

Научная статья

УДК 6647658628; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-92-99

## **ПОВЫШЕНИЕ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ ПЫЛЕЙ**

✉ Шаптала Вадим Владимирович.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
г. Белгород, Россия

✉ [shaptalavadim@yandex.ru](mailto:shaptalavadim@yandex.ru)

*Аннотация.* Устойчивость работы предприятий пылеобразующих областей промышленности критически зависит от способности предприятий обеспечивать требуемый уровень взрывопожаробезопасности производств, что повышает актуальность совершенствования применяемых традиционных, а также внедрения новых и дополнительных мер взрывопредупреждения.

В статье с использованием методов математического и компьютерного моделирования исследованы основные факторы и закономерности формирования взрывоопасной пылевой обстановки в вентилируемых производственных помещениях с выделением горючих пылей. На этой основе показана возможность применения постоянно действующей общеобменной вентиляции для снижения вероятности формирования взрывоопасных ситуаций и предупреждения возникновения взрывов и пожаров в пыльных производственных помещениях.

*Ключевые слова:* пылевоздушные смеси, взрывопожарная безопасность, взрывоопасные ситуации, меры взрывопредупреждения, постояннодействующая общеобменная вентиляция

**Для цитирования:** Шаптала В.В. Повышение взрывопожарной безопасности производственных помещений с выделением органических пылей // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 92–99. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-92-99.

Scientific article

## **IMPROVING THE EXPLOSION AND FIRE SAFETY OF INDUSTRIAL PREMISES WITH THE RELEASE OF ORGANIC DUST**

✉ Shaptala Vadim V.

Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

✉ [shaptalavadim@yandex.ru](mailto:shaptalavadim@yandex.ru)

*Abstract.* The stability of the work of enterprises of dust-forming areas of industry critically depends on the ability of enterprises to ensure the required level of explosion and fire safety of production, which increases the relevance of improving the traditional methods used, as well as the introduction of new and additional explosion prevention measures.

In the article, using mathematical and computer modeling methods, the main factors and patterns of the formation of an explosive dust situation in ventilated industrial premises with the release of combustible dust are investigated. On this basis, the possibility of using permanent general exchange ventilation to reduce the likelihood of the formation of explosive situations and prevent the occurrence of explosions and fires in dusty industrial premises is shown.

*Keywords:* dust-air mixtures, explosion and fire safety, explosive situations, emergency measures, permanent general ventilation

**For citation:** Shaptala V.V. Improving the explosion and fire safety of industrial premises with the release of organic dust // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 4 (68). P. 92–99. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-92-99.

## Введение

Пылевоздушные смеси практически всех горючих веществ и материалов взрывоопасны [1]. Обширный класс взрывоопасных пылей составляют органические пыли растительного происхождения [2]. В связи с этим основным опасным производственным фактором на предприятиях с выделением органических пылей, в частности предприятий зерноперерабатывающей, комбикормовой, пищевой, лесообработывающей (мебельной) и других пылеобразующих отраслей промышленности являются пылевые взрывы [3, 4].

Пылевые взрывы происходят в свободных пространствах технологического оборудования, а также в производственных помещениях. К примеру, на комбикормовых заводах в помещениях происходят около половины первичных пылевых взрывов [4].

Пылевые взрывы сопровождаются разрушениями и пожарами. Приводят к гибели и травмированию людей, наносят большой материальный ущерб.

Все пылевые взрывы происходят в результате образования или развития взрывоопасных ситуаций. Взрывоопасная ситуация возникает при совмещении по времени и в пространстве следующих условий: присутствие пылевоздушной смеси с концентрацией горючих частиц в диапазоне между нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени; пространство, занимаемое пылевоздушной смесью, содержит или допускает подтекание кислорода в количестве, достаточном для полного сгорания пыли; появление в пылевоздушной смеси достаточно мощного источника зажигания в виде открытого пламени, сильно нагретой поверхности или искр любого происхождения. При отсутствии хотя бы одного из указанных условий взрыв не происходит. Поэтому все меры взрывопредупреждения заключаются в исключении или ликвидации условий возникновения взрывов.

Для предотвращения пылевых взрывов на предприятиях осуществляются комплексы мер взрывопредупреждения и взрывозащиты. Однако, несмотря на это, пылевые взрывы продолжают происходить в зерноперерабатывающей, комбикормовой, пищевой и других отраслях промышленности, связанных с интенсивным выделением горючих пылей [4], что обостряет необходимость решения актуальной задачи совершенствования известных и разработки новых дополнительных мер взрывопредупреждения и взрывозащиты.

