систем и на оборудовании, который может быть использован при решении задач, направленных на разработку профилактических мероприятий, обеспечивающих их пожаровзрывобезопасность.

Методы. Для решения поставленной в настоящей работе цели и сопоставления показателей, полученных в расчетно-аналитической части исследований, с динамикой роста отложений на реальных объектах были выполнены натурные испытания, которые проводились на производственных объектах мукомольного комбината ОАО МК «Воронежский» и АО «Концерн «Созвездие».

Результаты и их обсуждение. Сроки очистки от отложений вентиляционного (аспирационного) оборудования зданий и сооружений не могут быть универсальными для различных производств и должны учитывать динамику роста отложений в зависимости от специфики горючих отложений, загруженности производственных мощностей объекта защиты в тот или иной промежуток времени и условий эксплуатации оборудования. В результате проведения экспериментов было установлено, что места максимальных скоплений отложений чаще всего формируются на поверхностях соединений и на перегибах трубопроводов вентиляционных систем. Расчетно-аналитическим путем исследованы условия самовозгорания горючей пыли в зависимости от таких характеристик технологического процесса, как скорость движения потока пылевоздушной смеси в воздуховоде, а также диаметр поперечного сечения воздуховода.

Выводы. Построенные на основании выполненных исследований номограммы могут быть использованы для определения кратности очистки от горючих пылей оборудования и воздухопроводов систем промышленной вентиляции. В работе представлен расчет периода индукции самовозгорания отложений горючей пыли на примере ржаной муки при несимметричном теплообмене. Его значение обусловлено процессом накопления отложений горючей пыли до критической по условиям самовозгорания толщины.

Ключевые слова: пожарная безопасность; критические условия; кратность очистки оборудования; натурные исследования; период индукции

Для цитирования: Вогман Л.П., Корольченко Д.А., Хрюкин А.В. Определение условий самовозгорания отложений горючих пылей на оборудовании, в вентиляционных системах и аспирационных установках зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 4. С. 32–41. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.32-41

✉ Хрюкин Алексей Владимирович, e-mail: 79081404888@ya.ru

In memory of Igor A. Korolchenko

Determination of conditions for spontaneous combustion of combustible dust deposits on equipment, in ventilation systems, and aspiration systems of buildings and structures

© Leonid P. Vogman¹, Dmitriy A. Korolchenko², Aleksey V. Khryukin³✉

- 1 All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Balashiha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

- 2 Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)
- 3 Federal State Public Institutions "Special Department of the Federal Fire Service No. 37 of Emercom of Russia" (Bakhmetyeva St., 1a, Voronezh, 394006, Russian Federation)

ANNOTATION

Introduction. Determination of the scientifically substantiated frequency of cleaning the ducts of local exhausts of industrial buildings and structures is one of the tasks in the field of fire safety of industrial enterprises. The paper describes design methods, in particular, a method for determination of the induction period during spontaneous combustion of dust deposits in air ducts of ventilation systems and equipment, which can be used in solving problems focused on the development of preventive measures to ensure their fire and explosion safety.

Methods. In order to solve the problem set in this paper and compare the indicators obtained in the calculation and analytical part of the studies with the growth dynamics of deposits in real facilities, field tests have been accomplished in the production facilities of the flour mill of OJSC MK "Voronezhsky" and JSC Concern "Sozvezdiye".

Results and discussion. The timeframes for cleaning of deposits on ventilation (aspiration) equipment of buildings and structures cannot be universal for various industries and must take into account the dynamics of the growth of deposits depending on the specifics of combustible deposits, the workload of the production facilities of the protected object in a given period of time, and the operating conditions of the equipment. As a result of the experiments, it was found that the places of maximum accumulations of deposits are most often formed on the surfaces of joints and on the bends of pipelines of ventilation systems. The conditions of spontaneous combustion of combustible dust are studied by calculation and analytical method, depending on such process characteristics as the speed of the dust-air mixture flow in the duct, as well as the diameter of the duct's cross section.

Conclusions. The nomograms built on the basis of the studies performed can be used to determine the multiplicity of cleaning of combustible dusts of equipment and air ducts of industrial ventilation systems. The paper provides a calculation of the period of induction of spontaneous combustion of combustible dust deposits using the example of rye flour with asymmetric heat transfer. Its significance is due to the process of accumulation of deposits of combustible dust to a critical thickness in terms of spontaneous combustion conditions.

Keywords: fire safety; critical conditions; cleaning time frame of equipment; field research; induction period

For citation: Vogman L.P., Korolchenko D.A., Khryukin A.V. Determination of conditions for spontaneous combustion of combustible dust deposits on equipment, in ventilation systems, and aspiration systems of buildings and structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):32-41. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.32-41 (rus.).

✉ Aleksey Vladimirovich Khryukin, e-mail address: 79081404888@ya.ru

Введение

Исследованию процессов теплового самовозгорания посвящено много работ у нас в стране [1–7] и за рубежом [8–15]. Существенно меньше внимания уделяется условиям самовозгорания пылей в вентиляционных системах. Однако статистические данные по пожарам, возникшим по причине самовозгорания [16, 17], свидетельствуют о том, что задача обеспечения пожарной безопасности систем вентиляции в производственных зданиях и сооружениях и, в частности, предприятиях по хранению и переработке растительного сырья является весьма актуальной.

