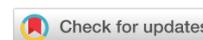


# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 621.039

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26>

Научная статья

## Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки



А.П. Тюрин  , И.М. Янников

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,  
Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

 [asd1978@mail.ru](mailto:asd1978@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** При исследовании проблемы воздействия на людей и инфраструктуру населенных пунктов негативных факторов, возникающих при взрывах на заправочных станциях, зачастую применяется вероятностный подход. Ограничение данного подхода состоит в том, что при его реализации понятие загроможденности окружающего пространства не отражает соотношения между площадью застройки и общей площадью, подверженной воздействию ударной волны. Поэтому данная статья посвящена вопросам разработки и обоснования подхода к оценке последствий взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС) с учётом особенностей застройки населённых пунктов. Целью работы явилась разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки. Решение данной проблемы будет способствовать принятию решений для разработки эффективных защитных мероприятий для окружающих объектов.

**Материалы и методы.** Авторами проведён аналитический обзор результатов исследований в изучаемой области и существующих подходов к оценке последствий взрывов на автомобильных заправочных станциях (АЗС), газозаправочных станциях (АГЗС), исходя из конкретных условий их расположения на территории населённых пунктов.

**Результаты исследования.** Разработан подход для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки. Выявлены основные причины, виды аварий со взрывом на АЗС и масштабы их последствий. Наряду с теоретическим обоснованием рассматриваемого вопроса, авторами приведено подробное описание применённой методики исследования, а также характеристика объектов исследования с учётом их месторасположения. При расчете последствий взрывов топливно-воздушных смесей впервые предложено использовать коэффициент плотности застройки, равный отношению площади существующих объектов к общей площади территории, подверженной воздействию ударной волны. Данный подход обосновывает необходимость применения дополнительных защитных мероприятий в районах расположения заправочных станций. Подробно описаны использованные методы анализа с обоснованием достоверности результатов измерений.

**Обсуждение и заключения.** Применение предлагаемого в статье подхода для расчета последствий взрыва топливно-воздушных смесей с учетом величины плотности застройки даёт возможность контролировать расположение и уровень риска от возможных взрывов на заправочных станциях в условиях реальной обстановки. Предлагаемый подход к расчету последствий позволяет оперативно в реальном масштабе времени и в соответствии с существующей обстановкой в районе расположения АЗС оценивать возможные риски и планировать конкретные мероприятия по их минимизации.

**Ключевые слова:** автозаправочная (автогазозаправочная) станция, оценка риска, методика, дефлаграция, взрыв, вычисления, эксперимент, застройка.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность коллективу разработчиков авторского курса «Электронная информационно-образовательная среда» в лице Султанова Р.О., Майоровой М.А. и Смирнова С.В. за

профессиональные компетенции, полученные при его изучении и использованные в дальнейшем при выполнении данного исследования.

**Для цитирования:** Тюрин А.П., Янников И.М. Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учётом особенностей застройки. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(2):17–26. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26>

Original article

## Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features

Aleksandr P Tyurin  , Igor M Yannikov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7, Studencheskaya Street, Izhevsk, Russian Federation

 [asd1978@mail.ru](mailto:asd1978@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** In the study of the problem of the impact of negative factors from explosions at gas stations on people and the infrastructure of settlements, a probabilistic approach is often used. The limitation of this approach is that when it is implemented, the concept of clutter of the surrounding space does not reflect the relationship between the area occupied by buildings and the total area affected by the shock wave. Therefore, this article is devoted to the development and justification of an approach to assessing the consequences of explosions of fuel-air mixtures (FA), taking into account the peculiarities of the development of settlements. The work objective is to develop an approach for assessing the consequences of explosions of fuel-air mixtures, taking into account the development features. The solution to this problem will facilitate decision-making for the development of effective protective measures for surrounding objects.

**Materials and Methods.** The authors have conducted an analytical review of the research results in the field of study and the existing approaches to assessing the consequences of explosions at filling stations (FS) and gas stations (GS), based on the specific conditions of their location on the territory of settlements.

**Results.** An approach has been developed to assess the consequences of explosions of fuel-air mixtures, taking into account the development features. The main causes, types of accidents with an explosion at a gas station and the scale of their consequences have been identified. Along with the theoretical justification of the issue under consideration, the authors provide a detailed description of the applied research methodology, as well as the characteristics of the objects of research, taking into account their location. When calculating the consequences of explosions of fuel-air mixtures, it was proposed for the first time to use a development density factor equal to the ratio of the area of the existing facilities to the total area of the territory affected by the shock wave. This approach justifies the need to apply additional protective measures in the areas where gas stations are located. The methods of analysis used are described in detail with justification of the reliability of the measurement results.

