

Научная статья
УДК 614.835.4
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.63.21.028

Программа определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожарах и взрывах на автозаправочных комплексах

Юнус Юсупович Осмонов

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-8109-0495>

Автор, ответственный за переписку: Юнус Юсупович Осмонов, junososmonov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены особенности оценки риска на автозаправочных комплексах, а именно определение условной вероятности поражения человека тепловым излучением в зависимости от удаления от источника. Предмет и тема работы связаны с исследованием процесса оценки риска, который является неотъемлемой частью обеспечения безопасности на автозаправочных комплексах. В результате работы разработана программа для определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при авариях на автомобильных заправочных комплексах, которая может быть использована в целях определения количественной меры опасности на указанных объектах, характеризующейся различными значениями индивидуального и коллективного риска. В основу программной реализации положена экспресс-методика определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением, базирующаяся на зависимостях, полученных при помощи пробит функции. Предлагаемая разработка направлена на оперативное определение вероятности поражения человека тепловым излучением в случае реализации сценариев возникновения пожара пролива горючих жидкостей и образования огненного шара. Применение программы в практике оценки пожарного риска ускоряет процесс расчета и повышает эффективность оценки риска. Разработка может быть использована специалистами по оценке пожарного риска, а также применяться при проектировании автозаправочных комплексов.

Ключевые слова: взрыв, пожар пролива, огненный шар, условная вероятность поражения, пожарная опасность, пробит функция, тепловое излучение, горючие жидкости, автозаправочных комплекс, пожар пролива

Для цитирования: Осмонов Ю.Ю. Программа определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожарах и взрывах на автозаправочных комплексах // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 293-301. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.63.21.028>.

Original article.

Program for determining conditional probability of human injury by thermal study in order to assess the risk of accidents at gas filling complexes

Yunus Y. Osmonov

Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-8109-0495>

Corresponding author: Yunus Y. Osmonov, [junusosmonov@gmail.com](mailto:junososmonov@gmail.com)

Abstract. The article discusses the features of risk assessment at gas stations, namely, the determination of the conditional probability of human injury by thermal radiation depending on the distance from the source. The subject and topic of the work are related to the study of the risk assessment process, which is an integral part of ensuring safety at gas stations. As a result of the work, a program was developed to determine the conditional probability of human injury by thermal radiation in accidents at automobile filling complexes, which can be used to determine the quantitative measure of danger at these facilities, characterized by different values of individual and collective risk. The software implementation is based on an express technique for determining the conditional probability of human injury by thermal radiation, based on dependencies obtained using probes of the function. The proposed development is aimed at rapid determination of the probability of human exposure to thermal radiation in the event of scenarios of a fire spill of combustible liquids and the formation of a fireball. Application of the program in the practice of fire risk assessment speeds up the calculation process and increases the efficiency of risk assessment. The development can be used by specialists in assessing fire risk, as well as used in the design of gas stations.

Keywords: fireball, conditional probability of damage, fire hazard, puncture function, thermal radiation, combustible liquids, gas station complex, spilled liquid fire

For citation: Osmonov Y.Y. Program for determining conditional probability of human injury by thermal study in order to assess the risk of accidents at gas filling complexes // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 293-301. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.63.21.028>.

С расширением сети автозаправочных комплексов и ростом объемов хранения различных нефтепродуктов возрастают риски, связанные с аварийным разливом и возможным возгоранием топлив. Эффективные методы оценки пожарного риска позволяют своевременно выявлять уязвимые места при проектировании и эксплуатации автозаправочных комплексов.

В 2008 году, с принятием Технического регламента о требованиях пожарной безопасности, в котором прописаны определения пожарного риска и требования по обеспечению пожарной безопасности объекта защиты, основанные на исключении возможности превышения значений допустимого пожарного риска, особую актуальность приняли вопросы выработки обоснованных методик оценки риска в области обеспечения пожарной безопасности объектов защиты.

Анализ зарубежной литературы по оценке пожарного и промышленного риска [1-6] показывает, что в настоящее время отсутствует единый подход по оценке пожарного риска [7]. В нашей стране на законодательном уровне происходит переход к гибкому нормированию требований пожарной безопасности, как в процессе эксплуатации, так и на этапе строительства объектов.