## Методы исследования

Одним из возможных направлений разработки мер взрывопредупреждения в соответствии с требованиями и правилами взрывопожарной безопасности предприятий хранения и переработки растительного сырья [5] является использование рабочей вентиляции. Местная вытяжная вентиляция широко и системно применяется на всех пылеобразующих производствах, тогда как постоянно действующая общеобменная приточно-вытяжная вентиляция традиционно используется для нормализации санитарно-гигиенических условий [6, 7]. Однако высокая степень влияния общеобменной вентиляции на состояние производственной воздушной среды определяет возможность и целесообразность ее использования в целях взрывопредупреждения [7, 8].

Возможные способы применения общеобменной вентиляции для предотвращения пылевых взрывов рассмотрим на примере производственного помещения мини-завода для производства комбикормов (рис. 1). Процесс изготовления комбикорма на мини-заводе включает следующие основные технологические операции: измельчение сырья в молотковой дробилке (1), смешивание компонентов в шнековом смесителе (2), преобразование продукта, поступающего из накопительного бункера (3) в грануляторе (4) и последующего охлаждения в колонне (5). Наиболее значимыми источниками выделения взрывоопасной пыли являются места загрузки и выгрузки бункера и смесителя.

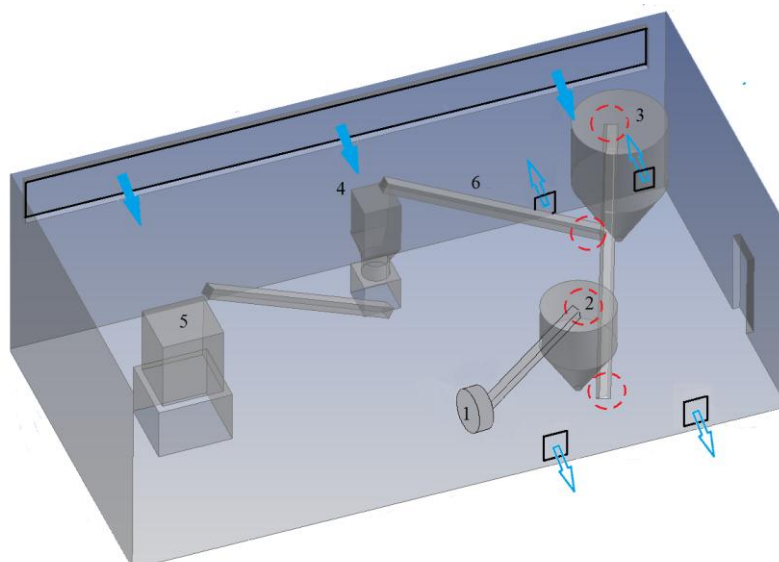


Рис. 1. Схема производственного помещения комбикормового завода. Размеры помещения:  $10 \times 20 \times 5$  м; 1 – дробилка; 2 – смеситель; 3 – бункер-накопитель; 4 – гранулятор; 5 – охладитель гранул; 6 – шнековый транспортер; - - - наиболее значимые источники выделения пыли

На формирование взрывоопасных ситуаций в производственных помещениях влияют свойства самого помещения: его размеры, архитектурно-планировочные особенности, воздухообмен, характеристики производства и используемого в нем оборудования, количество и свойства выделяемой в помещении пыли.

Свободный объем рассматриваемого помещения  $V_{св} = 800 \text{ м}^3$ , наиболее взрывоопасной составляющей выделяемой в помещении смеси пылей можно считать пыль дробленой пшеницы. Эта пыль мелкодисперсна с преобладанием частиц размерами 5–10 мкм. Скорость осаждения частиц пыли, усредненная с учетом ее дисперсного состава, равна 0,002 м/с, нижний концентрационный предел взрываемости (НКПВ) = 33 г/м<sup>3</sup>.

Суммарную валовую интенсивность технологического пылевыведения  $g$  для рассматриваемого примера на основе исследований Е.А. Дмитрука [9] можно оценить значением в интервале от 50 мг/с до 50 г/с.