**Discussion and Conclusion.** The application of the approach proposed in the article for calculating the consequences of an explosion of fuel-air mixtures, taking into account the development density, makes it possible to control the location and the level of risk from possible explosions at gas stations in a real situation. The proposed approach for calculating the consequences allows you to quickly assess possible risks in real time and plan specific measures to minimize them in accordance with the existing situation in the area of the gas station.

**Keywords:** filling (gas) station, risk assessment, methodology, deflagration, explosion, calculations, experiment, development.

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to the team of developers of the author's course "Electronic information and educational environment" represented by Sultanov RO., Mayorova MA. and Smirnov SV. for the professional competencies obtained during its study and used in the future when performing this research.

**For citation.** Tyurin AP., Yannikov IM. Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2): 17–26. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26>

**Введение.** На автомобильных газозаправочных станциях, находящихся в непосредственной близости от мест пребывания большого количества людей, зачастую происходят аварийные взрывы. Актуальным и крайне важным является оценка последствий таких взрывов. Тяжесть негативных воздействий зависит прежде всего от наличия и качества препятствий на пути распространения взрывной волны. Последующие оценки необходимы

для выполнения корректирующих мероприятий, направленных на снижение влияния негативных факторов взрыва. К ним можно отнести установку любых механических препятствий — защитных барьеров, деревьев, кустарников и др. Эффективность защитных мероприятий в количественном выражении должна быть достаточной для сведения рисков до минимально допустимых значений. Одновременно оценка опасностей должна иметь наглядное представление.

На практике нередки случаи, когда рядом с заправочными станциями, в том числе мультитопливного типа, находятся регулируемые и нерегулируемые пешеходные переходы, различные здания или остановки общественного транспорта. При этом на пути к ним со стороны взрывоопасных объектов зачастую отсутствуют элементарные преграды, способствующие снижению взрывной нагрузки.

Опасность тяжёлых последствий при авариях на заправочных станциях подтверждается Российской и международной статистикой. В частности, за период с 2005 по 2016 годы на автогазозаправочных станциях нашей страны ежегодно происходит 2–3 пожара с пострадавшими, при которых получают травмы или погибают 4 человека [1]. Аналогичные случаи происходят и в других странах, например, в [2] описаны 50 типичных случаев аварий на заправочных станциях Китая за последние 20 лет.

Ведущим подходом к исследованию проблемы воздействия на людей и инфраструктуру населённых пунктов негативных факторов взрывов на заправочных станциях является использование известных методик [3], реализованных в различных программных комплексах. Например, модуль «Взрыв ТВС. Расчёты зон поражения при взрывах ТВС»<sup>1</sup> позволяет комплексно рассмотреть все вышеописанные параметры. В практических и исследовательских целях методика даёт возможность управления введенными параметрами, логикой расчёта, оценкой масштабов последствий в случае изменения местных условий застройки.

Для анализа опасностей исследователи используют методы анализа режимов и последствий отказов. Типом и причиной отказа оборудования наиболее частых аварий является взрыв, вызванный статическим электричеством. В этой связи обычно предлагают эффективные меры по устранению аварий и смягчению последствий. Результаты исследований направлены на обеспечение возможности снижения рисков эксплуатации заправочных станций.

Научные источники, посвященные анализу аварий со взрывом сжиженных углеводородных газов, свидетельствуют о том, что их последствия часто приводят к значительным материальным потерям и человеческим жертвам. Анализ опасностей для режима дефлаграции и детонации обычно выполняется аналитическим методом, подробно описанным в вышеуказанной методике [3]. Однако применяются и более сложные численные методы расчёта [4]. Например, с помощью программного обеспечения<sup>2</sup> рассматриваются сценарии взрывов в условиях сложной застройки местности в трехмерном представлении, в том числе в случае взрыва внутри здания. Для анализа дефлаграционной опасности топливно-воздушных смесей численным методом могут быть исследованы давление взрыва и особенности распространения пламени предварительно перемешанной смеси сжиженных углеводородных газов (СУГ) с воздухом. Например, в замкнутом трубопроводе при повышенных начальных давлениях и температурах. Результаты подобных исследований позволяют выявлять наибольшее влияние на параметры взрыва, например, начального давления. В связи с общей наблюдающейся тенденцией существует подход прогнозирования аварий и их последствий с использованием концепции риска. Особенности риска дефлаграции СУГ в сложных рабочих ситуациях, оценки риска взрыва связанных процедур и устройств для разработки научных и эффективных мер по взрывозащите рассматриваются в работе китайских исследователей [5].