В настоящее время существует два основополагающих подхода по оценке риска объектов нефтегазового комплекса – это эвристический и вероятностный. Вероятностные подходы к оценке пожарного риска являются основой значительного числа современных методов. В основе вероятностного подхода лежит оценка вероятности возникновения аварий, построение полей воздействия опасных факторов в результате аварии и вероятности поражения людей, находящихся в зоне воздействия опасных факторов пожара или взрыва.

Рассмотрим специфику оценки пожарного риска автозаправочных станций и комплексов. Мероприятие включает в себя анализ различных факторов, которые могут повлиять на вероятность возникновения пожара или взрыва, а также оценить последствия аварии. Согласно [8,9] на данных объектах в значительных объемах могут находиться различные виды пожароопасного автомобильного топлива: бензин, метан, пропан-бутан или газовый конденсат. Проблема обеспечения пожарной безопасности на автозаправочных комплексах обусловлена наличием близко расположенного технологического оборудования, содержащего в себе горючие вещества [10]. Пожары и взрывы на этих объектах возникают из-за нарушения технологических регламентов, а также правил пожарной и промышленной безопасности, являясь следствием аварийных ситуаций и инцидентов [11].

Наибольшую пожарную опасность на автозаправочных комплексах представляет горение и взрывы жидкого моторного топлива, что при наличии источника воспламенения, может привести к взрыву и цепному развитию аварии, а также поражению иных объектов. При данном сценарии развития с большой долей вероятности может произойти поражение людей опасными факторами пожара и взрыва. Характерным примером является взрыв на автозаправочной станции, произошедший 12 октября 2024 года в городе Грозный, в результате которого погибло 4 человека, в том числе 2 детей.

В настоящей работе делается акцент на определение риска гибели и получения травм в результате пожара и взрыва на автозаправочных комплексах. Расчет риска в данном случае производится путем произведения вероятности возникновения аварии и вероятности поражения реципиента в зависимости от его времени пребывания в опасной зоне.

Одним из основных параметров при расчете величин пожарного риска на автозаправочных комплексах является оценка последствий воздействия опасных факторов пожара и взрыва на людей для различных сценариев его развития условная вероятность поражения человека при пребывании в зоне воздействия опасных факторов аварии [12]. Известны экспресс-методы оценки условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожаре пролива горючих жидкостей и реализации огненного шара [13].

Величина вероятности поражения реципиента зависит от радиусов воздействия теплового излучения, значения R_1 , R_2 , R_3 определяются по формуле:

$$R_i = \sum_{j=0}^9 a_{ij} (R_{\text{прол}})^j \quad (1)$$

где, $i - 1, 2, 3$;

a_{ij} – коэффициенты, приведенные в Табл.1 работы [13];

$R_{\text{прол}}$ – радиус пролива, рассчитанный в соответствии с [14].

R_1, R_2, R_3 при реализации сценария возникновения огненного шара определяются по формуле:

$$R_i = \sum_{j=0}^7 b_{ij} (\lg(m))^j \quad (2)$$

где, $i - 1, 2, 3$;

b_{ij} – коэффициенты, приведенные в таблице 2 работы [13];

$R_{\text{прол}}$ – радиус пролива, рассчитанный в соответствии с [14].

m – масса горючего вещества.

При использовании данного подхода поражение человека определяется следующим образом:

- условная вероятность равна 1 в случае, если человек находится в пределах R_1 ;
- условная вероятность равна 0,5 в случае, если человек находится за пределами R_1 , но в пределах R_2 ;
- условная вероятность равна 0,1 в случае, если человек находится за пределами R_2 , но в пределах R_3 ;
- условная вероятность равна 0 в случае, если человек находится за пределами R_3 .

В целях автоматизации расчетов, производимых при помощи формул 1,2 и повышения оперативности их проведения разработана программа «Определение условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожаре» [15], позволяющая рассчитывать условную вероятность поражения человека при нахождении его в различных зонах воздействия теплового излучения в случае реализации сценариев образования огненного шара и пожара пролива по количеству пролитых горючих жидкостей (бензина, метана, пропан-бутана или газового конденсата).

Алгоритм разработанной программы в виде блок схемы представлен на Рис.1.

Для начала работы с программой на персональном компьютере необходимо запустить исполняемый файл, после чего открывается окно выбора сценария развития пожара и ввода исходных данных.