Для анализа сложного взаимодействия влияющих факторов и обоснования мер взрывопредупреждения применяются методы математического и компьютерного моделирования [10, 11]. Числовые характеристики взвешенной в воздухе и осевшей на поверхностях пыли можно оценить с помощью уравнений материального баланса. С учетом осаждения уравнение пылевоздушного баланса взвешенной в воздухе пыли имеет вид:

$$C_{np}Q - CQdt + gdt - v_s \cdot S \cdot Cdt = V_{св} dC, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация взвешенной пыли кг/м<sup>3</sup>;  $C_{np}$  – концентрация пыли в приточном воздухе;  $g$  – интенсивность выделения пыли технологическим оборудованием, кг/с;  $v_s$  – скорость осаждения пыли, м/с;  $S$  – площадь горизонтальных поверхностей осаждения, м<sup>2</sup>;  $V_{св}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;  $Q$  – производительность общеобменной вентиляции, м<sup>3</sup>/с.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$C = C_{np} + \frac{\tilde{g}}{K} + \left( C_0 - C_{np} - \frac{\tilde{g}}{K} \right) e^{-tK}, \quad \text{где } K = \frac{Q + v_s \cdot S}{V}, \quad \tilde{g} = g / V_{св}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – средняя концентрация пыли в воздухе помещения в начальный момент времени ( $t = 0$ ).

Из соотношения (2) следует, что при стабильном режиме работы технологического оборудования и общеобменной вентиляции средняя концентрация пыли в воздухе помещения монотонно приближается к граничному значению:

$$C_{cp} = C_{np} + \frac{\tilde{g}}{K}. \quad (3)$$

При рациональном расположении выбросных и приточных вентиляционных устройств, концентрацией пыли в приточном воздухе можно пренебречь и считать  $C_{np} = 0$ .

Первоочередным взрывопредупреждающим применением общеобменной вентиляции должно быть установление в помещении нормативной чистоты воздуха, а так как предельно-допустимая концентрация пылей горючих компонентов сырья и готовой продукции пылевыведяющих производств, как правило, значительно ниже их НКПВ, то исполнение требуемых санитарно-гигиенических условий будет одновременно обеспечивать существенное снижение взрывоопасности помещений. При этом следует иметь в виду, что поддержание средней концентрации горючих пылей ниже их НКПВ не является достаточным условием полного исключения возможности возникновения пылевых взрывов, так как в вентилируемом помещении с пылевыведениями возможно образование застойных зон с концентрациями выше среднеобъемной, определяемой расчетным образом или опытным путем на основе показаний датчиков концентрации пыли. Поэтому расчеты, основанные на определении средней концентрации, должны обязательно дополняться анализом пространственных распределений (полей) концентрации пыли, которые можно получить методом компьютерного моделирования путем численного решения уравнений механики газодисперсных течений [11].

### Результаты исследования и их обсуждение

Правила безопасности предусматривают [5] осуществление контроля потенциальных источников опасности с рассмотрением неблагоприятных сценариев развития аварий и предварительной разработкой способов защиты персонала и материальных ценностей от воздействия опасных факторов возможных взрывов и пожаров.

Поскольку, по статистическим данным, 40 % первичных пылевых взрывов в оборудовании комбикормовых заводов приходится на силосы и бункеры [3, 4], то для рассматриваемого примера наиболее взрывоопасной представляется ситуация, которая может возникнуть при взрыве пылевоздушной смеси, возникающей при загрузке бункера.

Из разрушенного бункера в воздушную среду помещения будет выброшено большое количество горючей пыли, которая вместе со взвешенной осевшей пылью может привести к мощным и пожароопасным вторичным пылевым взрывам.

В таких случаях одной из эффективных мер взрывопредупреждения и ликвидации взрывоопасной ситуации может быть автоматическое переключение общеобменной вентиляции на аварийный режим работы. Использование общеобменной вентиляции в качестве аварийной допускается [12] при выполнении следующих условий: наличие резервных вентиляторов, оснащение помещения автоматизированной системой управления производством и вентиляцией. Система управления должна включать в себя пылеанализатор с порогом срабатывания 10 % НКПВ. Производительность вентиляции при аварийном режиме работы должна быть достаточной для поддержания концентрации пыли на уровне 50 % НКПВ.