Исследования безопасности и оценки риска все чаще используются для управления деятельностью по обращению с опасными материалами. Полученные модели в исследованиях по анализу рисков могут использоваться, например, для планирования землепользования или для расчёта последствий аварийных ситуаций уже существующих объектов. В некоторых работах представлены модели расчёта последствий пожаров, взрывов и выбросов ядовитых газов для людей, зданий и сооружений. Источником таких моделей, как правило, является справочник по расчёту последствий, разработанный для Министерства жилищного строительства и окружающей среды Нидерландов, в котором приводится значительное количество моделей [6]. В зарубежной литературе можно встретить источники, раскрывающие основные концепции с точки зрения акустических воздействий взрыва и их физических характеристик [7].

Автозаправочные станции (АЗС) их мультитопливные варианты, одиночные автогазозаправочные станции (АГЗС) представляют собой достаточно сложные социально-технические системы с динамичными

<sup>1</sup> Модуль «Взрыв ТВС». Расчёты зон поражения при взрывах. Линейка Российских программных средств по промышленной безопасности. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmyi-kompleks-toxirisk-5/moduli-toxirisk-5/modul-vzryv-tvs-raschety-zon-porazheniia-pri-vzryvah-tvs> (дата обращения: 20.04. 2023).

<sup>2</sup> BREEZE ExDAM. Modeling Software for EHS Professionals. Trinity Consultants. URL: <https://www.trinityconsultants.com/software/explosion/exdam> (дата обращения: 20.04. 2023).

отношениями между различными факторами риска. В настоящее время причинно-следственный анализ аварий, связанных со взрывом топливно-воздушных смесей, в основном сосредоточен на исследованиях аспектов человеческой ошибки и неисправности оборудования. В работе [8] выявлены 28 факторов риска взрывов газа. Девять из них, такие как вспышка, электрическая искра и локальное скопление газа, являются прямыми причинами взрыва газа. 17 факторов связаны с действиями при эксплуатации, неисправностью систем вентиляции и ошибками в управлении безопасностью. Они являются косвенными. Вероятность взрыва газа возрастает с увеличением количества факторов риска. В ряду слабо подверженных управлению находятся риски, связанные с несовершенством государственной политики и законодательных актов. Установлено, что по сравнению с субъективными факторами риска объективные факторы имеют более высокую вероятность вызвать взрыв газа вследствие сопряжения рисков.

Существует ряд исследований, посвященных сравнительной оценке последствий взрыва на основе различных подходов. Например, в работе [9] для оценки последствий взрыва использовались упрощенные эмпирические модели. Тем не менее, в большинстве случаев для оценки степени уязвимости людей используется методология, принятая международным сообществом и основанная на вероятностных моделях. Результаты расчета с использованием различных подходов имеют некоторые различия, однако все воспроизводят реальный ущерб и предсказывают последствия произошедшего взрыва с достаточной точностью.

Среди российских ученых также ведутся работы по систематизации результатов исследований по поражающему воздействию воздушных ударных волн при взрывах газопаровоздушных смесей. Так, в работе [10] получены различные эмпирические зависимости основных параметров воздушной ударной волны от расстояния на основе универсального метода энергетического подобия. Разработана методика расчета мощности поражающего действия для человека, находящегося в укрытиях различной степени защиты.

Простейший пример оценки шумового воздействия при взрывах топливно-воздушных смесей представлен в источнике [11]. По сведениям, представленным в данной работе, можно определить расстояние от эпицентра взрыва, на котором наблюдается уровень звукового давления в 140 дБ, являющийся критической величиной для слухового анализатора человека.

Данная статья направлена на разработку подхода по выявлению расчетных значений вероятности возникновения события — воздействия ударной нагрузки на человека и объекты окружающей среды вследствие возможного взрыва топливно-воздушной среды с учетом особенностей застройки на местности, которые определяются по специально введенной формуле. Такой расчет проводится в единой расчетной парадигме с возможностью задания исходных параметров и наглядного представления результатов для пользователя.