Имеется возможность произвести расчёты зон поражения и вероятности поражения человека для теплового излучения для пожара пролива и огненного шара.

При выборе сценария развития аварии «Пожар пролива» необходимо ввести объем разлитого горючего вещества в пределах числового интервала от 0,01 до 20 куб.м, а также указать расстояние от центра пролива, на котором находится человек. Затем пользователю необходимо нажать кнопку с веществом, для которого производится расчет (бензин, метан, пропан-бутан или газовый конденсат).

Программа рассчитает и схематично отобразит радиусы поражения, и вероятность поражения человека с учетом его удаления от источника теплового излучения.

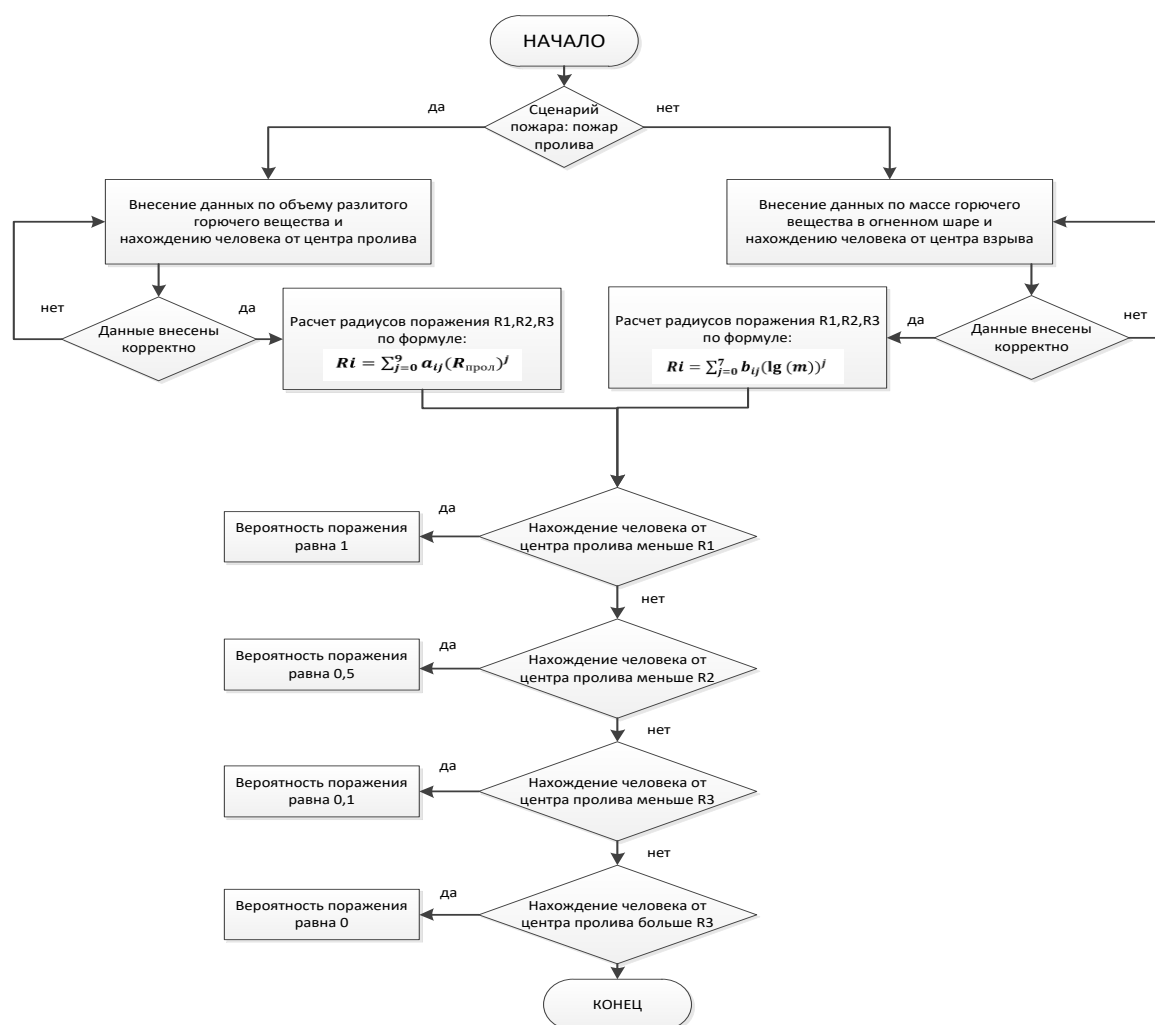


Рис.1. Блок схема программы «Определение условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожаре»

