

---

---

# ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

Научная статья

УДК 614.849:663.911.1; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-77-91

## РАЗРАБОТКА ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА, ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО СЫРЬЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Тарасова Александра Владимировна;

✉ Колесников Евгений Юрьевич.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ [e.konik@list.ru](mailto:e.konik@list.ru)

*Аннотация.* Рассмотрено обоснование безопасности на примере опасного производственного объекта, специализирующегося в хранении и переработке растительного сырья. Выполнены оценки вероятности возникновения взрыва и избыточного давления для двух сценариев аварии на производственном участке, расположенном в подвальном помещении здания. На основе расчетов предложены компенсирующие мероприятия, позволяющие снизить индивидуальный аварийный риск для персонала, тем самым обосновав возможность отступления от требования федеральных норм и правил по промышленной безопасности в запрете на размещение участка обеспыливания мягкой тары в подвальном помещении производственного здания.

*Ключевые слова:* промышленная безопасность, сырье растительного происхождения, мучная пыль, пылевой взрыв, индивидуальный аварийный риск, компенсирующие мероприятия, обоснование безопасности

**Для цитирования:** Тарасова А.В., Колесников Е.Ю. Разработка обоснования безопасности для опасного производственного объекта, перерабатывающего сырье растительного происхождения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 77–91. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-77-91.

Scientific article

## DEVELOPMENT OF A SAFETY JUSTIFICATION FOR A HAZARDOUS PRODUCTION FACILITY PROCESSING RAW MATERIALS OF PLANT ORIGIN

Tarasova Alexandra V.;

✉ Kolesnikov Evgeny Yu.

Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university, Saint-Petersburg, Russia

✉ [e.konik@list.ru](mailto:e.konik@list.ru)

*Abstract.* The safety justification is considered on the example of a hazardous production facility specializing in the storage and processing of plant raw materials. Estimates of the probability of an explosion and overpressure for two accident scenarios at the production site located in the basement of the building were made. On the basis of calculations, compensating measures are proposed to reduce the individual emergency risk for personnel, thereby justifying

the possibility of deviation from the requirements of federal norms and rules on industrial safety in the prohibition of placing a section of dedusting soft containers in the basement of a production building.

*Keywords:* industrial safety, raw materials of plant origin, flour dust, dust explosion, individual emergency risk, compensating measures, safety justification

**For citation:** Tarasova A.V., Kolesnikov E.Yu. Development of a safety justification for a hazardous production facility processing raw materials of plant origin // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 4 (68). P. 77–91. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-77-91.

## Введение

В последнее время отмечается рост числа опасных производственных объектов (ОПО) на территории Российской Федерации, о чем свидетельствуют ежегодные отчеты Ростехнадзора. Каждый год на таких объектах происходит не один десяток аварий, влекущих за собой не только ущерб здоровью и жизни людей, но и материальный ущерб.

Любая, даже незначительная авария в пределах одного ОПО в случае ее эскалации «по механизму домино» может перерасти в гораздо масштабную аварию, выходящую за пределы территории данного ОПО, сопровождающуюся причинением большого ущерба: гибелью и травмированием людей, материальными убытками, ущербом окружающей среде. К числу наиболее опасных относят аварии (взрывы и пожары), которые могут возникнуть на ОПО, специализирующихся в хранении и переработке растительного сырья.

К подобным объектам относятся:

- элеваторы;
- объекты по производству комбикорма;
- объекты деревообрабатывающей промышленности;
- склады с бестарным хранением растительной пыли и сырья;
- объекты, связанные с дроблением, очисткой и сушкой растительного сырья;
- льнокомбинаты и т.д.

Согласно последнему опубликованному (2023 г.) ежегодному отчету Ростехнадзора на 2021 г. количество ОПО по хранению и переработке растительного сырья на территории России составляло 3 688, что на 43 (или на 1 %) больше, чем было в предыдущем, 2020 г., и на 302 (или на 8 %) больше, чем в 2019 г. [1]. Как отмечено в статье [2], в настоящее время состоянию промышленной безопасности ОПО данного типа не уделяется должного внимания, хотя взрывы растительной пыли по своим последствиям нередко оказываются намного катастрофичнее, чем взрывы парогазовоздушных смесей. Все растительные пыли являются горючими и при определенных условиях способны создавать взрывоопасные пылевоздушные смеси.

Анализ аварии, произошедшей 11 января 2020 г. в одном из цехов Новоборисовского хлебоприемного предприятия, показывает, что она является достаточно типичной: вследствие воспламенения пылевоздушной смеси произошел ее взрыв с серьезными последствиями – деформацией и частичным разрушением несущих конструкций здания цеха, повреждением электросетей, групповым несчастным случаем (четверо пострадавших). В материалах расследования в качестве причин аварии названы:

- нарушение требований эксплуатирующей организацией к безопасности производственного процесса;
- несоответствие технических устройств, используемых организацией, требованиям промышленной безопасности.

19 июля 2019 г. произошла авария на Павловском хлебоприемном предприятии Воронежской обл. В подсобном помещении сушильно-очистительной башни в процессе сушки зерна произошел взрыв, в дальнейшем переросший в пожар. В результате аварии произошел групповой несчастный случай с тремя пострадавшими, один из которых впоследствии умер. После технического расследования обстоятельств данной аварии комиссией были установлены следующие организационно-технические причины ее возникновения:

- использование для работы зерносушилки фальсифицированного топлива;
- отсутствие должной аттестации работников в области промышленной безопасности;
- отсутствие производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности.