Анализ ранее описанных материалов исследований позволил установить, что характер и динамика протекания и последствия аварийных ситуаций на отдельно стоящих АЗС напрямую зависят от особенностей окружающей местности. Недостатком проанализированных методик является отсутствие в расчетах фактора, учитывающего особенности застройки местности. К объектам, которые необходимо рассматривать могут относиться остановки общественного транспорта, жилые дома, регулируемые пешеходные переходы, другие автозаправочные станции. Для них свойственно близкое расположение к местам одновременного скопления и даже массового пребывания людей с численностью от 50 человек и выше.

Авторы проанализировали и другой тип материалов — нормативно-правовые акты Российской Федерации и пришли к выводу, что в настоящее время существует некоторая правовая неопределённость в применении ряда понятий, используемых при обосновании подходов к размещению и проектированию АЗС на территории населённых пунктов. В частности, понятие «место массового пребывания людей», введенное законом «О противодействии терроризму»<sup>3</sup>, означает одновременное нахождение в определённом месте 50 и более человек. Постановлением Правительства Российской Федерации<sup>4</sup> проведено ранжирование этих мест по трём категориям: с численностью до 200 человек — третья категория, до 1000 человек — вторая и более 1000 человек — первая. Объект с массовым пребыванием людей — это здание или сооружение (кроме жилых

<sup>3</sup> О противодействии терроризму. Федеральный закон №35-ФЗ от 06.03.2006. КонсультантПлюс: URL: [http://www.Consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_58840/](http://www.Consultant.ru/document/cons_doc_LAW_58840/) (дата обращения: 20.04. 2023).

<sup>4</sup> Об утверждении требований к антитеррористической защищённости мест массового пребывания людей и объектов (территорий), подлежащих обязательной охране войсками национальной гвардии Российской Федерации, и форм паспортов безопасности таких мест и объектов (территорий). Постановление Правительства Российской Федерации. № 272 от 25.03.2015 г. (ред. от 29.07.2020 г.). Электронный фонд правовых и нормативно технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420264843?section=text> (дата обращения: 20.04. 2023).

домов), в котором может одновременно находиться 50 и более человек<sup>5</sup>. То есть чтобы обосновывать риск размещения потенциально опасного объекта или места с массовым пребыванием людей необходимо рассматривать только объекты с численностью от 50 и более человек. Представить себе транспортную остановку с одновременным нахождением более 50 человек при нынешней насыщенности городов общественным транспортом достаточно сложно. Действующие документы, регламентирующие размещение заправочных станций, НПБ–111–98\* и СП156.13130.2014<sup>6,7</sup> устанавливают конкретные нормативы удалённости АЗС от тех или иных объектов, зданий и сооружений, дорог общего пользования и др. Однако вместо понятия «остановка общественного транспорта» используется, как правило, формулировка «место массового пребывания людей». Поскольку жизнь человека является наивысшей ценностью и безусловным приоритетом при обосновании любых подходов, представляется целесообразным уменьшить порог численности мест (объектов) массового пребывания людей или ввести понятие «место скопления людей» с установлением численности в 20 и более человек. Тогда под такое определение будут попадать остановки общественного транспорта, регулируемые и нерегулируемые переходы и пр.

Таким образом напрашивается вывод, что использование сложившихся подходов к оценке последствий возможных взрывов на заправочных станциях способно привести к пересмотру нормативов их расположения в границах населённых пунктов, степени их противоаварийной защищённости и защищённости объектов, находящихся в зоне возможного воздействия негативных факторов взрыва.

**Материалы и методы.** Достижение поставленной в работе цели осуществлялось на основе применения аналитического моделирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей с оценкой плотности застройки на территории опасного объекта. Такой подход позволяет уточнить характеристику типа окружающего пространства, выразив его не только качественной, но и количественной мерой и обосновать необходимость и приоритетность выполнения защитных мероприятий для снижения возможных рисков и ущерба.

Методы выполнения основных расчетов основаны на использовании положений методики [8], позволяющей определять последствия детонационного или дефлаграционного горения топливно-воздушных смесей, содержащих пропан, метан или бензин. Дополнительно использовались измерительные инструменты площади или длины, существующие в 2GIS и подобных программах. Это дало возможность выполнения онлайн-измерений площадей или длин на отображаемой местности.