Пожары в вентиляционном оборудовании происходят скрытно (накопление горючих отложений в воздуховодах и в оборудовании визуально не наблюдается), горение по отложениям осуществляется быстро и может распространяться на соседнее оборудование, а иногда сопровождаться взрывами газо-, паро-, пылевоздушных смесей с горючими отложениями, образующихся в технологическом оборудовании. Подобные пожары могут развиваться в результате самовозгорания отложений внутри воздуховодов.

К условию, способствующему распространению горения в системах местных отсосов, относится способ компоновки и монтажа оборудования, связывающий между собой отдельные аппараты. Внедрение экологически чистых и безотходных технологий с частично или полностью замкнутым циклом работы технологического оборудования и с применением систем фильтрации, улавливания, обезвреживания и утилизации промышленных выбросов приводит к объединению большого количества аппаратов в единое целое. Это, в свою очередь, благоприятствует условиям образования в них отложений по всей длине коммуникаций и расположенного в технологической цепи оборудования и строительных конструкций. Развитая сеть воздуховодов местных отсосов, объединяющая в единую систему несколько единиц различного оборудования, создает при возникновении пожара благоприятные условия для быстрого и скрытого распространения горения по поверхности отложений на смежное оборудование и строительные конструкции производственного здания, сооружения.

Наличие в оборудовании труднодоступных участков (мест) усложняет проведение профилактических работ по своевременной и качественной

очистке от горючих отложений, препятствует эффективному тушению пожара.

По мере роста слоя отложений в воздуховодах и в оборудовании создаются условия для воспламенения горючего слоя при появлении источника зажигания (например, нагретых до температуры самовозгорания отложений) и распространения пламени по поверхности отложений и (или) в паро-, пылевоздушной смеси.

Основным направлением в обеспечении пожаровзрывобезопасности технологического оборудования местных отсосов с горючими отложениями является предупреждение образования предельно допустимой по условиям самовозгорания толщины слоя горючих отложений. Это направление по профилактике пожаров и взрывов в системах местных отсосов может быть реализовано путем своевременной очистки оборудования при обоснованном графике работ.

Определение научно обоснованной периодичности очистки воздуховодов местных отсосов производственных зданий и сооружений является одной из задач настоящей работы.

Ранее авторами исследовался процесс распространения горения при самовозгорании отложений горючих жидкостей в вентиляционных системах в условиях несимметричного теплообмена слоя материала [18].

Настоящая работа выполнена в целях апробации новых расчетных методов исследования при решении задач по разработке профилактических мероприятий, обеспечивающих пожарную безопасность воздуховодов вентиляционных систем при эвакуации горючей пыли.

Расчетно-аналитические исследования условий самовозгорания отложений горючих пылей в воздуховодах систем вентиляции

Натурные испытания динамики роста отложений на реальных объектах. Для достижения поставленной в настоящей работе цели и сопоставления показателей, полученных в расчетно-анали-

тической части исследований, с динамикой роста отложений на реальных объектах были выполнены натурные испытания, которые проводились на производственных объектах мукомольного комбината ОАО МК «Воронежский» и АО «Концерн «Созвездие»» в течение полугода с ежемесячным отбором накоплений горючей пыли при штатном (безаварийном) режиме эксплуатации воздуховодов систем вентиляции [19, 20].

Механизм определения динамики роста отложений заключался в первоначальной очистке от отложений выбранного для проведения эксперимента участка оборудования и затем в ежемесячном, в течение полугода, контроле роста количества отложений весовым методом и с помощью устройства, предназначенного для определения толщины слоя отложений, — толщиномера.

Очистка систем вентиляции от отложений производилась после полной или частичной разборки звеньев воздуховодов, местных отсосов, элементов пылеочистительных устройств и вентиляторов.

Наиболее оптимальными методами являлись демонтаж и полная разборка элементов системы вентиляции на участке контроля для проведения очистки с последующей сборкой. Порядок разборки и сборки вентиляционных систем определялся на основании рабочей документации на оборудование с обязательным контролем целостности поверхностей воздуховодов, устойчивости крепления всех элементов системы, визуальным осмотром состояния мест соединений и креплений.

В результате проведения экспериментов было установлено, что места максимальных скоплений отложений чаще всего формируются на поверхностях соединений и на перегибах трубопроводов вентиляционных систем (рис. 1).

Очистка участка осуществлялась вплоть до полного удаления слоя отложений, образовавшихся в течение предыдущего контрольного периода.

В результате натурных испытаний установлено, что пыленакопление при высокой организации труда в штатном режиме эксплуатации оборудова-



Рис. 1. Процесс очистки перегиба трубопровода системы местных отсосов оборудования по обработке полимерных материалов АО «Концерн «Созвездие»» (отвод 45°, D190)

Fig. 1. Bend cleaning process in the pipeline system of local exhaust equipment for processing of polymer materials in JSC Concern «Sozvezdiye» (tap 45°, D190)

ния и систем вентиляции в легкодоступных местах идет с весьма низкой интенсивностью. В труднодоступных местах, особенно в воздуховодах систем вентиляции, этот процесс более заметен, но и в таких местах при ежемесячном наблюдении толщина отложений не превышала 0,001 м [19, 20]. На производственных объектах АО «Концерн “Созвездие”» эта величина была немного выше и составила 0,002 м. Столь невысокое значение максимальной толщины отложений обуславливается применением на данных объектах современного производственного оборудования, в том числе и с развитой системой фильтрации.