Анализ нескольких подобных аварий за последние пять лет, произошедших на ОПО по хранению и переработке растительного сырья на территории Российской Федерации, а также аналогичных аварий за рубежом по статье [3] Скоттона (Scotton) с соавторами, приводит к выводу, что ОПО данного типа нуждаются в более пристальном внимании со стороны контрольно-надзорных органов. Однако согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 30 июня 2021 г. № 1082 «О федеральном государственном надзоре в области промышленной безопасности» [4], несмотря на частые катастрофические последствия пылевых взрывов и пожаров на подобных ОПО, в настоящее время их относят либо к III, либо к IV классу опасности, для которых типична редкая периодичность плановых выездных проверок.

Есть надежда, что внедрение риск-ориентированного подхода (РОП) в контрольно-надзорную деятельность в области промышленной безопасности ОПО по хранению и переработке сырья растительного происхождения позволит сделать периодичность их плановых проверок более адекватной.

Понятие «*обоснование безопасности ОПО*» является важнейшей новеллой 2013 г., внесенной в закон Российской Федерации от 21 июля 1997 г. № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [5], поскольку оно содержит механизм обоснования:

- а) возможности несоблюдения (отступления) от некоторых требований промышленной безопасности к ОПО при условии надлежащей аргументации;
- б) промышленной безопасности ОПО в условиях недостаточности или полного отсутствия этих требований в действующих нормативно-правовых документах.

Ситуация (а) нередко возникает на ОПО, построенных по ранее действующим нормам и правилам. В качестве надлежащей аргументации могут рассматриваться так называемые компенсирующие мероприятия – организационные или технические меры, позволяющие уменьшить показатели аварийного риска персонала до приемлемых значений.

### **Возможные аварии на ОПО по хранению и переработке растительного сырья**

В качестве объекта исследования в данной работе рассмотрим участок очистки мешкотары условного хлебокомбината. Предприятие это довольно старое, участок расположен в угловом подвальном помещении его каменного здания.

Между тем действующий сегодня нормативно-правовой акт – Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья» [6], утвержденные в 2020 г., п. 82 запрещают размещение подобных участков в подвальных помещениях производственных зданий.

Между тем без данного производственного участка предприятие работать не может, поскольку получает пшеничную муку в полипропиленовых мешках массой нетто 50 кг. Требования экологической безопасности не позволяют утилизировать мешки из-под муки без их предварительной очистки.

Участок имеет площадь 48,2 м<sup>2</sup>, высоту потолка – 2,6 м. На участке установлены две мешкоочистные машины, каждая из которых оснащена аспирационной системой

с пылеочисткой, накопительный бункер которой может накопить до 4 кг мучной пыли. Машины обслуживаются бригадой из двух рабочих. Перед каждой машиной на полу размещаются мешки, подлежащие очистке (максимально – до ста штук). Экспертно принимаем, что в каждом мешке до очистки содержится 20 г муки.

Анализ показывает, что на данном участке возможны два сценария аварии – взрыва пылевоздушного облака пшеничной муки:

1. Начальный взрыв (в небольшом объеме помещения (экспертно – в объеме 3 м<sup>3</sup>).

2. Эскалация аварии, при которой взрывная волна начального взрыва взвихряет в воздух помещения имеющиеся отложения муки, что приводит к образованию пылевоздушного облака во всем объеме помещения с его последующим взрывом большей мощности.

Как известно, взрыв пылевоздушной смеси горючей пыли может произойти в том случае, когда она находится в воздухе в концентрации, являющейся взрывоопасной. Кроме того, согласно правилу «взрывоопасного пентагона» (включающего пять условий), должны быть также в наличии окислитель и источник зажигания с подходящей энергией [7, 8].

### Оценка вероятности образования горючей среды

Для оценки величины показателя индивидуального аварийного риска следует оценить величину вероятности возникновения аварии и условную вероятность гибели персонала от воздействия поражающих факторов аварии. Для оценки вероятности взрыва обратимся к ГОСТ 12.3.004–91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования» [9]. В рассматриваемом подвальном помещении пыль пшеничной муки присутствует в воздухе рабочей зоны постоянно, однако вероятность образования взрывоопасной ее концентрации ( $Q(\text{ПО})$ ) можно оценить по соотношению:

$$Q(\text{ПО}) = \frac{t_{\text{со}}}{t_{\text{со}} + t_{\text{оп}}} \text{год}^{-1}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{со}}$  – продолжительность существования взрывоопасного облака мучной пыли (экспертно полагаем  $t_{\text{со}} = 10$  с);  $t_{\text{оп}}$  – период времени, в течение которого может образоваться пылевое облако, с. Данный параметр принимаем равным времени рабочей смены – 8 ч.

Тогда оценка вероятности образования взрывоопасного пылевого облака (горючей среды (ГС) по выражению (1) составит:

$$Q(\text{ПО}) = \frac{10}{10 + 8 * 60 * 60} = 3 * 10^{-4} \text{год}^{-1}.$$

### Оценка вероятности появления источника зажигания

Образование некоторого  $n$ -го источника зажигания (ИЗ) в помещении обусловлено появлением в нем теплового источника (ТИ), который способен воспламенить горючую среду (ВС). Тогда вероятность возникновения  $n$ -го ИЗ определяем по формуле:

$$Q(\text{ИЗ}_{ni}) = Q_i(\text{ТИ}_i) * Q_i(\text{ВС}) \text{год}^{-1},$$

где  $Q_i(\text{ТИ}_n)$  – вероятность появления в течение года в  $i$ -м элементе объекта ТИ, год<sup>-1</sup>;  $Q_i(\text{ВС})$  – вероятность того, что  $n$ -й ТИ, который образовался в  $i$ -м элементе объекта, способен воспламенить горючую среду, год<sup>-1</sup>.

