



Особенности расчета пожарного риска на производственных объектах с учетом рассеивания (дрейфа) облака топливно-воздушной смеси

В. С. Гасилов¹, Ю. И. Сагитдинов¹, Л. И. Хайруллина¹, О. А. Тучкова¹✉

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия, e-mail: touchkova-o-a@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.07.2025 г.; после доработки: 08.09.2025 г.; принята в печать: 15.09.2025 г.

Аннотация – Расчет пожарного риска с учетом рассеивания облака топливно-воздушной смеси (ТВС) является важным инструментом для повышения уровня безопасности на опасных производственных объектах (ОПО), защиты персонала и имущества эксплуатирующей организации. Пожары на ОПО представляют значительную угрозу жизни людей и материальным активам, а их последствия могут усугубляться погодными условиями, такими как ветер, способствующий распространению горения. В статье рассматриваются особенности расчета пожарного риска на ОПО, связанных с возможными авариями, вызванными распространением ТВС с учетом рассеивания (дрейфа) облака ТВС. В статье уделяется внимание методам расчета, которые учитывают динамику рассеивания и дрейфа облака ТВС в атмосфере. Анализируются такие факторы, как направление распространения облака ТВС, метеорологические условия, геометрия производственного пространства и характеристики самого вещества. Рассматриваются существующие методики расчета пожарного риска, которые не учитывают влияние ветра на формирование взрывоопасных зон ТВС. Показано, что при наличии ветра облако ТВС смещается от эпицентра разлива, что приводит к изменению зон пожарного риска. Предложена формула для оценки пожарного риска, учитывающая «розу ветров» для конкретного региона Российской Федерации. Предложенный в статье подход к расчету (по сценарию аварии: разгерметизация емкостного оборудования с последующим разливом жидкой фазы на открытой площадке) позволит более точно предсказывать зоны потенциальной опасности и более корректно разрабатывать меры по предотвращению и минимизации последствий возможных аварий на ОПО. Результаты исследования могут быть полезны для специалистов в области пожарной безопасности, проектирования ОПО и разработки нормативных документов.

Ключевые слова: пожарный риск, топливно-воздушная смесь, рассеивание облака, топливно-воздушная смесь, роза ветров.

Chemical hazard assessment and risk modeling

Features of calculating fire risk at industrial facilities taking into account the dispersion (drift) of a cloud of fuel-air mixture

Vladislav S. Gasilov¹, Yuldash I. Sagitdinov¹, Liaisan I. Khairullina¹ and Oksana A. Tuchkova¹✉

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia,
e-mail: tuchkova-o-a@mail.ru

Received: July 5, 2025; Revised: September 8, 2025; Accepted: September 15, 2025

Abstract – Fire risk calculation taking into account the dispersion of the fuel-air mixture (FAM) cloud is an important tool for improving safety at hazardous industrial facilities (HIFs), protecting personnel and property of the operating organization. Fires at HIFs pose a significant threat to human life and material assets, and their consequences can be aggravated by weather conditions, such as wind, which contributes to the spread of combustion. The article discusses the features of calculating the fire risk at HIFs associated with possible accidents caused by the spread of FA taking into account the dispersion (drift) of the FA cloud. The article focuses on calculation methods that take into account the dynamics of dispersion and drift of the FA cloud in the atmosphere. Factors such as the direction of FA cloud propagation, meteorological conditions, geometry of the production space and the characteristics of the substance itself are analyzed. Existing methods for calculating fire risk that do not take into account the effect of wind on the formation of explosive FA zones are considered. It is shown that in the presence of wind, the fuel assembly cloud shifts from the epicenter of the spill, which leads to a change in the fire risk zones. A formula for assessing the fire risk is proposed, taking into account the "wind rose" for a specific region of the Russian Federation. The approach to calculation proposed in the article (according to the accident scenario: depressurization of tank equipment followed by a spill of the liquid phase on an open site) will allow more accurate prediction of potential hazard zones and more correct development of measures to prevent and minimize the consequences of possible accidents at hazardous production facilities. The results of the study can be useful for specialists in the field of fire safety, design of hazardous production facilities and development of regulatory documents.

Keywords: fire risk, fuel-air mixture, cloud dispersion, fuel-air mixture, wind rose.

ВВЕДЕНИЕ

Жизнедеятельность человеческого общества сопряжена с постоянным воздействием на человека опасных и вредных факторов техногенного и природного характера, которые напрямую угрожают людям, как в повседневной бытовой деятельности, так и на производстве. Одной из таких угроз является пожар, т.е. неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства [1].