В табл. 1 представлены результаты проведенных натурных исследований по определению скорости роста отложений в воздуховодах и на малодоступных местах криволинейных участков воздуховодов, а также в оборудовании при наиболее интенсивных условиях эксплуатации на производственных объектах мукомольного комбината ОАО МК «Воронежский» и АО «Концерн “Созвездие”».

Как следует из табл. 1, увеличение толщины слоя отложений пылей на производственных объектах мукомольного комбината ОАО МК «Воронежский» и АО «Концерн “Созвездие”» ежемесячно происходило приблизительно на одинаковую величину. Этот факт объясняется равномерной загруженностью производственных мощностей предприятий в течение полугодия. В других исследованиях [18] результаты измерений в течение длительного периода роста горючих отложений были иными. Следовательно, сроки очистки от отложений вентиляционного (аспирационного) оборудования зданий и сооружений не могут быть универсальными для различных производств и должны учитывать динамику роста отложений в зависимости от специфики горючих отложений, загруженности производственных мощностей объекта защиты в тот или иной промежуток времени и условий эксплуатации оборудования.

Условия теплового самовозгорания отложений горючей пыли. Определение периода индукции до самовозгорания в оборудовании. Полученные

Таблица 1. Результаты натурных исследований

Table 1. Field studies results

Объект контроля Controlled facility	Максимальная толщина слоя отложений, мм, по месяцам The maximum thickness of the layer of deposits, mm					
	Июль July	Август August	Сентябрь September	Октябрь October	Ноябрь November	Декабрь December
Перегиб трубопровода аспирационной системы размольного отделения ОАО МК «Воронежский» (отвод 90°, D160) Bent of the pipeline of the aspiration system in the grinding circuit of OJSC MK “Voronezhsky” (tap 90°, D160)	0,17	0,18	0,18	0,17	0,19	0,19
Перегиб трубопровода системы местных отсосов оборудования по обработке полимерных материалов АО «Концерн “Созвездие”» (отвод 45°, D160) Bend of the pipeline system of local exhaust equipment for processing of polymer materials in JSC Concern “Sozvezdiye” (tap 45°, D160)	1,47	1,62	1,53	1,58	1,63	1,59
Поверхность воздуховода, обращенного к потолку (размольное отделение ОАО МК «Воронежский») Surface of the duct facing the ceiling (grinding circuit of OJSC MK “Voronezhskiy”)	0,11	0,1	0,11	0,1	0,12	0,12
Поверхность воздуховода, обращенного к потолку (оборудование по обработке полимерных материалов АО «Концерн “Созвездие”») Surface of the duct facing the ceiling (equipment for processing of polymer materials in JSC Concern “Sozvezdiye”)	0,71	0,62	0,63	0,63	0,67	0,61

при использовании данных натурных испытаний результаты сопоставлялись с данными расчета критических значений условий самовозгорания с учетом толщины слоя отложений, периода индукции, температуры среды внутри воздуховода в зависимости от диаметра воздуховода и скорости потока горючей среды. Такое сопоставление позволило сделать вывод о том, что полученные в расчетах данные являются обоснованными, им можно доверять. Построенные на основании выполненных исследований номограммы могут быть использованы для определения кратности очистки от горючих пылей оборудования и воздухопроводов систем промышленной вентиляции.

Пример алгоритма решения задачи по определению условий теплового самовозгорания отложений толщиной h на поверхности технологического оборудования (электродвигателя) представлен в [19].

Ниже приведены зависимости, построенные по результатам расчетов условий самовозгорания отложений ржаной муки, которые можно использовать в качестве номограмм для прогнозирования условий самовозгорания отложений в зависимости от температуры, скорости движения потока в воздуховодах и их диаметра, а также для установления кратности очистки оборудования, вентиляционных систем и аспирационных установок (рис. 2-4).

Ниже представлен расчет периода индукции самовозгорания отложений горючей пыли на примере ржаной муки при несимметричном теплообмене с использованием методики [2]. Следует отметить, что расчет времени индукции производится в том случае, если температура окружающей среды больше критической.

В качестве примера рассмотрим расчет периода индукции для образцов отложений ржаной муки слоем 0,05 м внутри технологического оборудования при аварийном режиме работы (в результате замыкания обмоток электродвигателя произошло повышение температуры газовой среды внутри технологического оборудования аспирационной установки до 515 К).