Расчет радиусов поражения в случае возникновения пожара пролива рассчитывается с приемлемой точностью (до 1 метра) при объеме пролитого горючего вещества до 20 куб. м, в случае образования огненного шара - от 20 до 100000 кг. В этой связи в программе предусмотрены ограничения на ввод исходных данных в пределах указанных диапазонов значений. В том случае, если пользователь вводит некорректные данные, выводится информационное сообщение об ошибке и предлагается внести данные повторно.

После корректного ввода исходных данных необходимо выбрать, для какого вещества необходимо определить условную вероятность поражения. Для пожара пролива имеется возможность определить условную вероятность поражения для бензина, сжиженного природного газа, сжиженного углеводородного газа или газового конденсата.

На Рис.2 в качестве примера представлен расчет радиусов поражения тепловым излучением и условной вероятности поражения человека при пожаре пролива 10 куб. м бензина.

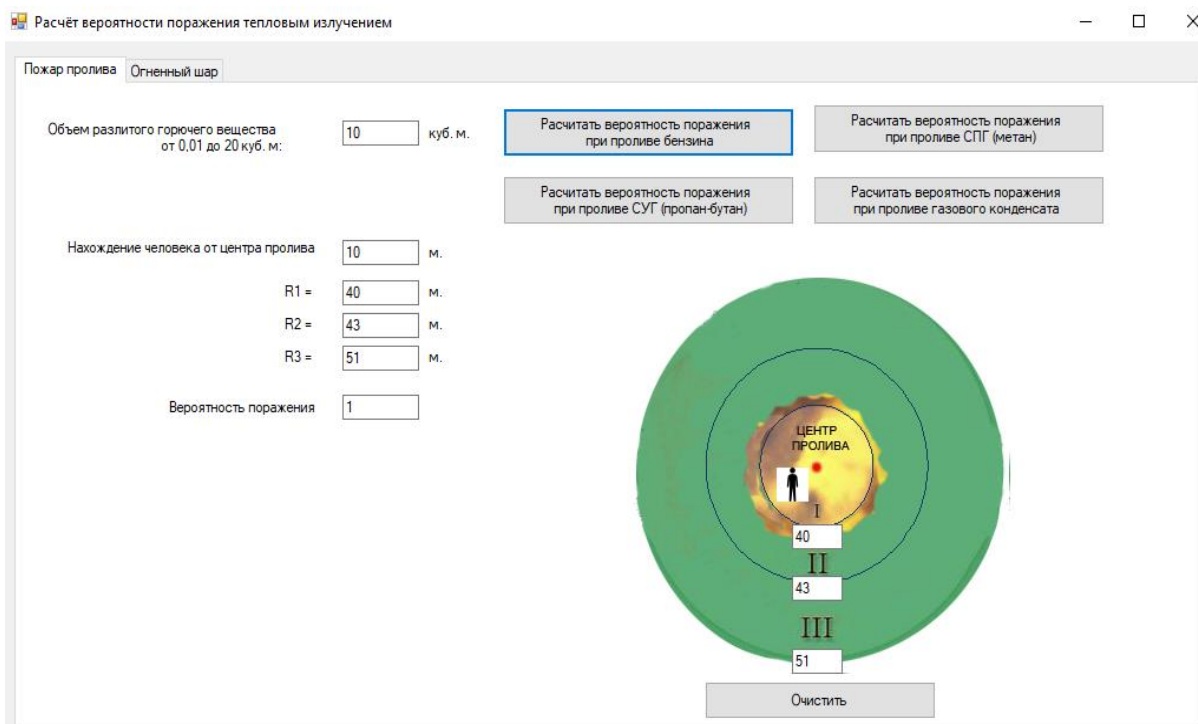


Рис.2. Результаты расчетов радиусов поражения тепловым излучением и условной вероятности поражения человека при пожаре пролива 10 куб. м бензина

При помощи программы [15] определены радиусы зон поражения тепловым излучением при образовании пожара пролива на реальном автозаправочном комплексе (далее – АЗК), находящемся в Санкт-Петербурге: радиус интенсивного теплового излучения $R1 = 55$ м., радиус среднего теплового излучения $R2 = 64$ м., радиус низкого теплового излучения $R3 = 75$ м. На Рис.3 представлено нанесение зон поражения тепловым излучением при образовании пожара пролива на плане местности.