По статистическим данным [2] основное количество пожаров, связанных с гибелью людей приходится на пожары в зданиях жилого сектора (рис. 1).

Доля погибших при пожарах людей по видам объектов от общего числа погибших при пожарах, %

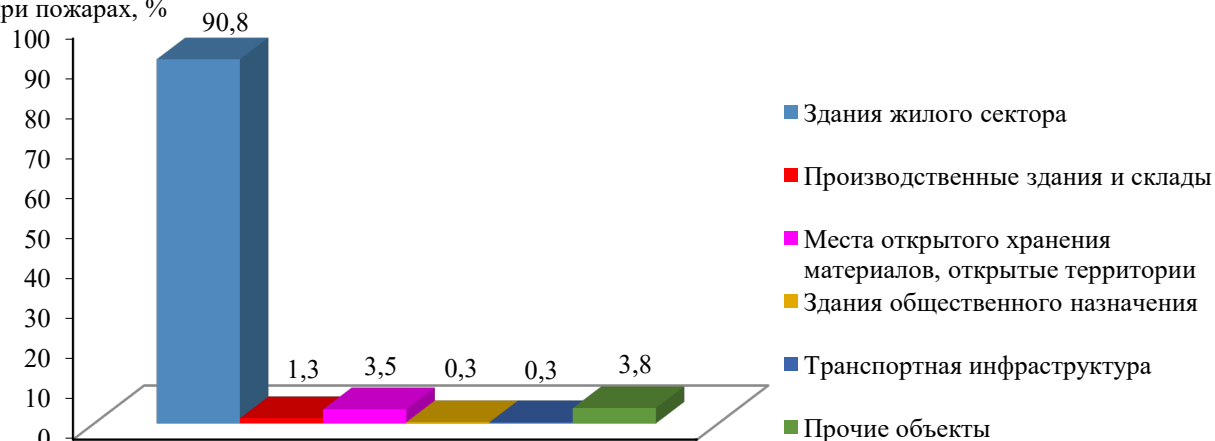


Рис. 1. Обстановка с гибелью людей при пожарах по видам объектов в 2023 г.
Fig. 1. The situation with the death of people in fires by type of fire objects in 2023.

Пожары на объектах промышленного назначения [2] также приводят к гибели людей и значительному материальному ущербу (рис. 2), что оказывает отрицательное воздействие на финансовое благополучие эксплуатирующей организации и негативно влияет на социальную и экономическую обстановку в РФ в целом.