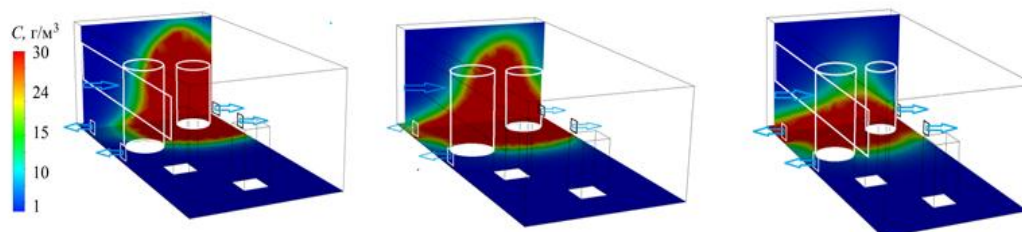
При работе аварийной вентиляции устранение взрывоопасной ситуации происходит вследствие следующих воздействий: захвата пылевоздушного облака всасывающим течением с последующим его удалением через вытяжные проемы за пределы помещения, а также в результате снижения концентрации пыли путем разбавления пылевоздушной смеси приточным воздухом. Рациональное совмещение обоих взрывопредупреждающих воздействий можно получить в результате численного анализа динамики пылевоздушных

течений. К примеру, сравним две схемы организации аварийного воздухообмена, представленные на рис 2. В первом и во втором случае используется схема организации воздухообмена сверху-вниз. Вытяжные проемы также в обоих случаях расположены вблизи наиболее значимых источников выделения пыли, а именно мест выгрузки материала из смесителя и бункера накопителя. В первой схеме вытяжные проемы мест выгрузки смесителя и бункера расположены на противоположных ограждающих конструкциях цеха, а во второй – на одной и той же ограждающей конструкции. Суммарная производительность вытяжных устройств в обоих случаях принималась равной 7 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

Как видно из рис. 2 и 3, более предпочтительной является вторая схема, так как позволяет сформировать пылевое облако меньших размеров и с более низкой концентрацией пыли. Более высокая эффективность второй схемы организации аварийного воздухообмена обусловлена рациональным расположением вытяжных проемов, обеспечивающих одинаково направленное движение вызываемых ими вытяжных течений воздуха.

Производительность аварийной вентиляции, необходимая для поддержания нормативной концентрации, может быть получена из соотношения (3), в котором примем  $C_{zp} = 0,017 \text{ кг/м}^3$ ,  $g = M/T$ , где  $M$  – масса горючей пыли, переходящей во взвешенное состояние в результате аварии. Для рассматриваемого примера, исходя из степени загрузки бункера и относительного содержания горючей пыли в загружаемом материале, значение  $M$  можно оценить в диапазоне от 4 до 6 кг. Продолжительность выделения пыли  $T$  согласно методике [13] допускается принимать равной продолжительности автоматического отключения технологического оборудования  $T = 120 \text{ с}$ . В этом случае для производительности аварийной вентиляции получим  $Q = 7–10 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ , что соответствует кратности воздухообмена  $K = 9–13$  в час.

Первая схема воздухообмена в аварийном режиме вентиляции



Вторая схема воздухообмена в аварийном режиме вентиляции

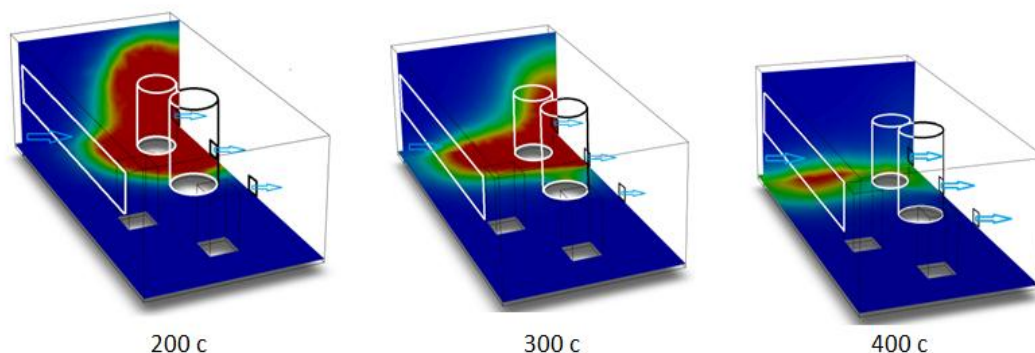


Рис. 2. Влияние схемы воздухообмена на эффективность общеобменной вентиляции в аварийном режиме