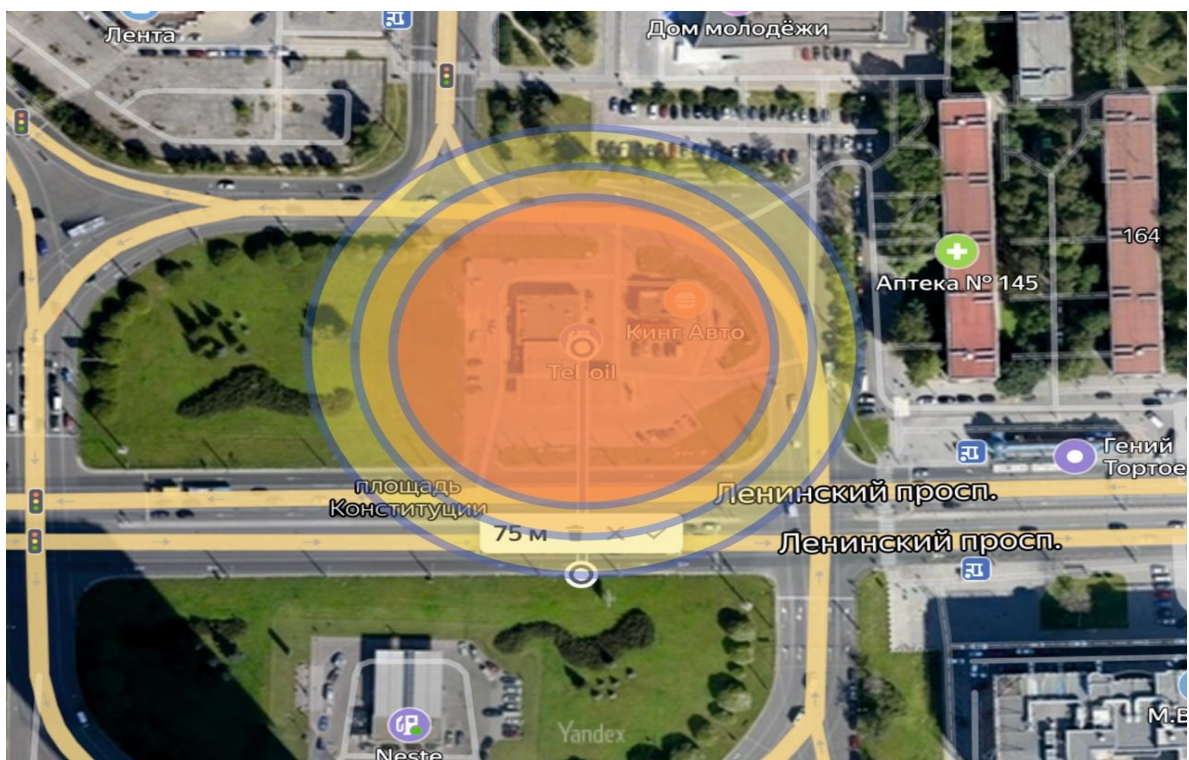


Рис.3. Зоны воздействия теплового излучения при образовании пожара пролива

При образовании огненного шара: радиус интенсивного теплового излучения $R_1 = 72$ м., радиус среднего теплового излучения $R_2 = 86$ м., радиус низкого теплового излучения $R_3 = 89$ м. На Рис.4 представлено нанесение зон поражения тепловым излучением при образовании огненного шара на плане местности. На Рис.4 представлено нанесение зон поражения тепловым излучением при реализации сценария образования огненного шара на плане местности.