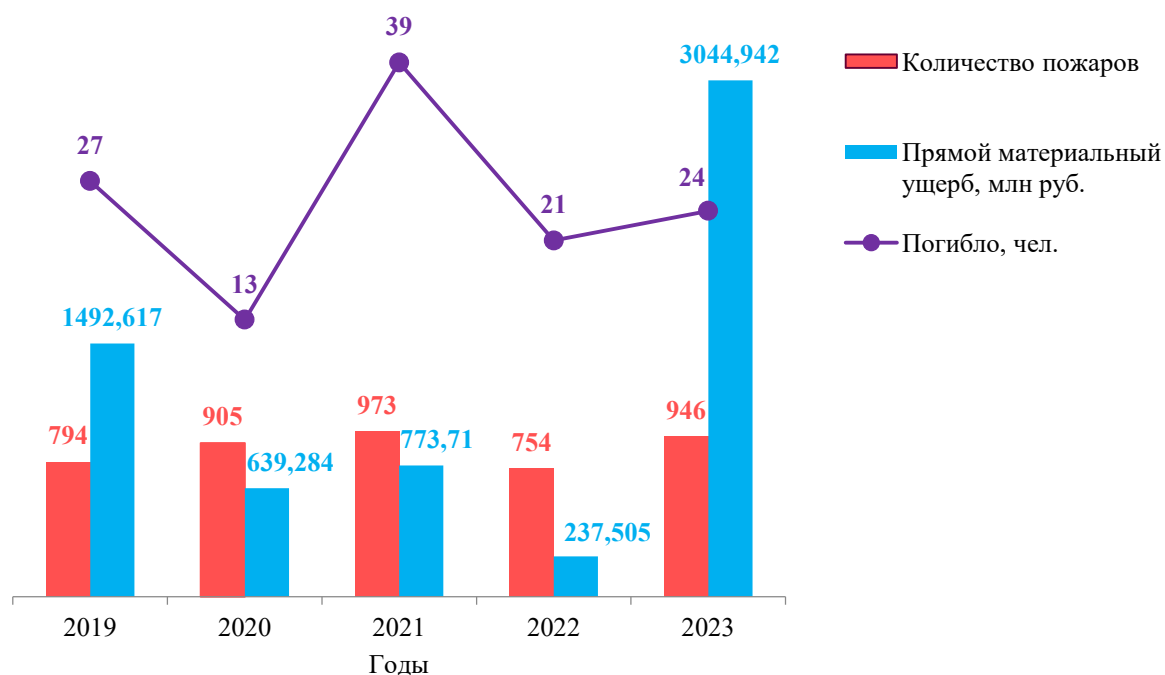


Рис. 2. Распределение количества пожаров по причинам неисправности оборудования или нарушения технологического процесса производства за 2019-2023 гг на производственных объектах в РФ по материальному ущербу и количеству погибших людей.

Fig. 2. Distribution of number fires caused by equipment malfunction or violation of the technological production process for 2019-2023, at production facilities in the Russian Federation by material damage and loss of life.

В то же время на пожароопасную ситуацию значительное влияние оказывают погодные условия. Высокие температуры окружающей среды способствуют тепловому самовозгоранию некоторых горючих веществ, а наличие ветра может привести к стремительному распространению пожара на большие расстояния вследствие разлета искр, которые имеют температуру, необходимую для инициирования нового горения и формирования новых очагов пожара.

На производственных объектах такая ситуация опасна развитием аварии по эффекту «домино», т.е. расширением площади пожара за счет вовлечения в процесс горения ТВС рядом расположенных технологических установок и, как следствие, увеличением границ действия поражающих факторов аварии и зон пожарного риска.

Проектные решения по размещению объектов на генеральном плане площадки строительства принимаются с учетом критериев допустимых значений индивидуального и социального пожарных рисков [3, 4].

При этом в существующих методиках [5–7] по оценке пожарного риска применяется упрощенный подход, т.е. такой подход к проектированию, когда при анализе сценариев возможных аварий на ОПО в качестве исходных данных к расчету принимаются условия, не учитывающие дрейф облака ТВС по направлению ветра, расчеты проводятся только для неподвижной среды (штиль), что искажает реальную картину и ведет к недочетам в принимаемых в проектной документации технических решениях, опирающихся на результаты расчетов.

Одними из обязательных требований законодательства РФ в области пожарной безопасности, при выполнении которых допускается эксплуатация производственных объектов, являются требования к величине пожарного риска, которая не должна превышать нормативных значений [4]. Но только учитывая погодные условия применительно к конкретному региону РФ при расчетах зон действия поражающих факторов пожара, пожарного риска, можно корректно оценить возможные пожароопасные ситуации на объектах гражданского и промышленного назначения. Внедрение в процесс проектирования предлагаемых в настоящей статье подходов к расчету пожарного риска открывает определенные возможности и перспективы перед заказчиком, проектировщиками и эксплуатирующей ОПО организацией по снижению затрат.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Обеспечение пожарной безопасности на объектах капитального строительства проводится с учетом оценки индивидуального и социального пожарных рисков [5–7].

Расчеты пожарного риска проводятся на основании следующих исходных данных:

- 1) происходит авария с полной разгерметизацией одного из аппаратов технологического блока по сценарию развития аварии, при котором в образовании ТВС участвует максимальное количество горючих веществ;

2) все содержимое из технологического оборудования в полном объеме поступает в окружающее пространство;

3) поверхность испарения жидкости определяется исходя из инженерных решений производственной площадки, а при свободном разливе (при аварии на наружной установке) исходя рекомендаций [6];

4) в качестве температуры продуктов принимается наибольшая из двух возможных температур – максимальная температура воздуха в соответствующем регионе [8] или максимальная температура веществ в технологическом процессе;

5) характеристики горючих продуктов принимаются по межгосударственным стандартам [9], а также справочникам для работников проектных, научно-исследовательских и промышленных предприятий [10, 11];

6) время закрытия запорной арматуры технологических трубопроводов принимается по рекомендациям [6] с учетом вероятности отказа системы автоматики и обеспечения резервирование ее элементов.

Последовательность расчета пожарного риска в определенной точке территории приведена в методиках, утвержденных приказами МЧС России [5, 6], Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [7], а некоторые особенности расчета изложены также в научных публикациях [12, 13], где пожарный риск в определенной точке (а) пространства определяется по выражению (1):

$$R_{\Sigma}(a) = \sum_j^n \cdot Q_{dj}(a) \cdot Q_j, \quad (1)$$

где $R_{\Sigma}(a)$ – пожарный (потенциально-территориальный) риск в точке (а), 1/год;

n – количество сценариев аварий;

Q_j – частота реализации j -го сценария аварии, 1/год;

$Q_{dj}(a)$ – условная вероятность поражения персонала при реализации j -го сценария аварии в точке (а).