Исходными данными для расчета являются:

- температура среды, в которой образуются отложения, $T_{\text{ср}} = 515 \text{ K}$;
- критическая температура самовозгорания для отложения заданной толщины $T_{\text{кр}} = 502,9 \text{ K}$ (методика расчета критической температуры самовозгорания для отложений ржаной муки толщиной 0,05 м представлена в [19]);
- фактор формы отложения материала j рассчитывается или принимается из [2]. В нашем случае в результате произведенных расчетов $j = 0,23$ для отложений в аспирационной уста-

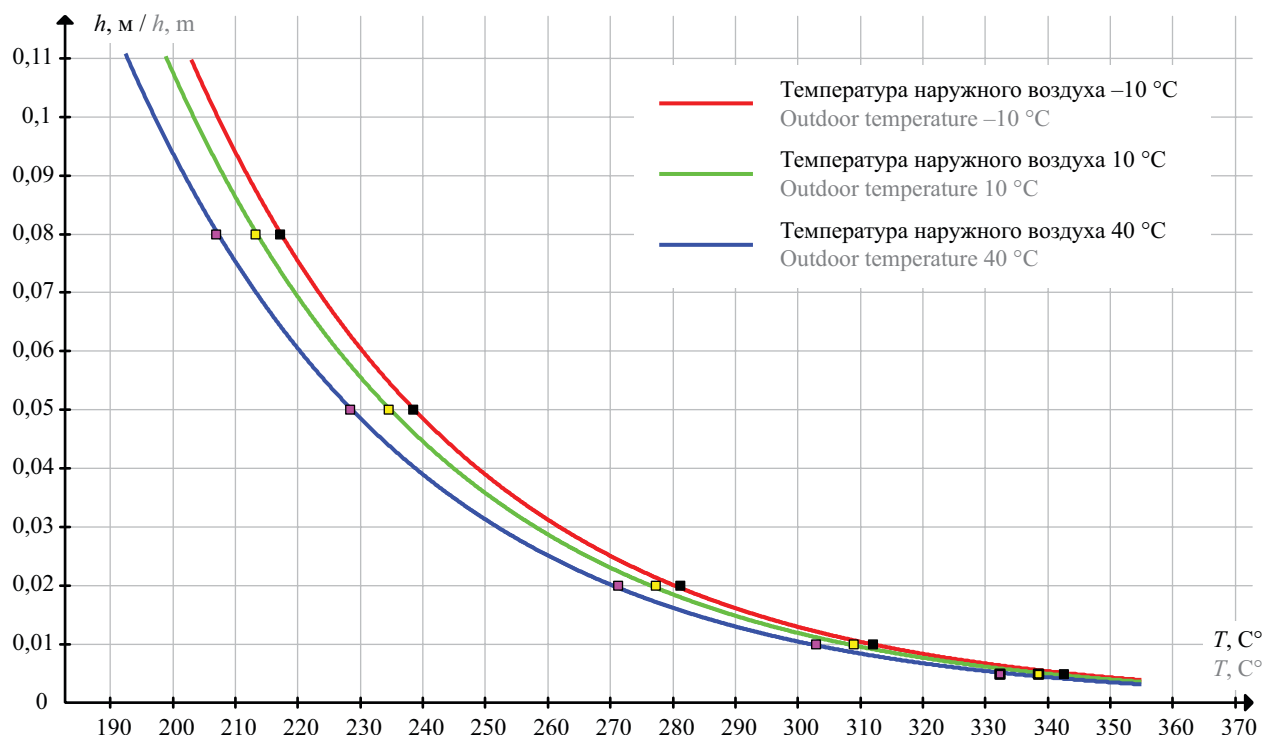


Рис. 2. Влияние критической температуры среды в воздуховоде T , °C, на толщину отложения h , м (ржаная мука, внутренний диаметр воздуховода $D = 0,16$ м, скорость движения среды в воздуховоде $V = 8$ м/с)

Fig. 2. Influence of the critical temperature of the medium in the duct T , °C to deposit thickness h , m (rye flour, internal diameter of the duct $D = 0.16$ m, the speed of the medium in the duct $V = 8$ m/sec)