В качестве расчетных параметров оценивались параметры, заложенные в вышеуказанном руководстве [3] с учетом положений [6]: существенные или полные структурные повреждения зданий, вероятность разрыва барабанной перепонки, выживания в результате отброса волной давления или повреждения легких. Благодаря доступности математической логики вычислений возможна реализация оценки последствий в результате действия осколков как вторичных факторов поражения.

Всего были проанализированы особенности местности вблизи семнадцати заправочных станций, расположенных на территории г. Ижевска, на которых используются такие виды топлива как пропан, метан или бензин. Характерные объекты, представляющие ключевой интерес представлены в таблице 1. По понятным причинам данные объекты обезличены.

Таблица 1

Характеристика исследованных объектов

№ п/п	Вид топлива	Особенности расположения, в т.ч. близость подобных объектов	Возможность скопления людей
1.	Пропан	В зоне прямой видимости располагается АЗС на расстоянии 95 м, рядом с которой размещена автобусная остановка	Нет
2.	Метан	Автобусная остановка на расстоянии в 60 м	Да
3.	Пропан	Высотное здание (5 и более этажей) на расстоянии 25 м	Нет, но возможно действие вторичных факторов взрыва — осколков стекла
4.	Бензин	В зоне прямой видимости расположена автотранспортная остановка, а также 5-ти этажное жилое здание	Да

<sup>5</sup> Об утверждении Правил противопожарного режима Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации. №1479 от 16.09.2020 г. Электронный фонд правовых и нормативнотехнических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565837297?section=text> (дата обращения: 20.04. 2023).

<sup>6</sup> Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности. Свод правил СП 156.13130.2014. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110842> (дата обращения: 20.04. 2023).

<sup>7</sup> Автозаправочные станции. Требования пожарной безопасности. Нормы пожарной безопасности. НПБ 111-98\*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000020> (дата обращения: 20.04.2023).

**Результаты исследования.** Перед выполнением расчетов ставились две задачи, необходимые для проверки достоверности вычислений:

- оценка правильности расчетов вероятностей оценочных параметров на основе вероятностной функции;
- оценка правильности измерения площадей и длин применительно к объектам на местности.

Проверка правильности и полноты решения первой задачи была выполнена на условиях решения задачи, приведенной в примере № 1 методики [3]. Решение второй задачи было подтверждено в эксперименте с использованием измерительной «линейки» на сайте публичной кадастровой карты Удмуртской Республики<sup>8</sup>. Использование характерных точек измерения в измерительном эксперименте на кадастровой карте показало результаты измерений по длине. Отсюда был сделан вывод о достоверности измерения и площадей на местности. Пояснение принципа выполнения измерений представлено на рис. 1 (получен авторами с использованием публичной кадастровой карты <https://egrp365.org/map/?id=g2ApXz>), визуальное отображение результата расчетов — на рис. 2.

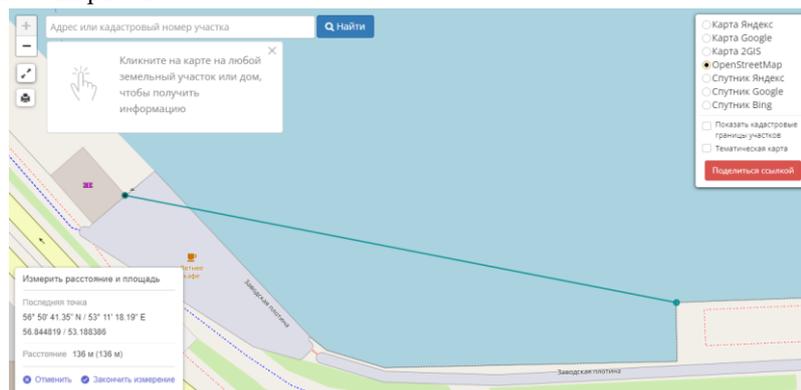


Рис. 1. Измерения по публичной кадастровой карте



Рис. 2. Визуальное представление расчетной зоны, для границы которой определялись вероятности последствий

Следующим этапом модельного эксперимента явилась оценка коэффициента плотности застройки на территории выбранных объектов. Графическое отображение измеренных площадей также представлено на рис. 2.

Коэффициент плотности застройки  $\rho$  определялся по формуле:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n S_n}{S_{ref}}, \quad (1)$$

где  $n$  — число измеренных участков;  $S_n$  — площадь одного измеренного участка, м<sup>2</sup>;  $S_{ref}$  — базовая площадь, м<sup>2</sup>.