В качестве тепловых источников зажигания на рассматриваемом объекте рассмотрим электрические (ТИ<sub>эи</sub>) и фрикционные (ТИ<sub>фи</sub>) искры. Электрические искры в рассматриваемом помещении могут образоваться при коротком замыкании, во время электросварочных работ,

в случае искрения самого оборудования, а также при разрядах статического электричества. Вероятность  $Q(\text{ТИ}_{\text{эи}})$  вычисляем по формуле:

$$Q(\text{ТИ}_{\text{эи}}) = 1 - \prod_{n=1}^z [1 - Q_i(e_n)] \text{ год}^{-1}, \quad (2)$$

где  $Q_i(e_n)$  – вероятность реализации любой  $n$ -й причины, которые представлены ниже;  $Q_i(e_1)$  – вероятность возникновения искр при коротком замыкании в течение года;  $Q_i(e_2)$  – вероятность образования искры во время электросварочных работ в течение года;  $Q_i(e_3)$  – вероятность искрения оборудования из-за его несоответствия категории и группе горючей среды (ГС) в течение года;  $Q_i(e_4)$  – вероятность образования разрядов статического электричества в течение года;  $z$  – количество возможных причин;  $n$  – порядковый номер причины.

В свою очередь вероятность  $Q_i(e_1)$  находим по выражению:

$$Q_i(e_1) = Q_i(v_1) * Q_i(v_2) * Q_i(z) \text{ год}^{-1}, \quad (3)$$

где  $Q_i(v_1)$  – вероятность короткого замыкания в течение года;  $Q_i(v_2)$  – вероятность того, что числовое значение электрического тока находится в промежутке пожароопасных значений;  $Q_i(z)$  – вероятность отсутствия или отказа системы защиты от короткого замыкания в течение года.

Вероятность  $Q_i(v_1)$  вычисляем по формуле:

$$Q_i(v_1) = \frac{K_6}{\tau_p} * \sum_{j=1}^m \tau_j \text{ год}^{-1}, \quad (4)$$

где  $K_6$  – коэффициент безопасности, который допустимо принимать равным 1 [9];  $\tau_p$  – анализируемый период времени, который при 250 рабочих днях в году составляет  $1,19 \cdot 10^5$  мин;  $m$  – количество реализаций  $v_1$  причины за рассматриваемый период времени. Предположим, что данное событие происходит с частотой один раз в год;  $\tau_j$  – время существования  $v_1$  причины, мин. В данном случае длительность КЗ равна около 1 с.

Подставив необходимые значения в формулу (4), получим:

$$Q_i(v_1) = \frac{1}{1,19 \cdot 10^5} * \frac{1}{60} = 1 * 10^{-7} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность  $Q_i(v_2)$  вычисляем по формуле:

$$Q_i(v_2) = \frac{I_2 - I_1}{I_{\text{к.з.}} - I_0} \text{ год}^{-1},$$

где  $I_{\text{к.з.}}$  – максимальное значение тока короткого замыкания в кабеле, которое было зафиксировано на объекте, А;  $I_0$  – длительно допустимый ток для кабеля, А;  $I_1$  – минимальное пожароопасное значение тока в кабеле, А;  $I_2$  – максимальное пожароопасное значение тока в кабеле, А.

Значения параметров  $I_1$  и  $I_2$  определяют экспериментально. Поскольку данные о величине этих параметров отсутствуют, вероятность  $Q_i(v_2)$ , согласно [9], консервативно разрешается принять равной 1.

Вероятность  $Q_i(z)$  находим по формуле:

$$Q_i(z) = 1 - P_i(z) = 1 - e^{-\lambda * t} \text{ год}^{-1}, \quad (5)$$

где  $P_i(z)$  – вероятность безотказной работы оборудования, которое исключает возникновение  $z$ -й причины;  $\lambda$  – интенсивность отказов оборудования, исключая возникновения  $z$ -й причины,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $t$  – время работы оборудования за анализируемый период времени,  $\text{ч}$ .

Согласно табл. 10 ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования» [9] интенсивность отказа автоматической системы подавления взрывов равна  $2,5 * 10^{-7} \text{ч}^{-1}$ . Подставив значения в формулу (5), получим:

$$Q_i(z) = 1 - e^{-0,25 * 10^{-6} * 1976} = 5 * 10^{-4} \text{год}^{-1}.$$

Подставив в формулу (3) полученные значения вероятностей, находим:

$$Q_i(e_1) = 1 * 10^{-7} * 1 * 5 * 10^{-4} = 5 * 10^{-11} \text{год}^{-1}.$$

Вероятность  $Q_i(e_2)$  проведения электросварочных работ вычисляем по формуле (4). Принимаем, что частота проведения электросварочных работ на рассматриваемом участке составляет один раз в полгода. Следовательно, значение  $m$  необходимо принять равным 2. Продолжительность осуществления сварочных работ в среднем составляет не более 1 ч.

Тогда вероятность появления искр электросварочных работ будет составлять:

$$Q_i(e_2) = \frac{1}{1,19 * 10^5} * 120 = 1 * 10^{-3} \text{год}^{-1}.$$

Вероятность того, что электрическая искра образуется при включении/выключений машины, может быть оценена по выражению:

$$Q_i(e_3) = (1 - e^{-N_{y.m.} * t_p}) * 10^{-8} \text{год}^{-1}, \quad (6)$$

где  $N_{y.m.}$  – включений и выключений оборудования. В среднем в день данных операций происходит четыре, а за год – 988;  $t_p$  – продолжительность периода наблюдения, год.