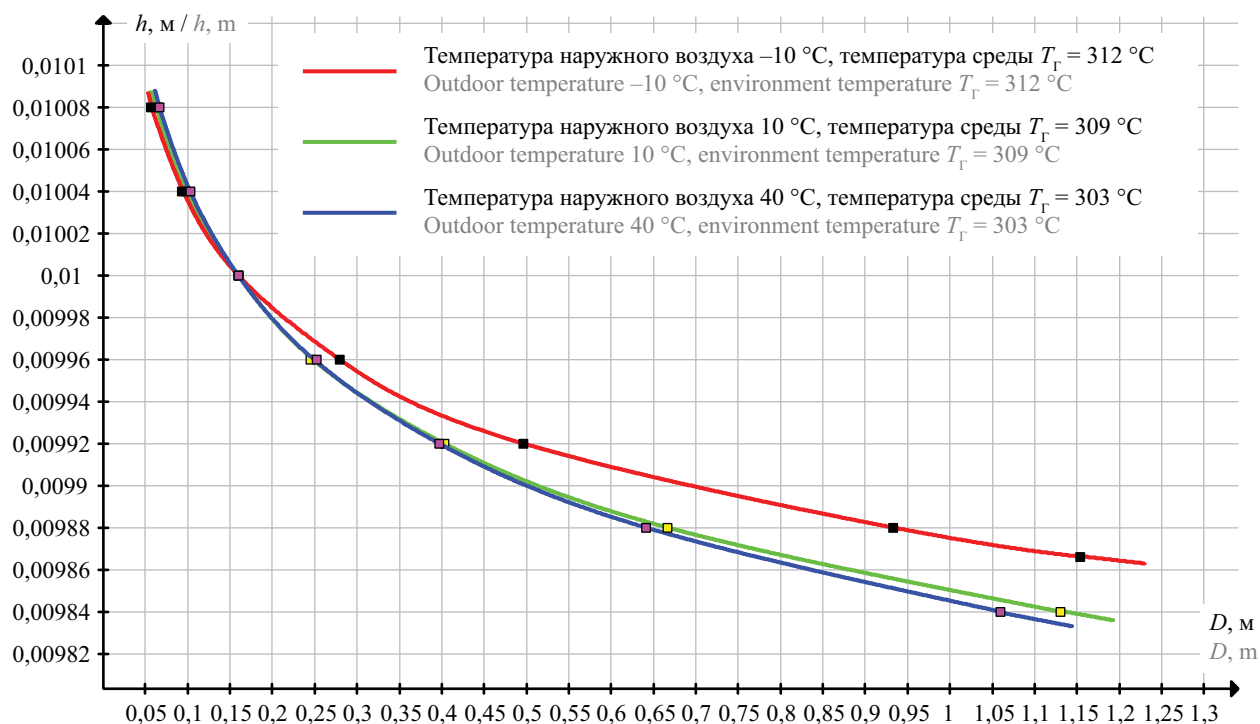


Рис. 3. Влияние диаметра сечения воздуховода D , м, на критическую толщину отложения h , м (ржаная мука, скорость движения среды в воздуховоде $V = 8$ м/с)

Fig. 3. Influence of the duct diameter D , m, on critical deposit thickness h , m (rye flour, the speed of the medium in the duct $V = 8$ m/sec)

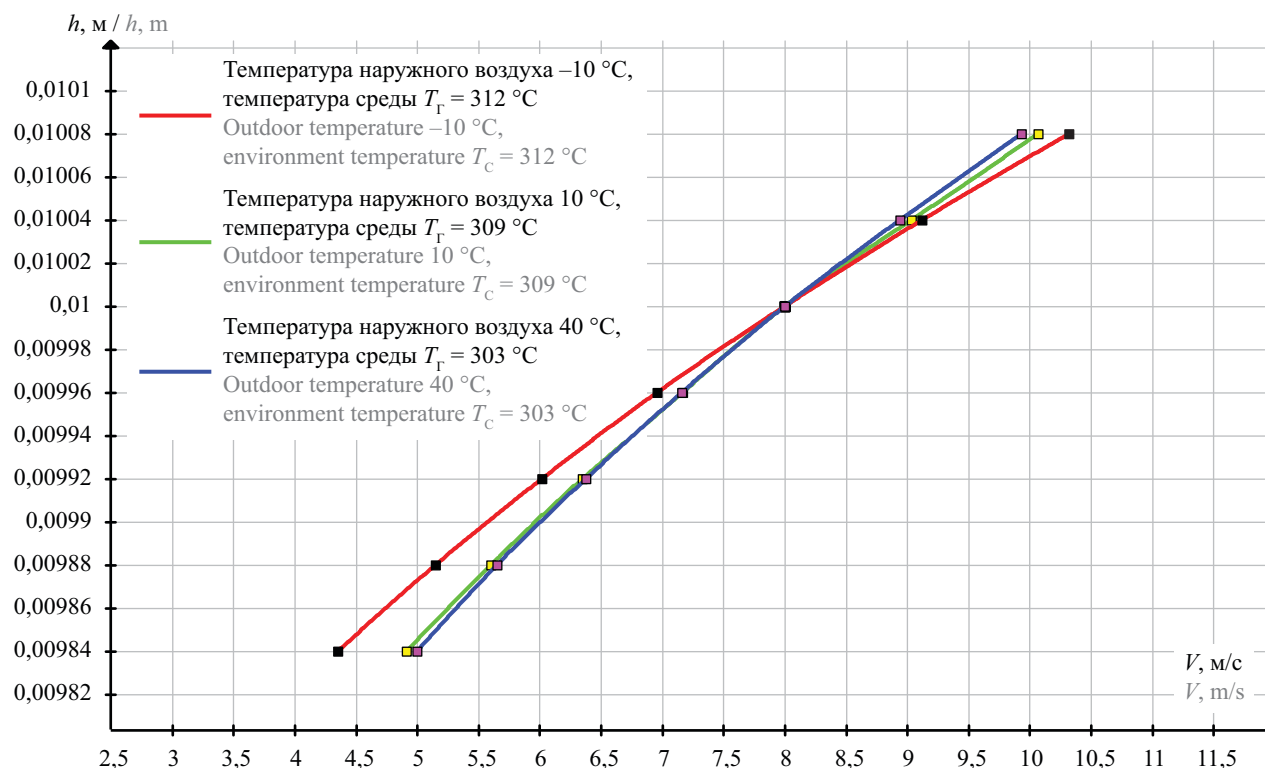


Рис. 4. Влияние скорости потока среды в воздуховоде V , м/с, на критическую толщину отложения h , м (ржаная мука, внутренний диаметр воздуховода $D = 0,16$ м)

Fig. 4. Influence of the flow rate of the medium in the duct V , m/sec, on critical deposit thickness h , m (rye flour, duct internal diameter $D = 0.16$ m)

новке в форме параллелепипеда шириной 0,8 м, длиной 1,2 м и высотой 0,05 м;

- толщина отложений — $D = 0,05$ м;
- плотность материала (плотность ржаной муки) — $\rho = 655$ кг/м³;
- коэффициент теплопроводности материала — $\lambda = 0,152$ Вт/(м·К);
- теплоемкость исследуемого материала — $c = 1050$ Дж/кг·К;
- теплота реакции — $Q = 1,67 \cdot 10^7$ Дж/кг;
- энергия активации реакции процесса термоокисления рассматриваемых отложений — $E = 88\,054$ Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель — $Qk_0/\lambda = 6,55 \cdot 10^{11}$ м·К/кг.