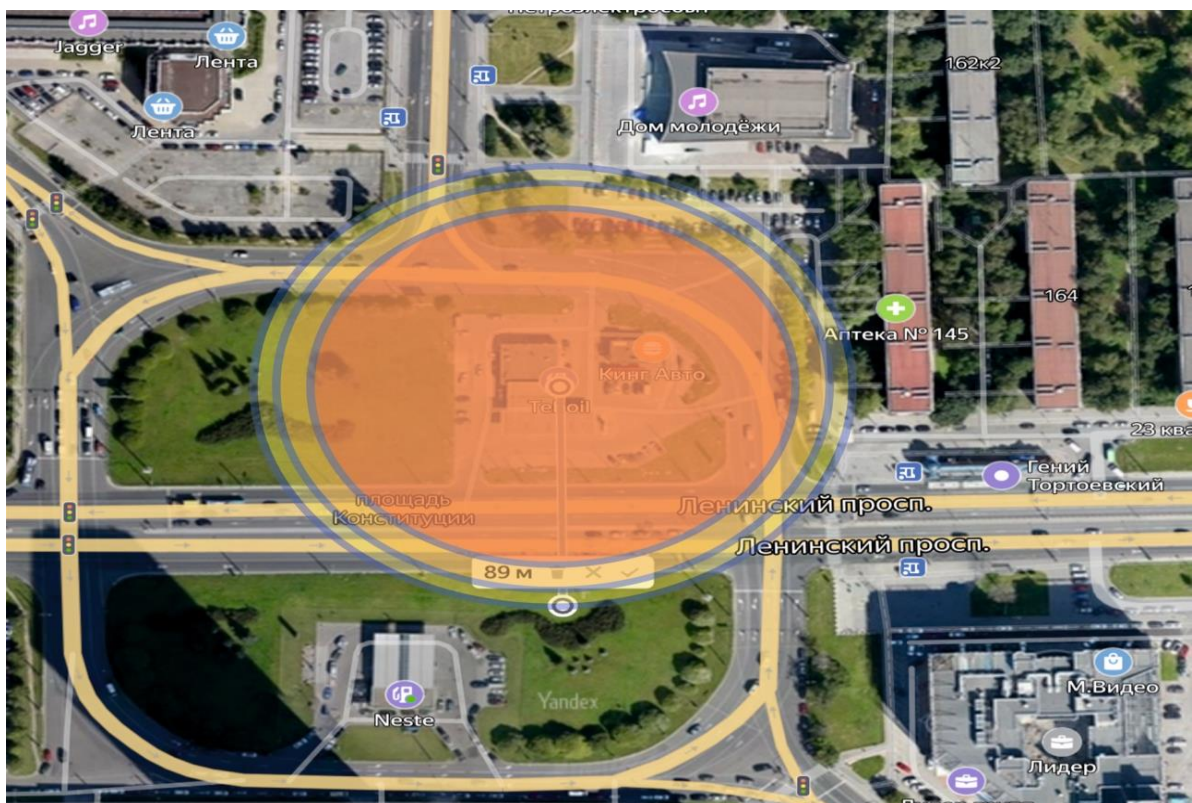


Рис.4. Зоны воздействия теплового излучения при образовании огненного шара

В дальнейшем, в целях определения пожарного риска на указанном АЗК, определяется количество людей, находящихся в зоне воздействия поражающих факторов для каждого сценария развития аварии, их вероятности поражения и вероятности пребывания.

Современный этап развития технологий оценки пожарного риска характеризуется активным внедрением методов искусственного интеллекта, что открывает принципиально новые возможности для повышения точности и эффективности прогнозирования опасных ситуаций. Одной из наиболее перспективных областей применения искусственного интеллекта становится автоматизированное распознавание и оценка количества людей, попадающих в зоны потенциального поражения при пожаре, с использованием данных космической съемки и аэрофотосъемки.

Традиционные методы оценки пожарного риска основываются на статических моделях, использующих усредненные данные о людях, находящихся на территории объекта. Однако реальная обстановка характеризуется высокой динамикой - количество и расположение людей постоянно меняется в зависимости от времени суток, дня недели, сезона и проведения специальных мероприятий. Именно здесь технологии искусственного интеллекта позволяют совершить качественный скачок в точности оценок.

В перспективе развитие этого направления будет идти по пути создания полностью автономных систем мониторинга и прогнозирования, способных в реальном времени оценивать пожарные риски с учетом фактического количества людей на территории, автоматически активировать системы противопожарной защиты и управлять эвакуацией.