В свою очередь условная вероятность поражения ($Q_{dj}(a)$) по сценарию аварии со взрывом паровоздушной смеси определяется на основании пробит-функции (Pr) [6], исходя из массы опасных веществ (m), испарившихся с поверхности разлива жидкой фазы [5, 6], и определяется по выражениям (2–8):

$$Pr = 5,0 - 0,26 \cdot \ln V, \quad (2)$$

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{i} \right)^{9,3}, \quad (3)$$

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{0,8 m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + \frac{3 m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + \frac{5 m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \quad (4)$$

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_0} \cdot m \cdot Z, \quad (5)$$

$$i = \frac{123 m_{\text{пр}}^{0,66}}{r}, \quad (6)$$

$$m = W(t) \cdot S \cdot \tau, \quad (7)$$

$$W(t)=10^{-6} \cdot \eta \cdot P \cdot \sqrt{M}, \quad (8)$$

где $W(t)$ – интенсивность поступления паров горючих веществ, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;

Pr – пробит-функция;

ΔP – избыточное давление взрыва в точке (а), Па;

P_0 – начальное давление, Па;

i – импульс фазы сжатия в точке (а), $\text{Па} \cdot \text{с}$;

r – расстояние от геометрического центра взрывоопасного облака ТВС до рассматриваемой точки (а) на территории производственного объекта, м;

$m_{\text{пр}}$ – приведенная масса, кг;

Q_0 – удельная теплота взрыва тринитротолуола (4520 кДж/кг);

$Q_{\text{ст}}$ – удельная теплота сгорания горючего вещества, кДж/кг;

Z – доля участия горючего вещества во взрыве;

η – показатель, зависящий от расчетной температуры и скорости движения воздуха (при свободном разливе жидкой фазы на наружной установке допускается принимать $\eta = 1$);

P – давление насыщенных паров жидкой фазы при расчетной температуре, Па;

M – молярная масса, г/моль;

S – площадь поверхности разлива жидкой фазы, м^2 ;

τ – время испарения, с.

Результаты расчетов наносятся на план производственной площадки (ситуационный план) от эпицентра аварии (геометрического центра пролива жидкой фазы) (рис. 3).



Рис. 3. Графическое отображение потенциального территориального пожарного риска на производственной площадке. ■ – $10^{-5} < R_{\Sigma}$; ■ – $10^{-6} < R_{\Sigma} < 10^{-5}$; ■ – $10^{-7} < R_{\Sigma} < 10^{-6}$; ■ – $10^{-8} < R_{\Sigma} < 10^{-7}$; ■ – $10^{-8} < R_{\Sigma}$

Fig. 3. Graphical representation of potential territorial fire risk at a production site.

Такой подход к расчету пожарного риска предполагает отсутствие движения воздуха над поверхностью разлива жидкой фазы (штиль) и не учитывает особенности формирования взрывоопасного облака при ветровой нагрузке (упрощенный подход), т.е. рассеивание в атмосфере, когда эпицентр взрыва смещается (рис. 4) от эпицентра аварии (геометрического центра пролива жидкой фазы) [14, 15], что влияет на размеры зон действия поражающих факторов.