Последовательность расчета сводится к следующему:

1. По температуре $T_{\text{ср}}$ вычисляются параметры β и γ :

$$\beta = \frac{RT_{\text{ср}}}{E} = \frac{8,314 \cdot 515}{88\,054} = 0,049;$$

$$\gamma = \frac{cRT_{\text{ср}}^2}{QE} = \frac{1050 \cdot 8,314 \cdot 515^2}{1,67 \cdot 10^7 \cdot 88\,054} = 0,0016.$$

2. С помощью уравнений определяется коэффициент теплоотдачи α :

$$\begin{aligned} Ra &= 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{T_{\text{ср}}}} D^3 \frac{RT_{\text{ср}}}{E} = \\ &= 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{540}} 0,05^3 \frac{8,314 \cdot 515}{88\,054} = 20\,676,9; \\ \alpha &= 0,54 Ra^{0,25} \frac{\lambda_{\text{в}}}{D} + 4\sigma T_{\text{ср}}^3 = \\ &= 0,54 \cdot 20\,676,9^{0,25} \frac{0,042}{0,05} + 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 515^3 = \\ &= 31,52 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \end{aligned}$$

где теплопроводность воздуха рассчитана по формуле:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{в}} &= 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{\text{ср}} = \\ &= 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot 515 = 0,04 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

3. Вычисляется по формуле критерий Био, соответствующий размеру и коэффициенту теплоотдачи для рассматриваемого образца:

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda_{\text{в}}} = \frac{31,52 \cdot 0,025}{0,04} = 19,7,$$

где r — половина расчетного диаметра, м.

4. Рассчитывается параметр Франк-Каменецкого δ , соответствующий температуре $T_{\text{ср}}$, и параметр $\delta_{\text{кр}}$ для критической температуры $T_{\text{кр}}$.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_{\text{ср}}^2} r^2 e^{\frac{E}{RT_{\text{ср}}}} = \\ &= 6,55 \cdot 10^{11} \cdot 655 \frac{88\,054}{8,314 \cdot 515^2} \times \\ &\times 0,025^2 e^{\frac{88\,054}{8,314 \cdot 515}} = 12,54; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_{\text{кр}}^2} r^2 e^{\frac{E}{RT_{\text{кр}}}} &= \\ &= 6,55 \cdot 10^{11} \cdot 655 \frac{88\,054}{8,314 \cdot 502,9^2} \times \\ &\times 0,025^2 e^{\frac{88\,054}{8,314 \cdot 502,9}} = 8,02. \end{aligned}$$

5. Вычисляется относительное удаление от предела воспламенения:

$$\Delta = \frac{\delta}{\delta_{\text{кр}}} = \frac{12,54}{8,02} = 1,56$$

и функции

$$\begin{aligned} f_1(\Delta, \gamma) &= 1 + 0,62 \cdot \frac{1 - 4 \cdot \Delta^{-2} \sqrt{\gamma}}{(\Delta - 0,95)^{0,9}} = \\ &= 1 + 0,62 \cdot \frac{1 - 4 \cdot 1,56^{-2} \sqrt{0,0016}}{(1,56 - 0,95)^{0,9}} = 1,904; \\ f_2(j, Bi, \Delta) &= 1 - \frac{[1 + 1,5 \cdot (1 - 0,1 \cdot \Delta) \cdot j] Bi}{16 \cdot (1 + Bi)} = \\ &= 1 - \frac{[1 + 1,5 \cdot (1 - 0,1 \cdot 1,56) \cdot 0,23] \cdot 19,7}{16 \cdot (1 + 19,7)} = 0,923. \end{aligned}$$

6. Рассчитывается безразмерное время индукции по выражению:

$$\begin{aligned} \tau &= f_1(\Delta, \gamma) \cdot f_2(j, Bi, \Delta) (1 + 2\beta) = \\ &= 1,904 \cdot 0,923 (1 + 2 \cdot 0,049) = 1,93. \end{aligned}$$

7. Определяется размерное время индукции $t_{\text{и}}$, с, по формуле:

$$\begin{aligned} t_{\text{и}} &= \frac{\tau \cdot c \cdot RT_{\text{ср}}^2}{Qk_0 E} e^{\frac{E}{RT_{\text{ср}}}} = \\ &= \frac{1,93 \cdot 1050 \cdot 8,314 \cdot 515^2}{6,55 \cdot 10^{11} \cdot 0,152 \cdot 88\,054} e^{\frac{88\,054}{8,314 \cdot 515}} = \\ &= 435 \text{ с} = 7,25 \text{ мин}. \end{aligned}$$

Таким образом, период индукции для отложений ржаной муки слоем 0,05 м в случае возникновения аварии и повышения температуры газовой среды $T_{\text{кр}}$ внутри технологического оборудова-

ния аспирационной установки до 515 К составит 7,25 мин.