В качестве базовой площади была выбрана площадь окружности радиусом 100 м. Для всех проанализированных АГЗС коэффициент плотности застройки не превышает величину в 26,7 %. Следует отметить, что в эту величину не входит площадь зеленых насаждений типа кустарников или деревьев, которые в летний период в определённой степени выполняют барьерные функции в связи с наличием листвы, но в зимнее время не приводят к снижению воздействия воздушной ударной волны. При коэффициенте плотности в

<sup>8</sup> Публичная кадастровая карта Удмуртской Республики. ЕГРП 365 проверка недвижимости. URL: <https://egrp365.org/> (дата обращения: 20.04.23).

26,7 %, в соответствии с определениями [3], обстановку можно характеризовать как слабо загроможденную. Практически нужно учитывать направленность постройки по отношению к эпицентру взрыва и материал, из которого она построена. Из семнадцати исходных объектов было выбрано четыре, как удовлетворяющие критериям исследования. Далее на основе измеренных значений расстояний до мест возможного массового пребывания людей определялись вероятности возникновения событий — поражающих факторов взрыва топливно-воздушной смеси. Результаты исследований и вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты вычислений модельного эксперимента

№ объекта п/п	Коэфф-т плотности застройки/ радиус расчета, м	Вероятности поражающих факторов, %				
		Серьезные структурные повреждения зданий, P1	Полные разрушения зданий, P2	Вероятность разрыва барабанной перепонки, P3	Вероятность выживания в результате отброса волной давления, P4	Повреждения легких, P5
1.	0/95	84	27,1	2,2	1,4	0
2.	13,2/60	23	2,9	0,7	0,6	0
3.	22,4/25	92,6	39,6	4,4	29,1	0
4.	26,7/60	87,6	31,7	2,9	23,6	0

Исходя из анализа полученных результатов (таблица 2), можно констатировать, что вероятности травмирования людей находятся на достаточном высоком уровне, при этом они могут быть снижены проведением специальных мероприятий — сооружением барьеров на пути распространения негативных факторов взрыва.

**Обсуждение и заключения.** Как показало выполненное исследование, прогнозирование последствий взрывов топливно-воздушных смесей может быть оправдано наличием характерных особенностей местности вблизи автозаправочных станций с такими видами топлива как бензин, пропан или метан. Особенности местности, как правило, заключаются в том, что в зоне значимых последствий могут находиться места массового пребывания или скопления людей, например, остановки общественного транспорта.

С точки зрения полноты проявления последствий возможны два варианта:

- как в зимнее, так и в летнее время барьерные препятствия могут отсутствовать;
- наличие зеленых насаждений в зимнее время оказывает слабый барьерный эффект по отношению к объектам поражения. Выявление таких опасных объектов может быть произведено при комплексном рассмотрении всей территории населенного пункта.

Обосновано, что измерение плотности застройки может быть определено как отношение площади объектов, заключенных в окружности целевого диаметра к площади данной окружности. Для проведения исследования были рассчитаны последствия взрыва топливно-воздушных смесей на основе вероятностной функции. Такой подход зарекомендовал себя, в том числе в международной практике, с положительной стороны. Он способен дать точные прогнозные результаты с меньшими вычислительными затратами, по сравнению с вычислительными процедурами. Новизной, реализованной в проекте, является использование модуля «Линейка», позволяющее оценивать площади и линейные расстояния на географической карте местности. Данный модуль позволяет определять коэффициент плотности застройки, как отношение суммы площадей к площади окружности радиусом в 100 м, хотя данное расстояние может быть любым. При этом центром окружности является «условная» середина автозаправочной станции. В лучшем случае следует учитывать относительное расположение зданий или сооружений, расположенных вблизи целевого объекта, которое может быть, как «продольное» или «поперечное» к эпицентру.

В соответствии с результатами измерений для наблюдаемых в рамках данного исследования объектов, коэффициент их плотности застройки не превышает 26,7 %, что позволяет характеризовать тип окружающего пространства как «открытое» или «слабо загроможденное» в соответствии с [3], и таким образом подтверждается количественно.