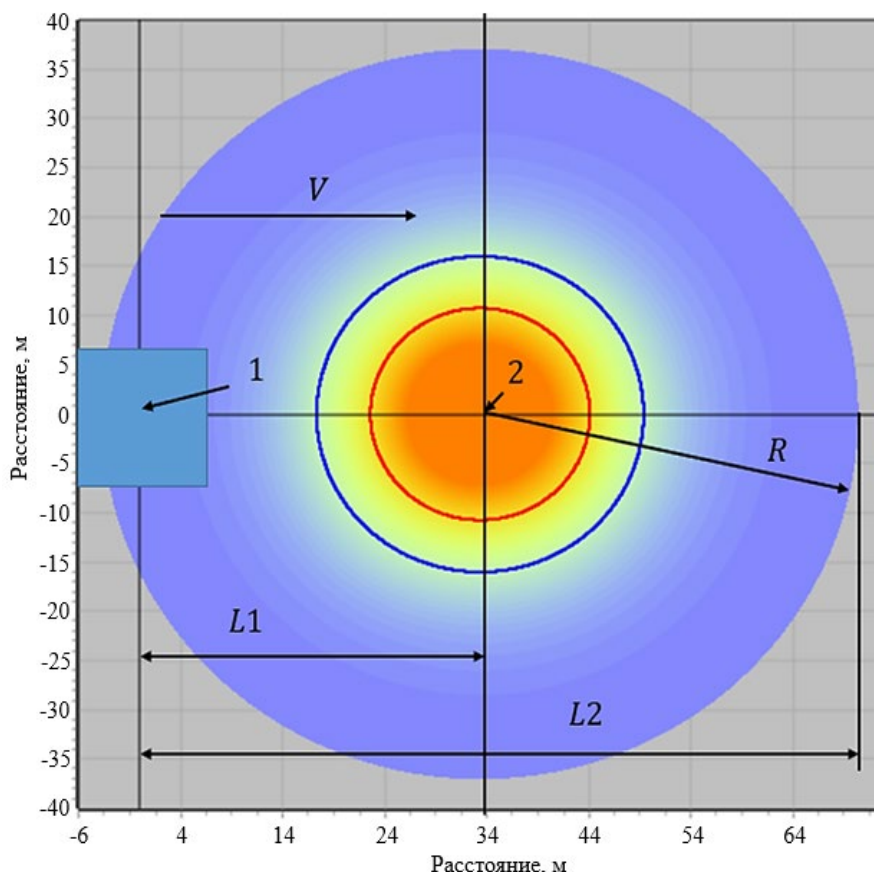


Рис. 4. Схема дрейфа центра масс вторичного облака ТВС по направлению ветра при аварийном выбросе и испарении из пролива стабильных жидкостей: 1 – площадка разлива жидкой фазы (эпицентр аварии); 2 – источник взрыва ТВС (эпицентр взрыва); L1 – максимальная дальность дрейфа центра масс облака ТВС по направлению ветра; R – радиус (от эпицентра взрыва облака ТВС) опасной для человека зоны избыточного давления, м; L2 – максимальный размер зоны поражения при взрыве облака ТВС с учетом дрейфа от источника выброса (эпицентра аварии) жидкой фазы, м; V – скорость ветра, м/с.

Fig. 4. Diagram of the drift of the center of mass of the secondary fuel assembly cloud in the direction of the wind during the emergency release and evaporation of stable liquids from the strait: 1 – liquid phase spill site (epicenter of the accident); 2 – source of the fuel assembly explosion (epicenter of the explosion); L1 – maximum drift range of the center of mass of the fuel assembly cloud in the direction of the wind; R – radius (from the epicenter of the fuel assembly cloud explosion) of the excess pressure zone dangerous to humans, m; L2 – maximum size of the damage zone during the explosion of the fuel assembly cloud taking into account the drift from the source of emission (the epicenter of the accident) of the liquid phase, m; V – wind speed, m/s.

В математических моделях [5–7] по расчету пожарного риска также не учитывается, что при дрейфе облака ТВС расчет массы взрывоопасного

вещества (m) уже не подчиняется линейной зависимости формулы (7), так как происходит рассеивание паров горючей жидкости в атмосфере и через определенное время (τ') система (жидкость – масса взрывоопасных паров жидкости в облаке ТВС) выходит на квазистационарный режим, намного раньше 3600 с – времени испарения жидкой фазы с площади разлития, принимаемой в расчетах по методикам [5–7], т.е. границы концентраций облака ТВС, при которых возможно воспламенение взрывоопасной смеси (нижний концентрационный предел (НКПР,%) и верхний концентрационный предел (ВКПР,%)) (рис. 5), а так же масса (m) взрывоопасного облака ТВС (рис. 6) не изменяются с течением времени до полного испарения жидкой фазы [14, 15].