Зная значения  $N_{y.m.}$  и  $t_p$ , находим по формуле (6) вероятность искрения оборудования:

$$Q_i(e_3) = (1 - e^{-988 * 1}) * 10^{-8} \approx 1 * 10^{-8} \text{год}^{-1}.$$

Вероятность  $Q_i(e_4)$  появления в  $i$ -м элементе объекта искр статического электричества вычисляем по соотношению:

$$Q_i(e_4) = Q_i(X_1) * Q_i(X_2) \text{год}^{-1},$$

где  $Q_i(X_1)$  – вероятность образования условий для статической электризации в течение года. Так как полипропилен обладают удельным электрическим сопротивлением во много раз большим, чем  $10^{-5}$  Ом, то эту вероятность принимаем равной 1,0, [9];  $Q_i(X_2)$  – вероятность существования каких-либо неисправностей или отсутствие/неэффективности системы защиты от статического электричества в течение года. Данная вероятность рассчитывается по формуле (4).

Так, принимаем, что частота возникновения неисправностей в системе защиты от статического электричества составляет не чаще 1 раза в год, а время неработоспособности системы – не более 1 ч. Подставив значения в соответствующую формулу, получим:

$$Q_i(X_2) = \frac{1}{1,19 * 10^5} * 60 = 5 * 10^{-4} \text{год}^{-1}.$$

Тогда значение вероятности  $Q_i(e_4)$  будет составлять:

$$Q_i(e_4) = 1 * 5 * 10^{-4} = 5 * 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

В итоге по формуле (2) можно найти вероятность образования в подвальном помещении такого теплового источника, как электрические искры:

$$Q(\text{ТИ}_{\text{эи}}) = 1 - \left[ \frac{(1 - 5 * 10^{-11}) * (1 - 1 * 10^{-3})}{(1 - 1 * 10^{-8}) * (1 - 5 * 10^{-4})} \right] = 1 * 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Альтернативный источник тепла – это фрикционные искры, которые могут образовываться при использовании искроопасного инструмента, во время разрушения движущихся деталей оборудования, в процессе использования персоналом обуви с металлическими набойками на подошве или гвоздями, в случае попадания в механизм машины посторонних металлических предметов и т.п. Соответственно, вероятность  $Q(\text{ТИ}_{\text{фи}})$  определяем по формуле:

$$Q(\text{ТИ}_{\text{фи}}) = 1 - \prod_{n=1}^z [1 - Q_i(f_n)] \text{ год}^{-1}, \quad (7)$$

где  $Q_i(f_n)$  – вероятность возникновения любой причины, описанной ниже;  $Q_i(f_1)$  – вероятность использования в помещении искроопасного инструмента в течение года;  $Q_i(f_2)$  – вероятность поломки движущихся деталей устройства в течение года;  $n$  – порядковый номер причины;  $z$  – количество возможных причин.

Вероятность  $Q_i(f_1)$  вычисляем по формуле (4) аналогично сварочным работам:

$$Q_i(f_1) = \frac{1}{1,19 * 10^5} * 120 = 1 * 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность  $Q_i(f_2)$  определяем аналогично вероятности  $Q_i(z)$  по формуле (5), экспертно оценив интенсивность отказа оборудования в  $1,2 * 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ :

$$Q_i(f_2) = 1 - e^{-0,12 * 10^{-6} * 1976} = 2 * 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Тогда по соотношению (6) можно найти вероятность образования в подвальном помещении такого теплового источника, как фрикционные искры:

$$Q(\text{ТИ}_{\text{фи}}) = 1 - [(1 - 1 * 10^{-3}) * (1 - 2 * 10^{-4})] = 1,2 * 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность  $Q_i(\text{BC})$  определяется экспериментально или сравнением параметров теплового источника с соответствующими показателями пожарной опасности ГС. В случае, когда данные для определения значения  $Q_i(\text{BC})$  отсутствуют, вероятность консервативно принимают равной 1 [9].

Окончательно вероятности появления ИЗ (электрических и фрикционных искр) оценены следующим образом:

$$Q(\text{ИЗ}_{\text{эи}}) = 1 * 10^{-3} * 1 = 1,5 * 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$Q(\text{ИЗ}_{\text{фи}}) = 1,2 * 10^{-3} * 1 = 1,2 * 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

### Оценка вероятности возникновения взрыва в помещении

Вероятность возникновения взрыва пшеничной муки в подвальном помещении производственного объекта определяется вероятностями возникновения ИЗ и образования ГС:

$$Q_{\text{вз}} = \left( Q(\text{ВС}) * \left[ 1 - (1 - Q(\text{ТИ}_{\text{эи}})) * (1 - Q(\text{ТИ}_{\text{фи}})) \right] \right) \text{год}^{-1}. \quad (8)$$

Считая известными значения вероятностей, рассчитываем по формуле (8) вероятность возникновения взрыва в помещении:

$$Q_{\text{вз}} = \left( 3 * 10^{-4} * \left[ \frac{1 - (1 - 1 * 10^{-3})}{1 - 1,2 * 10^{-3}} \right] \right) = 6,6 * 10^{-7} \text{ год}^{-1}.$$

Все вышеприведенные расчеты выполнены для одной мешковыбивальной машины. Однако с учетом наличия на участке двух одинаковых машин полученное значение вероятности необходимо удвоить. Окончательно оценка вероятности возникновения взрыва муки в подвальном помещении составляет  $1,3 * 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ .

### Расчет избыточного давления взрыва пшеничной муки по сценарию № 1

В статье [10] Л.В. Шерстобитовой и А.Я. Пономарева на основании расчетных соотношений СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (СП 12.13130.2009) [11] выполнена оценка пожарной опасности предприятия, специализирующегося на хранении и переработке растительного сырья. Кроме того, что работа [10] является кратким содержанием СП 12.13130.2009, данная статья очень удобна в использовании при производстве расчетов избыточного давления взрыва на мукомольном предприятии, поскольку содержит структурированные и непосредственно необходимые для этого данные.