Проведем сравнительный анализ полученных значений с Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденной приказом МЧС России от 11.11.2022 № 583. Основным паромером воздействия на человека является время его нахождения в зоне поражающего фактора. Исходя из моделей эвакуации на АЗК, проведенных в соответствии с Методикой определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденной приказом МЧС России от 14.11.2022 г. № 1140, человек сможет эвакуироваться из опасной зоны за 28 секунд.

Расчет интенсивности теплового излучения проведен по модели твердого пламени с учетом углового коэффициента облученности и коэффициента пропускания атмосферы. Условная вероятность поражения рассчитана через пробит-функцию согласно п. 35 Приложения №1 к Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденной приказом МЧС России от 11.11.2022 № 583.

Результаты расчетов приведены в Табл.1.

Табл.1. Определение параметров поражения человека при пожаре пролива 10 куб. м. бензина

Расстояние от центра пролива, м	Интенсивность теплового излучения, (кВт/м²)	Пробит-функция	Условная вероятность поражения человека в соответствии с разработанной программой	Условная вероятность поражения человека в соответствии с утвержденной методикой
40	35.9	6.04	1 (100%)	0.85 (85%)
43	30.7	5.49	0.5 (50%)	0.69 (69%)
50	23.1	4.53	0.1 (10%)	0.27 (27%)
53	20.6	4.13	0 (0 %)	0.19 (19%)

При анализе полученных значений можно сделать вывод о том, что данные, полученные при помощи разработанной программы, имеют расхождение с общепринятой методикой не более чем на 20%, что является приемлемым результатом.

Следует отметить, что время эвакуации является ключевым фактором при расчету условной вероятности поражения человека по Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденной приказом МЧС России от 11.11.2022 № 583, так например при снижении времени эвакуации человека из опасной зоны на 5 секунд, вероятность условного поражения человека снижается на значения от 10 % до 25 % что подтверждает высокую чувствительность величины пожарного риска к временному параметру.

В результате работы рассмотрена программная реализация определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при авариях на автомобильных заправочных комплексах, которая может быть использована в целях определения количественной меры пожарной опасности на указанных объектах, характеризующейся различными значениями индивидуального и коллективного риска. Рассмотренная в данной работе программа позволяет определять вероятность поражения человека при возникновении пожара пролива или возникновения огненного шара. Ее практическая значимость заключается в автоматизации расчетов, необходимых для оценки пожарного риска.

Разработка нацелена на специалистов, занимающихся вопросами оценки пожарного риска, преимущественно на автозаправочных станциях и комплексах, а также может быть полезна проектировщикам зданий и сооружений, и инженерам по промышленной и пожарной безопасности.

Список источников

1. Хэмптон П. Сокращение административной нагрузки: эффективная проверка и контроль. Лондон: Казначейство Её Величества, 2005. 140 с.
2. Чувико Э. и др. Разработка системы оценки пожарного риска с использованием технологий дистанционного зондирования и географических информационных систем // Экологическое моделирование. 2010. Том 221, № 1. С. 46–58.
3. Хаджисофоклеус Г.В., Фу Ц. Обзор литературы по методологиям оценки пожарного риска // Международный журнал по противопожарным нормам, основанным на инженерных показателях. 2004. Том 6, № 1. С. 28–45.
4. Ибрагим М. Н. и др. Разработка метода оценки пожарного риска для объектов культурного наследия // Procedia Engineering. 2011. Том 20. С. 317–324.
5. Ван Л. и др. Оценка пожарного риска при эксплуатации и техническом обслуживании зданий на основе технологии BIM // Строительство и окружающая среда. 2021. Т. 205. С. 180–188.
6. Холл Дж. Р., Уоттс Дж. М. Анализ пожарного риска // Справочник по противопожарной защите / под ред. А. Э. Коута. NFPA, 2008. Гл. 8. С. 135–143.
7. Якуш С.Е., Эсманский Р. К. Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы // Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6, № 3. С. 8–27.
8. СП 156.13130.2014. Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности.
9. Долгова А.А. Анализ пожаровзрывоопасных объектов на примере автозаправочных станций // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. 2019. С. 164–165.
10. Лей В.А. Причины аварий на автозаправочных станциях: крымский аспект // Современная наука. 2021. № 2-2. С. 375-377.
11. Ивахнюк Г.К., Осмонов Ю.Ю. Статистический анализ аварий на автозаправочных комплексах (станциях) // Пожаровзрывобезопасность. 2023. Т. 31, № 6. С. 91–98.
12. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС России от 26.06.2024 № 533. 2024. 76 с.
13. Шебеко Ю.Н. и др. Экспресс-методы определения условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожарах на наружных технологических установках // Пожарная безопасность. 2006. № 5. С. 73–79.