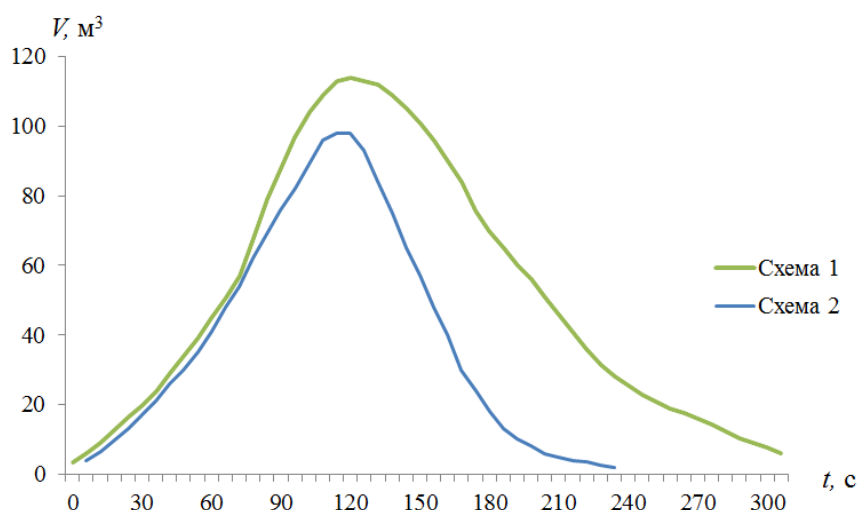


Рис. 3. Изменение объема пылевоздушного облака  $V$  с концентрацией  $> 30 \text{ г/м}^3$  при работе аварийной вентиляции. Аварийная кратность воздухообмена  $K = 9$  в час;  $g = 0,033 \text{ кг/с}$

Из приведенных графиков следует, что взрывоопасное облако уменьшается до  $40 \text{ м}^3$  (5 % свободного объема помещения) при использовании первой схемы воздухообмена за 100 с после включения аварийной вентиляции, а при использовании второй схемы воздухообмена – за 50 с, то есть в два раза быстрее.

Условия возникновения взрывоопасных воздушных смесей исследовались численными методами с использованием гидродинамического пакета Fluent. Так, при выделении мелкодисперсной горючей пыли с преобладанием частиц с размером  $d = 10 \text{ мкм}$  при интенсивности выделения пыли  $g = 10 \text{ г/с}$  и однократном (1/ч) воздухообмене через час образуются зоны с концентрацией, превышающей 30 г, суммарным объемом  $5,5 \text{ м}^3$ .

Результаты компьютерного моделирования показывают, что для вентилируемых помещений при стабильной работе оборудования и вентиляции существуют пороговые значения интенсивности пылевыведения, ниже которых из-за удаления пыли общеобменной вентиляцией и ее осаждения, взрывоопасные крупномасштабные пылевые облака объемом  $V > 5 \%$  свободного объема помещения не образуются.

### Заключение

Выполнено компьютерное моделирование основных факторов формирования взрывоопасной пылевой обстановки вентилируемых производственных помещений с выделением горючих пылей, определены характеристики взвешенной в воздухе и осевшей на поверхностях пыли, в частности: объем и локализация взрывоопасных пылевоздушных облаков, масса и распределение пылевых отложений. Моделирование выполнялось с использованием вычислительного гидродинамического пакета Fluent. Для расчета значений и динамики изменения параметров взрывобезопасности помещения разработаны дополнительные функции, вычисляемые параллельно с решением основной системы уравнений.

Результаты компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента показывают возможность и целесообразность применения постоянно действующей общеобменной вентиляции для снижения риска возникновения взрывоопасных ситуаций и предотвращения взрывов в производственных помещениях с выделением горючих пылей.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