Расчет избыточного давления взрыва  $\Delta P, \text{кПа}$ , горючей пыли выполним по СП 12.13130.2009 [11]:

$$\Delta P = \frac{m H_T p_0 z}{V_{\text{св}} C_p T_0 \rho_{\text{в}} K_H}, \quad (9)$$

где  $m$  – расчетная масса взвешенной пыли в рассматриваемом объеме помещения, которая образовалась вследствие возникшей аварийной ситуации, кг;  $H_T$  – удельная теплота сгорания рассматриваемой пыли, Дж/кг;  $p_0$  – давление воздуха в помещении до взрыва пыли, кПа;  $z$  – коэффициент участия рассматриваемой взвешенной пыли во взрыве;  $V_{\text{св}}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг·К;  $T_0$  – температура воздуха в помещении до взрыва, К;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха в помещении при заданной температуре этого помещения  $T_0$  до взрыва, кг/м<sup>3</sup>;  $K_H$  – коэффициент, который учитывает неадиабатичность процесса, а также негерметичность помещения, в котором произошел взрыв.

Сначала события развиваются по сценарию № 1 – взрыв пылевоздушного облака в объеме 3 м<sup>3</sup> в помещении участка очистки мягкой тары (мешковыбивальном) хлебозавода. Согласно справочным данным присваиваем входным параметрам следующие значения:

$$- H_T = 1,7 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} [12];$$

–  $p_0 = 101 \text{ кПа}$ , поскольку начальное давление в помещении принимаем равным значению атмосферного давления;

– ввиду отсутствия сведений, позволяющих произвести оценку величины коэффициента  $z$ , согласно СП 12.13130.2009 принимаем его равным 0,5;

- температура воздуха в помещении до взрыва:  $T_0 = 293 \text{ К}$ ;
- удельная теплоемкость воздуха при данной температуре:  $C_p = 1010 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  [11];
- плотность воздуха в помещении до произошедшей аварии:  $\rho_v = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;
- $K_n$  допускается принимать равным 3 [11].

Рассчитаем избыточное давление пылевого взрыва мучной муки в локальном объеме рассматриваемого подвального помещения, равном  $3 \text{ м}^3$ . Расчетная масса взвешенной пыли в данном объеме помещения участка очистки тары, образовавшейся в результате возникшей аварийной ситуации, определяется по формуле:

$$m = m_{\text{вз}} + m_{\text{ав}} \text{ кг}, \quad (10)$$

где  $m_{\text{вз}}$  – расчетная масса взвихрившейся пыли, кг;  $m_{\text{ав}}$  – расчетная масса пыли, которая образуется в помещении участка очистки тары вследствие аварийной ситуации, кг.

Расчетная масса взвихрившейся пыли находится следующим образом:

$$m_{\text{вз}} = K_{\text{вз}} * m_{\text{п}} \text{ кг}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{вз}}$  – доля той пыли, что отложилась в рассматриваемом помещении за определенный период времени, и которая, в случае аварийной ситуации, может перейти во взвешенное состояние. Так как экспериментальные данные об этой величине отсутствуют, то СП 12.13130.2009 позволяет присвоить данной переменной значение 0,9;  $m_{\text{п}}$  – масса пыли, которая отложилась в рассматриваемом помещении к моменту взрыва, кг. Данный параметр рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{п}} = \frac{K_r}{K_y} * (m_1 + m_2) \text{ кг}, \quad (12)$$

где  $K_r$  – доля горючей пыли из всей массы пыли, которая отложилась в помещении;  $m_1$  – масса пыли, которая отложилась в помещении на труднодоступных в процессе уборки поверхностях за промежуток времени между генеральными уборками, кг;  $m_2$  – масса пыли, которая откладывается в помещении на доступных во время уборки поверхностях за промежуток времени между текущими уборками, кг;  $K_y$  – коэффициент, определяющий эффективность уборки пыли в помещении.

Рассмотрим наихудший вариант развития аварии и примем переменную  $K_r$  равной 0,9, а десятую часть пыли будем считать негорючей, попавшей в помещение с рабочими (обувь, верхняя одежда). Коэффициент  $K_y$  для наихудшего варианта развития взрыва (когда пыль сухая и убирается вручную) будет равен 0,6 [11]. Данных о доли выделяющейся пыли, которая удаляется вентиляционными системами, нет, поэтому примем  $m_1$ , равную 0,03 кг. Сведения о доли пыли, оседающей на труднодоступных местах, отсутствуют, тогда на основании экспертной оценки присваиваем  $m_2$  значение в 0,02 кг. Подставив значения в формулу (12), получим, что масса отложившейся пыли равна:

$$m_{\text{п}}(3\text{м}^3) = \frac{0,9}{0,6} * (0,03 + 0,02) = 0,075 \text{ кг}.$$

Соответственно, по формуле (11) получаем массу взвихрившейся пыли:

$$m_{\text{вз}}(3\text{м}^3) = 0,9 * 0,075 = 0,07 \text{ кг}.$$

Пыль, участвующая в аварийной ситуации при реализации сценария № 1, образуется только при ее выбросе из мешка по неосторожности работников в момент крепления тары

к входному отверстию обеспыливающей машины. Таким образом, расчетная масса пыли, которая образуется в помещении участка очистки тары в результате аварийной ситуации, находится следующим образом:

$$m_{ав} = n * N * m_m * k * K_{п} * \frac{V_{лок}}{V_{св}} \text{ кг}, \quad (13)$$