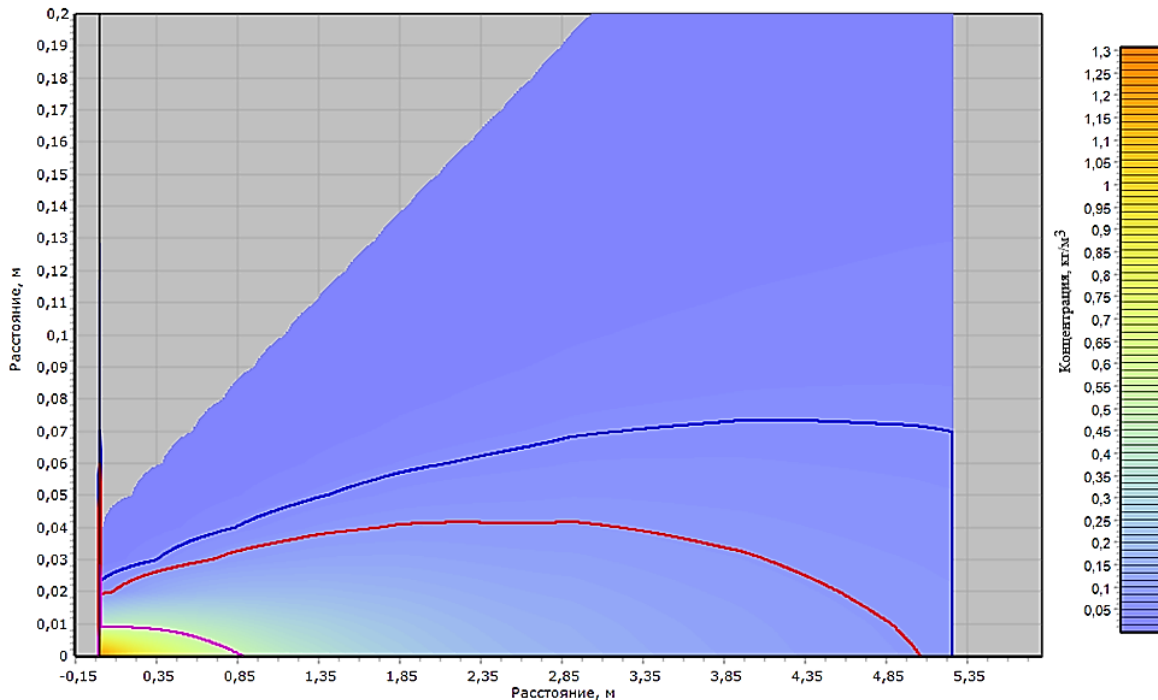


Рис. 5. Зоны взрывоопасных концентраций: НКПР – синяя линия; ВКПР – розовая линия; 0,5 НКПР – красная линия: испарение метанола (CH_4O) с площади 100 м^2 , опасная скорость ветра – до 3 м/с , температура – $+39^\circ\text{C}$, класс устойчивости атмосферы – F.

Fig. 5. Explosive concentration zones: LFL – blue line; UFL – pink line; 0.5 LFL – red line: evaporation of methanol (CH_4O) from an area of 100 м^2 , dangerous wind speed – up to 3 м/с , temperature – $+39^\circ\text{C}$, atmosphere stability class – F.

В этом случае масса взрывоопасного вещества (m) в момент времени (τ) определяется по выражению (9) путем интегрирования концентрации вещества по пространству, ограниченному поверхностями, образованными границей, на которой концентрация облака достигает НКПР и ВКПР (рис. 5), с учетом рассеивание паров ТВС в атмосфере [15].

$$m = \iiint_{V_{\text{взр}}} c(x, y, z, \tau) dx dy dz, \quad (9)$$

где $V_{\text{взр}} = \{(x, y, z) | c_{\text{НКПР}} \leq c(x, y, z, \tau) \leq c_{\text{ВКПР}}\}$;

$c(x, y, z, \tau)$ – распределение концентрации вещества в облаке ТВС в момент времени (τ);