Данную методику можно использовать для расчета периода индукции для различных (по форме, толщине, составу) отложений горючей пыли в оборудовании и в воздуховодах систем вентиляции.

Выводы

При умеренных температурах среды $T_{\text{ср}}$ (ниже 100 °С) самовозгорание отложений горючих пылей в воздуховодах систем вентиляции и на оборудовании невозможно. Отложения толщиной около 0,05 м могут самовозгораться при температурах среды $T_{\text{ср}}$ выше 228 °С.

Однако возгорание отложений толщиной менее 0,05 м может происходить в результате попадания

в воздуховод тлеющих частиц или неконтролируемого роста температуры среды при аварийных ситуациях.

Самовозгорание отложений горючей пыли в воздуховодах систем вентиляции и на оборудовании может происходить за короткий промежуток времени (например, в течение одной рабочей смены). При этом основным лимитирующим фактором является интенсивность роста отложений до критической толщины, что может быть инициировано нарушением штатных условий работы технологического процесса и (или) эксплуатации оборудования.

Показано, что значения диаметра поперечного сечения воздуховода и движения потока в нем горючей пылевоздушной смеси оказывают слабое влияние на условия самовозгорания отложений пыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.П. Особенности массообмена при образовании в технологическом оборудовании самовозгорающихся отложений // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2008. № 1. С. 67–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21702243>
2. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов. М. : ВНИИПО, 2003. 445 с.
3. Бритиков Д.А. Вопросы контрольно-надзорной деятельности и совершенствования нормативного регулирования в сфере промышленной безопасности взрывопожароопасных объектов по хранению и переработке растительного сырья // Хлебопродукты. 2016. № 8. С. 12–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29384237>
4. Горшков В.И., Леончук П.А. Влияние начальной температуры на критические условия самовозгорания материалов // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 26–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35102010>
5. Возман Л., Хрюкин А. Оценка пожарной опасности объектов по хранению и переработке зерна // Комбикорма. 2017. № 4. С. 28–34. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/04_17/04_2017_28-34.pdf
6. Таубкин И.С. Микробиологическое самовозгорание как причина пожаров: методические рекомендации для следователей и экспертов // Теория и практика судебной экспертизы. 2016. № 4 (44). С. 73–85. DOI: 10.30764/1819-2785-2016-4-73-85
7. Возман Л.П., Хрюкин А.В. Пожаро- и взрывоопасность систем вентиляции, аспирации и местных отсосов на предприятиях по хранению и переработке зерна. Исследование процессов образования и роста горючих отложений в системах местных отсосов // Хлебопродукты. 2020. № 5. С. 54–59. DOI: 10.32462/0235-2508-2020-29-5-54-59
8. Walker I.K. The role of water in spontaneous combustion of solids // Fire Research Abstracts and Reviews. 1967. Vol. 9. Issue 1. Pp. 5–22.
9. Rothbaum H.P. Spontaneous combustion of hay // Journal of Applied Chemistry. 1963. Vol. 13. Issue 7. Pp. 291–302. DOI: 10.1002/jctb.5010130704
10. Merzhanov A.G. On critical conditions for thermal explosion of a hot spot // Combustion and Flame. 1966. Vol. 10. Issue 4. Pp. 341–348. DOI: 10.1016/0010-2180(66)90041-1
11. Thomas P.H. A comparison of some hot spot theories // Combustion and Flame. 1965. Vol. 9. Issue 4. Pp. 369–372. DOI: 10.1016/0010-2180(65)90025-8
12. Thomas P.H. An approximate theory of “hot spot” critically // Combustion and Flame. 1973. Vol. 21. Issue 1. Pp. 99–109. DOI: 10.1016/0010-2180(73)90011-4
13. Friedman M.H. A generalized thermal explosion criterion — Exposition and illustrative applications // Combustion and Flame. 1967. Vol. 11. Issue 3. Pp. 239–246. DOI: 10.1016/0010-2180(67)90051-x
14. Zaturka M.B. The interaction of hot spots // Combustion and Flame. 1974. Vol. 23. Issue 3. Pp. 313–317. DOI: 10.1016/0010-2180(74)90113-8
15. Zaturka M.B. Thermal explosion of interacting hot spots // Combustion and Flame. 1975. Vol. 25. Pp. 25–30. DOI: 10.1016/0010-2180(75)90065-6

16. Вогман Л.П., Сибирко В.И., Хрюкин А.В., Сенчихин В.И. Статистические данные о пожарах вследствие самовозгорания веществ и материалов // Хлебопродукты. 2014. № 10. С. 64–65.
17. Пжары и пжарная безопасность в 2014 г. : статистический сборник / под общ. ред. А.В. Матюшина. М. : ВНИИПО МЧС России, 2015. 124 с.
18. Вогман Л.П., Корольченко И.А., Хрюкин А.В. Определение условий самовозгорания отложений паров горючих жидкостей в воздуховодах вентиляционных систем // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 8. С. 34–41. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.34-41
19. Вогман Л.П., Корольченко И.А., Бритиков Д.А., Хрюкин А.В. Расчет слоя отложений на оборудовании, в вентиляционных и аспирационных системах предприятий по хранению и переработке растительного сырья // Хлебопродукты. 2014. № 6. С. 44–46.
20. Вогман Л.П., Хрюкин А.В., Корольченко И.А. Условия самовозгорания отложений на оборудовании, в вентиляционных системах и аспирационных установках объектов переработки и хранения растительного сырья // Хлебопродукты. 2015. № 8. С. 54–55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23775649>