где  $n$  – количество машин для очистки пустых мешков в помещении;  $N$  – количество мешков, которое участвует в образовании пыли в аварийной ситуации на одно устройство;  $m_m$  – масса пыли, содержащаяся в пустых мешках, кг;  $k$  – коэффициент, учитывающий долю поступившей пыли из мешка в помещение. Примем данный коэффициент равным 0,5;  $K_{п}$  – коэффициент пыления, характеризующийся отношением массы пыли взвешенной в воздухе помещения к той массе пыли, которая поступила в это же помещение из оборудования. Так как экспериментальных данных об этом параметре нет, то его значение разрешается принимать равным 1 (дисперсность пшеничной муки менее 350 мкм) [11, 13];  $V_{лок}$  – локальный объем, равный 3 м<sup>3</sup>;  $V_{св}$  – объем помещения, который принимают равным 80 % от геометрического объема рассматриваемого помещения и рассчитывают по формуле:

$$V_{св} = l * b * h * 0,8 \text{ м}^3, \quad (14)$$

где  $l$  – длина помещения, равная 6,7 м;  $b$  – ширина помещения, которая равна 7,2 м;  $h$  – высота помещения, равная 2,6 м.

Тогда, используя формулу (14), получаем:

$$V_{св} = 6,7 * 7,2 * 2,6 * 0,8 = 100,34 \text{ м}^3.$$

Далее, по формуле (13) получаем:

$$m_{ав}(3\text{м}^3) = 2 * 1 * 0,02 * 0,5 * 1 * \frac{3}{100,34} = 6 * 10^{-4} \text{ кг},$$

а по формуле (10) определяем расчетную массу взвешенной в объеме помещения мучной пыли, которая образовалась вследствие аварийной ситуации:

$$m(3\text{м}^3) = 0,07 + 6 * 10^{-4} = 0,07 \text{ кг}.$$

Подставив известные значения в формулу (9), в итоге получаем оценку избыточного давления взрыва пшеничной муки в объеме помещения, равном 3 м<sup>3</sup>:

$$\Delta P(3\text{м}^3) = \frac{0,07 * 17000 * 101 * 0,5}{3 * 1,01 * 293 * 1,2 * 3} = 18,8 \text{ кПа}.$$

### **Оценка показателя индивидуального аварийного риска, компенсирующие мероприятия при взрыве муки при сценарии № 1 аварии**

Для оценки величины показателя индивидуального риска при реализации сценария № 1 аварии воспользуемся табл. 5-4 – 5-8 [14]. При избыточном давлении взрывной волны 19 кПа прогнозируем разрушение производственного здания слабой степени, при котором условная вероятность смертельного поражения персонала оценивается величиной 0,05. Таким образом, с учетом постоянного присутствия персонала в рабочее время в помещении производственного участка оценка величины индивидуального аварийного риска  $0,05 * 1,3 * 10^{-6} = 6,5 * 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ .

Эта величина не превышает допустимого значения, однако компенсирующие мероприятия необходимы, чтобы не допустить эскалации аварии – распространение взрыва на все подвальное помещение. Для этого достаточно не допустить появления новых источников мучной пыли. К таковым можно отнести мягкую тару, находящуюся в очереди на очистку и накопительные бункера очистных устройств мешковыбивальных машин, очищающие от мучной пыли выбросы в атмосферу.

Можно предложить технические меры:

1. Мешки, ожидающие обеспыливания, следует размещать в прочных стальных ящиках с крышкой, выдерживающих избыточное давление взрыва в 0,5 бар.
2. Накопительные бункера для уловленной мучной пыли следует защитить прочными разборными кожухами, рассчитанными на воздействие избыточного давления 0,5 бар.

### **Оценка показателя индивидуального аварийного риска, компенсирующие мероприятия при взрыве муки при сценарии № 2 аварии**

В случае, когда компенсирующие мероприятия при взрыве муки в локальном объеме, равном  $3 \text{ м}^3$ , недостаточны или по каким-либо причинам отказывают в работе, авария развивается по эскалационному сценарию № 2 – избыточное давление при взрыве пылевоздушного облака пшеничной муки во всем объеме помещения.

Оценим избыточное давление взрыва при этом сценарии. Значения таких параметров, как:  $H_T$ ,  $p_0$ ,  $z$ ,  $C_p$ ,  $T_0$ ,  $\rho_v$  и  $K_H$  и  $V_{св}$  уже известны.

Расчетную массу взвихрившейся пыли находим по формулам (28), (29). Зная значения  $m_1$  и  $m_2$  из сценария № 1 – взрыв пылевоздушного облака в объеме  $3 \text{ м}^3$ , определяем значения для данных параметров при реализации сценария № 2. Так,  $m_1$  принимаем равной 1,1 кг, а  $m_2$  – равной 0,8 кг. Подставив известные значения, получим, что масса взвихрившейся пыли составит:

$$m_{вз} = 0,9 * \frac{0,9}{0,6} * (1,1 + 0,8) = 2,57 \text{ кг.}$$

Расчетная масса пыли, которая окажется в воздухе участка очистки тары в результате аварийной ситуации, находится следующим образом:

$$m_{ав} = n * (m_{ап} + N * m_m) * K_{п} \text{ кг,} \quad (15)$$

где  $n$  – количество машин для очистки пустых мешков в помещении;  $m_{ап}$  – максимальная масса пыли в аппарате (пылеемкость оборудования), которая в случае аварии будет выброшена в помещение, кг;  $N$  – количество пустой мягкой тары (мешков) в помещении, находящихся в очереди на очистку;  $m_m$  – масса пыли, содержащаяся в пустых мешках, кг;  $K_{п}$  – коэффициент пыления, равный 1.

Максимальная пылеемкость бункера пылеочистного устройства равна 4 кг. Количество мешков, находящихся в очереди на очистку от пыли для одной единицы оборудования, составляет 100 шт. Также экспертно присвоим  $m_m$  значение, равное в 0,02 кг.