Как показали результаты расчетов, вероятность выживания человека при отбросе волной давления для двух из 4-х автозаправочных станций находится на уровне 29,1 % и 23,6 %. Сравнение с предельно-допустимыми значениями не представляется возможным в связи с отсутствием таковых. Однако по отношению к приемлемой вероятности эти величины являются существенными. Приемлемая вероятность может быть рассчитана как

значение вероятности данного критерия для расстояния, указанного в методике [3]. Для АЗС жидкого моторного топлива с наземными резервуарами, расположенных вне территорий населенных пунктов, минимальные расстояния от них до таких объектов, как места массового скопления людей должны составлять не менее 50 м.

Предложено ввести понятие «место скопления людей», как место, на котором может одновременно находиться 20 и более человек. К ним предложено отнести остановки общественного транспорта, регулируемые и нерегулируемые переходы, в том числе наземные, подземные и пр.

Доступность и простота использованной методики с использованием открытых картографических данных даёт возможность проведения данных видов вычислений. Результаты картографических исследований наряду с вычислительными процедурами показали, что в настоящее время среди АЗС или АГЗС существуют те, которые характеризуются возможностью скопления людей на близких расстояниях от них.

Как показало исследование, наличие условий допускающих вероятность взрывов достаточно распространено, хотя их реализация носит эпизодический характер. Возможно их возникновение обусловлено историческими причинами. Вышеупомянутые остановки общественного транспорта и тому подобные некапитальные объекты при проектировании и строительстве АЗС могут и не существовать, и быть установлены решением местных администраций значительно позже. Применение предлагаемого подхода даёт возможность контролировать их расположение и уровень риска от возможных взрывов на заправочных станциях в условиях реальной обстановки.

В конечном итоге, предлагаемый подход к оценке последствий взрывов топливно-воздушных смесей позволяет оперативно в реальном масштабе времени и в соответствии с реальной обстановкой в районе расположения АЗС оценить возможные риски и спланировать конкретные мероприятия по их минимизации.

#### Список литературы

1. Шахманов Ф.Ф. *Риск-ориентированный метод осуществления пожарного надзора автомобильных газозаправочных станций*. Дис. докт. техн. наук. Москва; 2018. 115 с.
2. Liu Y., Kong Z., Zhang Q. Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018;164:325–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.028>
3. Иванов Е.А., Аганов А.А., Буйко К.В. и др. *Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах*. Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»; 2010. 208 с.
4. Zhou X.Q., Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(5):363–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003>
5. Liang H., Wang T., Luo Z., et al. Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas Explosion in a Limited Space. *ACS Omega*. 2021;6(38):24683–24692. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03430>
6. *Green Book. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials. Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances*. The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment. CPR 16E, Second Edition, 2005, 337 p.
7. Balocki James B. (Secretary of the Navy) *Northwest Training and Testing. Final Supplemental Environmental Impact Statement/Overseas Environmental Impact Statement (SEIS/OEIS)*. Appendix D Acoustic and Explosive Concepts: U.S. Navym, 2022. 26 p. URL: [https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/final\\_seis/section/NWTT\\_Final\\_SEIS\\_Sept2020\\_Appendix\\_D\\_Acoustic\\_and\\_Explosive\\_Concepts.pdf](https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/final_seis/section/NWTT_Final_SEIS_Sept2020_Appendix_D_Acoustic_and_Explosive_Concepts.pdf) (дата обращения: 18.09.2022).
8. Zhang J., Xu K., You G., et al. Causation Analysis of Risk Coupling of Gas Explosion Accident in Chinese Underground Coal Mines. *Risk Analysis*. 2019;39(7):1634–1646. <https://doi.org/10.1111/risa.13311>
9. Lobato J., Rodríguez J., Jiménez C., et al. Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. 2009;66(543). URL: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/279547> (дата обращения: 27.09.2022).
10. Гришкевич А.А., Филин В.А., Ушаков В.С., Маньковский Г.И. *Оценка мощности взрывов газопаровоздушных смесей при аварийных проливах сжиженного природного газа*. Системы безопасности. Security and Safety. Каталог «Пожарная безопасность — 2017». 2017. С. 46–52. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/otsenka-moschnosti-vzryvov-gazoparovozdushnyh-smesey-pri-avariynyh-prolivah-szhizhennogo-prirodnogo-gaza> (дата обращения: 24.11.2022).
11. *Formulae for ammunition management: International Ammunition Technical Guidelines IATG 01.80:2021[E]*. Third edition. United Nations Office for Disarmament Affairs; 2021. 1331 p.