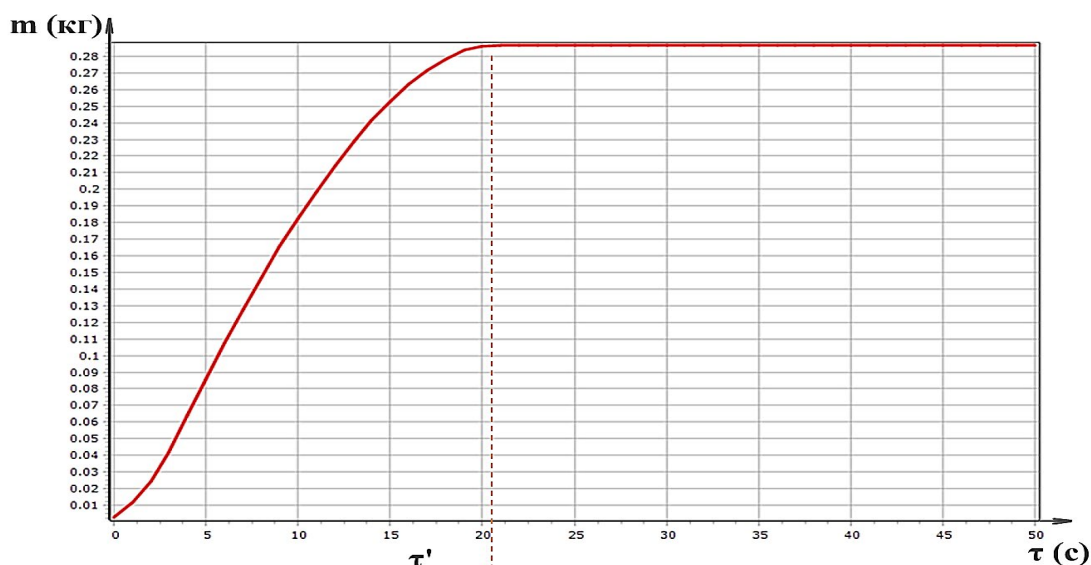


Рис. 6. Зависимость массы взрывоопасного вещества в облаке ТВС от времени испарения (сценарий: испарение метанола (CH_4O) с площади 100 м^2 , опасная скорость ветра – до 3 м/с , температура – $+39^\circ\text{C}$, класс устойчивости атмосферы – F).

Fig. 6. Dependence of the mass of explosive substance in the fuel assembly cloud on the evaporation time (scenario: evaporation of methanol (CH_4O) from an area of 100 м^2 , dangerous wind speed – up to 3 м/с , temperature – $+39^\circ\text{C}$, atmosphere stability class – F).

Таким образом, т.к. «роза ветров» (рис. 7), т.е. направление ветра по сторонам света (по румбам), а также количество штилей (безветренная погода) по регионам РФ изменяются в течение года в широком диапазоне [8, 16], то подход к расчету пожарного риска по действующим методикам [5–7] (упрощенный поход без учета дрейфа облака ТВС по направлению ветра) искажает реальную картину (по количеству взрывоопасных паров, участвующих во взрыве, по размерам зон действия поражающих факторов взрыва, по распределению потенциального пожарного риска) на территории производственной площадки, что приводит к методическим недочетам при проектировании ОПО.

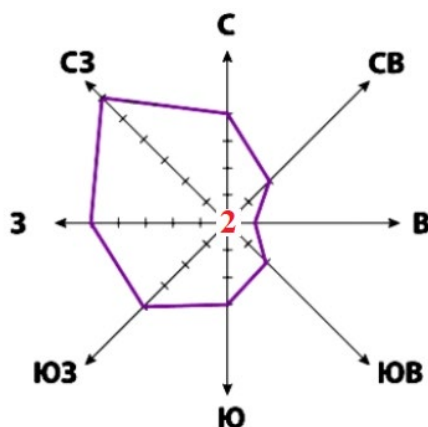


Рис. 7. Роза ветров (отрезки, откладываемые из геометрического центра, соответствуют направлению основных румбов и повторяемости ветра в данном направлении, количество штилей указывается в центре).

Fig. 7. Wind rose (the segments deposited from the geometric center correspond to the direction of the main points and the repeatability of the wind in this direction, the number of calms is indicated in the center).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку погодные условия, учитывая протяженность границ РФ с севера на юг и с запада на восток, существенно влияют на работу ОПО, то для корректной оценки пожарного риска на ОПО расчеты пожарного риска предлагается проводить по формуле (10) с учетом массы взрывоопасного вещества (m), рассчитываемой по формуле (9) и «розы ветров» в конкретном регионе РФ [8, 16, 17] для «опасной» скорости ветра, при которой достигаются максимальные зоны взрывоопасных концентраций, с учетом смещения эпицентра взрыва от геометрического центра пролива жидкой фазы [14, 15], что позволит более корректно оценить величину пожарного риска на территории промышленной площадки и минимизировать недочеты при проектировании ОПО:

$$R_{\Sigma}(a) = \sum_i^k \cdot \sum_j^n \cdot P_i \cdot Q_{dij}(a) \cdot Q_{ij}, \quad (10)$$

где $R_{\Sigma}(a)$ – индивидуальный (потенциально-территориальный) риск в точке (a), 1/год;

n – число сценариев аварий;

k – количество основных румбов (направлений ветра);

P_i – относительная частота повторяемости в году направления ветра;

Q_{ij} – частота реализации j -го сценария аварии, при P_i направлении ветра, 1/год;

$Q_{dij}(a)$ – условная вероятность поражения персонала при реализации j -го сценария аварии в точке (a) при P_i направлении ветра.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 69-ФЗ «О пожарной безопасности».
2. Пожары и пожарная безопасность в 2023 г. Статистика пожаров и их последствий. Информационно-аналитический сборник. ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Балашиха. 2024 г.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».
4. Федеральный закон от 22 августа 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
5. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. приказом МЧС Российской Федерации 26.06.2024 № 533).
6. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения 13.05.2025).
7. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
8. СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология».