Тогда с учетом наличия в помещении двух машин по формуле (15) получаем консервативную оценку массы пыли, поступившей в помещение вследствие аварийной ситуации:

$$m_{ав} = 2 * (4 + 100 * 0,02) * 1 = 12 \text{ кг.}$$

Далее по формуле (10) определяем расчетную массу взвешенной в объеме помещения мучной пыли, которая образовалась вследствие аварийной ситуации:

$$m = 2,57 + 12 = 14,57 \text{ кг.}$$

Подставив получившиеся значения в соотношение (9), получаем значение избыточного давления взрыва пшеничной муки в результате эскалации аварии:

$$\Delta P = \frac{14,57 * 17000 * 101 * 0,5}{100,34 * 1,01 * 293 * 1,2 * 3} = 117 \text{ кПа.}$$

При таком значении избыточного давления приложение 5 в работе [14] прогнозирует полное разрушение здания, при котором условная вероятность гибели персонала оценена в 60 %. Следовательно, величина индивидуального аварийного риска персонала хлебокомбината при реализации сценария № 2 составляет  $0,8 * 1,3 * 10^{-6} = 1,1 * 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ .

Таким образом, оценка величины индивидуального аварийного риска персонала предприятия показала, что величина данного показателя превышает допустимое значение. Следовательно, чтобы допустить нахождение участка очистки мягкой тары в подвальном помещении здания хлебозавода, необходимо разработать компенсирующие мероприятия, обеспечивающие снижение величины данного показателя.

Анализ [15] показал, что конструктивные особенности производственного здания ОПО оказывают сильное влияние на их состояние их промышленной безопасности. В зависимости от специфики работы объекта именно правильные объемно-планировочные и конструктивные решения способны стать решающими в обеспечении его безопасности в случае взрыва растительных пылей.

С учетом данного обстоятельства в качестве компенсирующего мероприятия можно предложить монтаж в помещении участка взрыворазрядителей в виде нескольких стальных труб с толщиной стенки, выдерживающей избыточное давление взрыва 1,2 бар, общая площадь которых отвечает требованиям промышленной безопасности.

Минимальный внутренний диаметр и количество таких труб можно оценить исходя из минимальной удельной площади легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) для помещения категории «Б», которая равна  $0,03 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ м}^3$  [6]. Следовательно, общая площадь ЛСК для рассматриваемого помещения равна:

$$S_{\text{ЛСК}} = 100,34 * 0,03 = 3,0 \text{ м}^2.$$

Минимальное количество труб внутренним диаметром 0,7 м составит восемь штук. Их следует расположить в двух наружных стенах участка, приняв меры по укреплению этих стен, чтобы не допустить ослабления их несущей способности.

Трубы следует вывести наружу вдоль стен здания, а их оголовки для отвода взрывной волны отвести от стен под прямым углом на высоте не менее 2,2 м.

Величину индивидуального аварийного риска персонала после выполнения компенсирующих мероприятий можно оценить по соотношению:

$$R_{\text{инд.комп}} = Q_{\text{вз}} * P_{\text{гиб}} * (Q_{\text{отк}} * n) \text{ год}^{-1}, \quad (16)$$

где  $Q_{\text{вз}}$  – вероятность возникновения взрыва в подвальном помещении,  $\text{год}^{-1}$ ;  $P_{\text{гиб}}$  – вероятность гибели персонала при возникновении взрыва в помещении,  $\text{год}^{-1}$ ;  $Q_{\text{отк}}$  – вероятность отказа предохранительных мембран,  $\text{год}^{-1}$ ;  $n$  – количество мембран, установленных в помещении.

Значение вероятности  $Q_{\text{отк}}$  получим по формуле (5) с учетом интенсивности отказов мембран  $1,12 * 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$  (по табл. 10 [9]):

$$Q_{\text{отк}} = 1 - e^{-0,0112 * 10^{-6} * 1976} = 2,2 * 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Теперь оценим по формуле (16) величину показателя индивидуального аварийного риска персонала после выполнения компенсирующих мероприятий:

$$R_{\text{инд.комп}} = 1,3 * 10^{-6} * 0,6 * 2,2 * 10^{-5} * 8 = 1,4 * 10^{-10} \text{ год}^{-1}.$$

Таким образом, согласно полученным оценкам предложенные компенсирующие мероприятия позволяют обосновать возможность отступления от требований промышленной безопасности – разместить производственный участок очистки мягкой тары в подвальном помещении исторического здания хлебокомбината.

### Заключение

В работе показано, что согласно выполненным оценкам предложенные компенсирующие мероприятия позволят снизить величину показателя индивидуального аварийного риска для персонала до незначительной величины  $1,4 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$ , что подтверждает возможность, в нарушении требований п. 82 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья» [6], размещения производственного участка очистки мягкой тары в подвальном помещении исторического здания хлебокомбината.

Статья акцентирует внимание на взрывопожарной опасности объектов переработки сырья растительного происхождения, число которых в стране ежегодно увеличивается. По сложившейся традиции объектам этого типа уделяется недостаточное внимание, они остаются как бы «в тени» объектов нефтегазовой отрасли, хотя последствия пылевых взрывов нередко оказываются значительно масштабнее взрывов топливно-воздушных смесей.

Риск-ориентированный подход стимулирует использование инновационных инженерных решений, позволяющих обосновать возможность отступления от некоторых требований нормативных документов по пожарной и промышленной безопасности.