**Список источников**

1. Корольченко А.Я., Полетаев Н.Л. Оценка верхнего концентрационного предела горения аэрозвеси // Актуальные проблемы пожарной безопасности. М., 2022. С. 470–474.
2. Yun Seok Kim, Min Chul Lee, Dong Ho Rie. Explosion characteristics of combustible wood dust in confined system: Analysis using oxygen consumption energy // Journal of mechanical science and technology. 2016. Vol. 30. P. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1250-y>.
3. Мурзин Д. Взрывы и возгорания, вызванные пылью. Превентивные меры и пути решения // Системы безопасности. 2008. № 6. С. 168–170.
4. Лукин А.Е., Потапова С.О. К вопросу об опасности предприятий мукомольного производства // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 535–539.
5. Федеральные нормы и правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 сент. 2020 г. № 331 // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: [docs.cntd.ru/document/565911147](https://docs.cntd.ru/document/565911147) (дата обращения: 20.08.2023).
6. Боровицкий А.А., Угорова С.В., Тарасенко В.И. Современная промышленная вентиляция. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2015. 59 с.
7. Посохин В.Н. Вентиляция. М.: АСВ. 2020. 624 с.
8. Jef Snoeys, John E. Going. Advances in dust explosion protection techniques: flameless venting // Procedia engineering. 2012. Vol. 45. P. 403–413. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.178 с.
9. Дмитрук Е.А. Методологические основы расчета систем аспирации зерноперерабатывающих предприятий и элеваторов. М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 2001. 40 с.
10. Гримитлин А.М., Денисихина Д.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционировании. СПб.: Изд-во АВОК, 2013. 147 с.
11. John E. Matsson. An introduction to ansys fluent 2019. SDC Publications, 2019. 454 p.
12. Свод правил 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности. М.: ВНИИПО МЧС России, 2013. 29 с.
13. Свод правил 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. 25 с.

**References**

1. Korol'chenko A.Ya., Poletaev N.L. Ocenka verhnego koncentracionnogo predela goreniya aerovzvesi // Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti. M., 2022. S. 470–474.
2. Yun Seok Kim, Min Chul Lee, Dong Ho Rie. Explosion characteristics of combustible wood dust in confined system: Analysis using oxygen consumption energy // Journal of mechanical science and technology. 2016. Vol. 30. P. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1250-y>.
3. Murzin D. Vzryvy i vozgoraniya, vyzvannye pyl'yu. Preventivnye mery i puti resheniya // Sistemy bezopasnosti. 2008. № 6. S. 168–170.
4. Lukin A.E., Potapova S.O. K voprosu ob opasnosti predpriyatij mukomol'nogo proizvodstva // Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy. 2018. T. 1. № 9. S. 535–539.
5. Federal'nye normy i pravila bezopasnosti vzyvopozharoопасnyh proizvodstvennyh ob"ektov hraneniya i pererabotki rastitel'nogo syr'ya: prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 3 sent. 2020 g. № 331 // Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii. URL: [docs.cntd.ru/document/565911147](https://docs.cntd.ru/document/565911147) (data obrashcheniya: 20.08.2023).
6. Borovickij A.A., Ugorova S.V., Tarasenko V.I. Sovremennaya promyshlennaya ventilyaciya. Vladimir: Izd-vo Vladimirskogo gos. un-ta, 2015. 59 s.
7. Posohin V.N. Ventilyaciya. M.: ASV. 2020. 624 s.
8. Jef Snoeys, John E. Going. Advances in dust explosion protection techniques: flameless venting // Procedia engineering. 2012. Vol. 45. P. 403–413. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.178 s.

9. Dmitruk E.A. Metodologicheskie osnovy rascheta sistem aspiracii zernopererabatyvayushchih predpriyatij i elevatorov. M.: CNIITEI hleboproduktov, 2001. 40 s.
10. Grititlin A.M., Denisihina D.M. Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventilyacii i kondicionirovanii. SPb.: Izd-vo AVOK, 2013. 147 s.
11. John E. Matsson. An introduction to ansys fluent 2019. SDC Publications, 2019. 454 p.
12. Svod pravil 7.13130.2013. Otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti. M.: VNIPO MCHS Rossii, 2013. 29 s.
13. Svod pravil 12.13130.2009. Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnyh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti. M.: VNIPO MCHS Rossii, 2009. 25 s.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 19.07.2023; одобрена после рецензирования: 13.11.2023; принята к публикации: 21.11.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 19.07.2023; approved after review: 13.11.2023; accepted for publication: 21.11.2023

*Информация об авторе:*

**Шаптала Вадим Владимирович**, доцент кафедры информационных технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46), кандидат технических наук, доцент, e-mail: [shaptalavadim@yandex.ru](mailto:shaptalavadim@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0006-4449-9546>, SPIN-код: 2949-3004

*Information about the authors:*

**Shaptala Vadim V.**, associate professor of the department of information technology of Belgorod technological state university named after V.G. Shukhova (308012, Belgorod, Kostyukova, 46), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: [shaptalavadim@yandex.ru](mailto:shaptalavadim@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0006-4449-9546>, SPIN: 2949-3004