## References

1. Shakhmanov FF. *Risk-orientirovannyi metod osushchestvleniya pozhnogo nadzora avtomobil'nykh gazozapravochnykh stantsii*. Author's thesis. Moscow; 2018. 115 p. (In Russ.).
2. Liu Y, Kong Z, Zhang Q. Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018;164:325–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.028>
3. Ivanov EA, Aganov AA, Buiko KV, et al. *Metodiki otsenki posledstviy avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh*. Collection of documents. Ser. 27. Iss. 2. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Scientific and Technical Center of Industrial Safety Problems Research (Closed Joint Stock Company); 2010. 208 p. (In Russ.).
4. Zhou XQ, Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(5):363–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003>
5. Liang H, Wang T, Luo Z, et al. Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas Explosion in a Limited Space. *ACS Omega*. 2021;6(38):24683–24692. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03430>
6. *Green Book. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials. Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances*. The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment. CPR 16E, Second Edition, 2005, 337 p.
7. Balocki James B. (Secretary of the Navy) *Northwest Training and Testing. Final Supplemental Environmental Impact Statement/Overseas Environmental Impact Statement (SEIS/OEIS)*. Appendix D Acoustic and Explosive Concepts: U.S. Navym, 2022. 26 p. URL: [https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/final\\_seis/section/NWTT\\_Final\\_SEIS\\_Sept2020\\_Appendix\\_D\\_Acoustic\\_and\\_Explosive\\_Concepts.pdf](https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/final_seis/section/NWTT_Final_SEIS_Sept2020_Appendix_D_Acoustic_and_Explosive_Concepts.pdf) (accessed 18.09.2022).
8. Zhang J, Xu K, You G, et al. Causation Analysis of Risk Coupling of Gas Explosion Accident in Chinese Underground Coal Mines. *Risk Analysis*. 2019;39(7):1634–1646. <https://doi.org/10.1111/risa.13311>
9. Lobato J, Rodríguez J, Jiménez C, et al. Consequence analysis of an explosion by simple models: Texas refinery gasoline explosion case. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. 2009;66(543). URL: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/279547> (accessed 27.09.2022).
10. Grishkevich AA, Filin VA, Ushakov VS, Mankovskii GI. *Otsenka moshchnosti vzryvov gazoparovozdushnykh smesei pri avariynykh prolivakh szhizhennogo prirodnogo gaza*. Sistemy bezopasnosti. Security and Safety. Katalog «Pozharnaya bezopasnost' — 2017». 2017. P. 46–52. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/otsenka-moshchnosti-vzryvov-gazoparovozdushnykh-smesei-pri-avariynykh-prolivakh-szhizhennogo-prirodnogo-gaza> (accessed 24.11.2022). (In Russ.).
11. *Formulae for ammunition management: International Ammunition Technical Guidelines IATG 01.80:2021[E]*. Third edition. United Nations Office for Disarmament Affairs; 2021. 1331 p.

Об авторах:

**Тюрин Александр Павлович**, профессор кафедры «Техносферная безопасность», Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (426069, РФ, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), доктор технических наук, доцент, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [asd1978@mail.ru](mailto:asd1978@mail.ru)

**Янников Игорь Михайлович**, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова (426069, РФ, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), доктор технических наук, доцент, [imyannikov@mail.ru](mailto:imyannikov@mail.ru)

Заявленный вклад соавторов:

А.П. Тюрин — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. И.М. Янников — анализ результатов исследований, доработка текста, формирование выводов, корректировка выводов.

Поступила в редакцию 10.04.2023.

Поступила после рецензирования 20.04.2023.

Принята к публикации 23.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*About the Authors:*

**Aleksandr P Tyurin**, professor of the Technosphere Safety Department, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, RF), Dr. Sci. (Eng), associate professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [asd1978@mail.ru](mailto:asd1978@mail.ru)

**Igor M Yannikov**, professor of the Technosphere Safety Department, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, RF), Dr. Sci. (Eng), associate professor, [imyannikov@mail.ru](mailto:imyannikov@mail.ru)

*Claimed contributorship:*

AP Tyurin: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions. IM Yannikov: analysis of the research results, revision of the text, formulation of the conclusions, correction of the conclusions.

**Received** 10.04.2023.

**Revised** 20.04.2023.

**Accepted** 23.04.2023.

*Conflict of interest statement*

The authors do not have any conflict of interest.

*All authors have read and approved the final manuscript.*