### Список источников

1. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году // Ростехнадзор. URL: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/) (дата обращения: 29.09.2023).
2. Колесников Е.Ю. Неопределенность оценок взрывоопасности на примере текстильных производств // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 11. С. 23–29.
3. Scotton M.S., Barozzi M., Copelli S. Recursive operability analysis as a tool for atex classification in plants managing explosive dusts // Chemical engineering transactions. 2021. Vol. 86. P. 337–342.
4. О федеральном государственном надзоре в области промышленной безопасности: постановление Правительства Рос. Федерации от 30 июня 2021 г. № 1082 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 06.05.2023).
5. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: закон Рос. Федерации от 21 июля 1997 г. № 116 // Рос. газ. 1997. 30 июля. № 145.
6. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья»: приказ Ростехнадзора от 3 сент. 2020 г. № 331 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 06.05.2023).
7. Khudhur D.A., Ali M.W., Abdullah T.A. Mechanisms, severity and ignitability factors, explosibility testing method, explosion severity characteristics, and damage control for dust explosion: a concise review // Journal of physics: conference series 1892. 2021. P. 1–21.
8. Sanghi A., Ambrose R.P.K. Analysis of the effect of prevailing weather conditions on the occurrence of grain dust explosions // Journal of agricultural safety and health. 2016. P. 187–197.

9. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с изм. и доп. в ред. от 1 сент. 2006 г.). М.: Стандартинформ, 2006.

10. Шерстобитова Л.В., Пономарев А.Я. Оценка пожарной безопасности технологических процессов мукомольных предприятий // НАУ. 2020. № 62-1 (62). С. 39–41.

11. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.

12. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ.: в 2-х т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Асс. «Пожнаука». 2004. Ч. II. С. 774.

13. Исследование процесса улавливания пыли на зерноперерабатывающих предприятиях / Е.А. Рудыка [и др.] // Вестник ВГТУ. № 3. 2009. С. 39–41.

14. Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: приказ Ростехнадзора от 3 нояб. 2022 г. № 387 (дата обращения: 06.05.2023).

15. Combustible wood dust explosions and impacts on environments and health – A review / X. Zhou [et al.] // Environmental research 216. 2022. P. 1–17.

## References

1. Godovoj otchet o deyatel'nosti Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2020 godu // Rostekhnadzor. URL: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/) (data obrashcheniya: 29.09.2023).

2. Kolesnikov E.Yu. Neopredelennost' ocnok vzryvoopasnosti na primere tekstil'nyh proizvodstv // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2017. № 11. S. 23–29.

3. Scotton M.S., Barozzi M., Copelli S. Recursive operability analysis as a tool for atex classification in plants managing explosive dusts // Chemical engineering transactions. 2021. Vol. 86. P. 337–342.

4. O federal'nom gosudarstvennom nadzore v oblasti promyshlennoj bezopasnosti: postanovlenie Pravitel'stva Ros. Federacii ot 30 iyunya 2021 g. № 1082 // Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. URL: <http://pravo.gov.ru> (data obrashcheniya: 06.05.2023).

5. O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov: zakon Ros. Federacii ot 21 iyulya 1997 g. № 116 // Ros. gaz. 1997. 30 iyulya. № 145.

6. Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti vzryvopozharopasnyh proizvodstvennyh ob'ektov hraneniya i pererabotki rastitel'nogo syr'ya»: prikaz Rostekhnadzora ot 3 sent. 2020 g. № 331 // Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. URL: <http://pravo.gov.ru> (data obrashcheniya: 06.05.2023).

7. Khudhur D.A., Ali M.W., Abdullah T.A. Mechanisms, severity and ignitability factors, explosibility testing method, explosion severity characteristics, and damage control for dust explosion: a concise review // Journal of physics: conference series 1892. 2021. P. 1–21.

8. Sanghi A., Ambrose R.P.K. Analysis of the effect of prevailing weather conditions on the occurrence of grain dust explosions // Journal of agricultural safety and health. 2016. P. 187–197.

9. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с изм. и доп. в ред. от 1 сент. 2006 г.). М.: Стандартинформ, 2006.

10. Шерстобитова Л.В., Пономарев А.Я. Оценка пожарной безопасности технологических процессов мукомольных предприятий // НАУ. 2020. № 62-1 (62). С. 39–41.

11. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.

12. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ.: в 2-х т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Асс. «Пожнаука». 2004. Ч. II. С. 774.

13. Issledovanie processa ulavlivaniya pyli na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah / E.A. Rudyka [i dr.] // Vestnik VGTU. № 3. 2009. S. 39–41.
14. Ob utverzhdenii Rukovodstva po bezopasnosti «Metodicheskie osnovy analiza opasnostej i ocenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob"ektah»: prikaz Rostekhnadzora ot 3 noyab. 2022 g. № 387 (data obrashcheniya: 06.05.2023).
15. Combustible wood dust explosions and impacts on environments and health – A review / X. Zhou [et al.] // Environmental research 216. 2022. P. 1–17.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 10.08.2023; одобрена после рецензирования: 29.09.2023; принята к публикации: 03.10.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 10.08.2023; approved after review: 29.09.2023; accepted for publication: 03.10.2023

*Информация об авторах:*

**Тарасова Александра Владимировна**, студентка магистратуры высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: [sashenka.tarasova@mail.ru](mailto:sashenka.tarasova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0008-7660-6347>

**Колесников Евгений Юрьевич**, профессор высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), доктор технических наук, e-mail: [e.konik@list.ru](mailto:e.konik@list.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0833-6863>, SPIN-код: 9473-1733

*Information about the authors:*

**Tarasova Aleksandra V.**, graduate student of the higher school of technosphere security of Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university (195251, Saint-Petersburg, Polytechnic str., 29), e-mail: [sashenka.tarasova@mail.ru](mailto:sashenka.tarasova@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0008-7660-6347>

**Kolesnikov Evgeny Yu.**, professor of the higher school of technosphere security of Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university (195251, Saint-Petersburg, Polytechnic str., 29), doctor of technical sciences, e-mail: [e.konik@list.ru](mailto:e.konik@list.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0833-6863>, SPIN: 9473-1733