9. ГОСТ 12.1.044-2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
10. *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения* (1990). Справочник в 2-х книгах под ред. Баратова А. Н., Корольченко А. Я. М.: Химия, 496 с.
11. *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения* (2004). Справочник в 2-х частях под ред. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. М.: Пожнаука, Ч. 1, Ч. 2.
12. Карькин И. Н., Контарь Н. А., Субачев С. В., Субачева А. А. (2019). Расчет потенциального пожарного риска от трубопроводов с горючими жидкостями и горючими газами. *Техносферная безопасность*, 1(22), 97–101.
13. Гасилов В. С., Тучкова О. А., Хайруллина., Л. И., Сагитдинов Ю. И. (2025). Особенности расчета индивидуального риска с учетом сезонного фактора. *Химическая безопасность*, 9(1), 183–193. <https://doi.org/10.25514/CHS.2025.1.28010>.
14. Сумской С. И., Ефремов К. В., Лисанов М. В., Софьин А. С. (2008). Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий. *Безопасность труда в промышленности*, 10, 42–50.
15. Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 02.11.2022 № 385).
16. Розы ветров. <https://lakka-sails.ru/winds/27595> (дата обращения 07.08.2025).
17. Малявина Е. Г., Маликова О. Ю., Фролова А. А. (2020). Строительная климатология. М.: Издательство МИСИ – МГСУ.

References:

1. About fire safety. Federal law of the Russian Federation of December, 21, 1994, No. 69-FL (in Russ.).
2. Fires and fire safety in 2023. Statistics of fires and their consequences. Information and analytical collection. FGBU VNIPO MCHS Rossii. Balashiha. 2024 г. (in Russ.).
3. On the composition of sections of project documentation and requirements to their content. Resolution of the Government of the Russian Federation of February 16, 2008, No. 87 (in Russ.).
4. Technical regulations on fire safety requirements. Federal law of the Russian Federation of August, 22, 2008, No. 123-FL (in Russ.).
5. Methodology for determining estimated fire risk values at production facilities. Approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation on 26.06.2024, No. 533 (in Russ.).
6. SP 12.13130.2009. Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations in terms of explosion and fire hazards. <https://docs.cntd.ru/document/1200071156> (accessed 13.05.2025) (in Russ.).
7. GOST (State Standard) 12.3.047-2012. System of labour safety standards. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control (in Russ.).
8. SP 131.13330.2020 “SNiP 23-01-99* Building climatology” (in Russ.).
9. GOST (State Standard) 12.1.044-2018. System of labour safety standards. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination (in Russ.).
10. *Fire and explosion hazards of substances and materials and means of extinguishing them* (1990). Handbook in 2 books. Edited by Baratova A. N., Korol'chenko A. Ja. M.: Himija, 496 p. (in Russ.).
11. *Fire and explosion hazards of substances and materials and means of extinguishing them* (2004). Handbook in 2 parts. Edited by Korol'chenko A. Ja., & Korol'chenko D. A. M.: Pozhнаука, Part 1, 2. (in Russ.).

12. Kar'kin, I. N., Kontar, N. A., Subachev, S. V., & Subacheva, A. A. (2019). Calculation of potential fire risk from pipelines with flammable liquid and flammable gases. *Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technosphere safety*, 1(22), 97–101 (in Russ).
13. Gasilov, V. S., Tuchkova, O. A., Hajrullina, L. I., & Sagitdinov, U. I. (2025). Peculiarities of calculation of individual risk taking into account seasonal factor. *Khimicheskaya Bezopasnost' = Chemical Safety Science*, 9(1), 183–193 (in Russ). <https://doi.org/10.25514/CHS.2025.1.28010>.
14. Sums koy, S. I., Efremov, K. V., Lisanov, M. V., & Sofyin A.S. (2008). Comparison of the results of modeling of accidental releases of hazardous substances with accident facts. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*, 10, 42–50 (in Russ.).
15. Safety Manual “Methodology for modeling the spread of accidental releases of hazardous substances”. Approved by the order of the of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision on 02.11.2022, No. 385 (in Russ.).
16. Wind roses. <https://lakka-sails.ru/winds/27595> (accessed 07.08.2025).
17. Malyavina, E. G., Malikova, O. Y., & Frolova, A. A. (2020). Construction climatology. M.: MISI - MGSU Publishing House (in Russ.).