REFERENCES

1. Petrov A.P. Features of mass transfer in the formation of self-igniting deposits in technological equipment. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2008; 1:67-75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21702243> (rus.).
2. Gorshkov V.I. *Spontaneous ignition of substances and materials*. Moscow, VNIPO Publ., 2003; 445. (rus.).
3. Britikov D.A. Issues of control and supervisory activities and improvement of normative regulation in the field of industrial safety of explosion and fire hazardous facilities for the storage and processing of vegetable raw materials. *Khleboprodukty*. 2016; 8:12-15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29384237> (rus.).
4. Gorshkov V.I., Leonchuk P.A. Influence of initial temperature on critical conditions of self-ignition of materials. *Fire Safety*. 2018; 2:26-30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35102010> (rus.).
5. Vogman L., Khryukin A. Assessment of the fire hazard of facilities for storage and processing of grain. *Kombikorma*. 2017; 4:28-34. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/04_17/04_2017_28-34.pdf (rus.).
6. Taubkin I.S. Microbiological self-ignition as a cause of fire: Guidelines for investigators and forensic examiners. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2016; 4(44):73-85. DOI: 10.30764/1819-2785-2016-4-73-85 (rus.).
7. Vogman L.P., Khryukin A.V. Fire and explosion hazard of ventilation, aspiration and local suction systems at grainstorage and processing enterprises. Investigation of formation and growth of combustible scuffs in local suction systems. *Khleboprodukty*. 2020; 5:54-59. DOI: 10.32462/0235-2508-2020-29-5-54-59 (rus.).
8. Walker I.K. The role of water in spontaneous combustion of solids. *Fire Research Abstracts and Reviews*. 1967; 9(1):5-22.
9. Rothbaum H.P. Spontaneous combustion of hay. *Journal of Applied Chemistry*. 1963; 13(7):291-302. DOI: 10.1002/jctb.5010130704
10. Merzhanov A.G. On critical conditions for thermal explosion of a hot spot. *Combustion and Flame*. 1966; 10(4):341-348. DOI: 10.1016/0010-2180(66)90041-1
11. Thomas P.H. A comparison of some hot spot theories. *Combustion and Flame*. 1965; 9(4):369-372. DOI: 10.1016/0010-2180(65)90025-8
12. Thomas P.H. An approximate theory of “hot spot” critically. *Combustion and Flame*. 1973; 21(1):99-109. DOI: 10.1016/0010-2180(73)90011-4
13. Friedman M.H. A generalized thermal explosion criterion — Exposition and illustrative applications. *Combustion and Flame*. 1967; 11(3):239-246. DOI: 10.1016/0010-2180(67)90051-x
14. Zaturka M.B. The interaction of hot spots. *Combustion and Flame*. 1974; 23(3):313-317. DOI: 10.1016/0010-2180(74)90113-8
15. Zaturka M.B. Thermal explosion of interacting hot spots. *Combustion and Flame*. 1975; 25:25-30. DOI: 10.1016/0010-2180(75)90065-6
16. Vogman L.P., Sibirko V.I., Khryukin A.V., Senchikhin V.I. Statistical data on fires due to spontaneous combustion of substances and materials. *Khleboprodukty*. 2014; 10:64-65. (rus.).

17. *Fire and fire safety in 2014: statistical book* / ed. A.V. Matyushin. Moscow, VNIPO of EMERCOM of Russia Publ., 2015; 124. (rus.).
18. Vogman L.P., Korolchenko I.A., Khryukin A.V. Determination of the self-ignition conditions for sediments of combustible liquid vapours inside air pipes of ventilating systems. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(8):34-41. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.34-41 (rus.).
19. Vogman L.P., Korolchenko I.A., Britikov D.A., Khryukin A.V. Calculation of sediment layer on the equipment, ventilation and aspiration systems of objects of storage and processing of plant raw materials. *Khleboprodukty*. 2014; 6:44-46. (rus.).
20. Vogman L.P., Khryukin A.V., Korolchenko I.A. Conditions of self-ignition of deposits on the equipment, in ventilating systems and aspiration installations of objects of processing and storage of plant materials. *Khleboprodukty*. 2015; 8:54-55. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23775649> (rus.).

Поступила 27.04.2020, после доработки 29.05.2020;

принята к публикации 18.06.2020

Received April 27, 2020; Received in revised form May 29, 2020;

Accepted June 18, 2020

Информация об авторах

ВОГМАН Леонид Петрович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, Московская обл., г. Балашиха, Российская Федерация; РИНЦ ID: 561474; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ХРЮКИН Алексей Владимирович, ФГКУ «Специальное управление ФПС № 37 МЧС России», г. Воронеж, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0402-6745; e-mail: 79081404888@ya.ru

Information about the authors

Leonid P. VOGMAN, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ID RISC: 561474; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@ya.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Aleksey V. KHRYUKIN, Federal State Public Institutions "Special Department of the Federal Fire Service No. 37 of Emercom of Russia", Voronezh, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0402-6745; e-mail: 79081404888@ya.ru