14. Строгонов В.В. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий / Болодьян И. А., Шебеко Ю.Н., Карпов В.Л., Макеев В. И., Некрасов В.П., Пономарев А. А., Строгонов В.В., Гордиенко Д.М., Лагозин А.Ю., Григорьева А.В., Кириллов Д.С. Москва: ВНИИПО, 2006. 93 с.

15. Ивахнюк Г.К., Осмонов Ю.Ю. Определение условной вероятности поражения человека тепловым излучением при пожаре: свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2023660620 / заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева (RU). Заявл. 12.05.2023; зарегистрировано 23.05.2023. Реестр программ для ЭВМ.

References

1. Hampton P. Reducing the administrative burden: effective verification and control. London: Her Majesty's Treasury, 2005. 140 p.
2. Chuviko E. et al. Development of a fire risk assessment system using remote sensing technologies and geographic information systems // Environmental modeling. 2010. Volume 221, No. 1. pp. 46-58.
3. Hadjisofokleus G.V., Fu Ts. A review of the literature on fire risk assessment methodologies // International Journal of Fire Safety Standards based on Engineering Indicators. 2004. Volume 6, No. 1. pp. 28-45.
4. Ibragim M. N. et al. Development of a fire risk assessment method for cultural heritage sites // Procedural Engineering. 2011. Volume 20. pp. 317-324.
5. Wang L. et al. Assessment of fire risk in the operation and maintenance of buildings based on BIM technology // Construction and environment. 2021. Vol. 205. pp. 180-188.
6. Hall J. R., Watts J. M. Fire risk analysis // Handbook of fire protection / edited by A. E. Kote. NFPA, 2008. Ch. 8. pp. 135-143.
7. Yakush S.E., Esmansky R. K. Fire risk analysis. Part I: Approaches and methods // Problems of risk analysis. 2009. Vol. 6, No. 3. pp. 8-27.
8. SP 156.13130.2014. Car refueling stations. Fire safety requirements.
9. Dolgova A.A. Analysis of fire and explosive objects using the example of gas stations // Actual problems of construction, housing and communal services and technosphere safety. 2019. pp. 164-165.
10. Ley V.A. Causes of accidents at gas stations: the Crimean aspect // Modern science. 2021. No. 2-2. pp. 375-377.
11. Ivakhnyuk G.K., Osmonov Yu.Y. Statistical analysis of accidents at gas station complexes (stations) // Fire and explosion safety. 2023. Vol. 31, No. 6. pp. 91-98.
12. On approval of the methodology for determining calculated fire risk values at production facilities: Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 06/26/2024 No. 533. 2024. 76 p.
13. Shebeko Yu.N. and others. Express methods for determining the conditional probability of human injury by thermal radiation in case of fires in outdoor technological installations // Fire safety. 2006. No. 5. pp. 73-79.
14. Strogonov V.V. Guidelines for fire risk assessment for industrial enterprises / Bolodyan I. A., Shebeko Yu.N., Karpov V.L., Makeev V. I., Nekrasov V.P., Ponomarev A. A., Strogonov V.V., Gordienko D.M., Lagozin A.Yu., Grigorieva A.V., Kirillov D.S. Moscow: VNIPO, 2006. 93 p.
15. Ivakhnyuk G.K., Osmonov Yu. Determination of the conditional probability of human injury by thermal radiation in case of fire: certificate of official registration of the computer program No. 2023660620 / applicant and copyright holder of the St. Petersburg State Fire Service University of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Hero of the Russian Federation, General of the Army E.N. Zinichev (RU). Submitted on 05/12/2023; registered on 05/23/2023. The register of computer programs.

Статья поступила в редакцию 11.07.2025, одобрена после рецензирования 27.08.2025, принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 11.07.2025, approved after reviewing 27.08.2025, accepted for publication 01.09.2025.