

ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОЖАРНОГО РИСКА ОБЪЕКТОВ НЕФТЕПРОДУКТООБЕСПЕЧЕНИЯ

Д.В. Седов,

преподаватель кафедры пожарной
безопасности технологических
процессов, зданий и сооружений
ФГОУ ВПО ВСИ МВД России

Представлены результаты оценки индивидуального пожарного риска объектов нефтепродуктообеспечения на примере нефтебазы в Иркутской области. С помощью полученного распределения риска по территории объекта установлены участки с наибольшей опасностью для персонала.

Results of individual fire risk estimation of petroleum maintenance objects on a tank farm example in the Irkutsk region are presented. By means of the received risk distribution on object territory sites with the greatest danger to the personnel are established.*

Россия находится на 11-м месте среди стран с крупнейшими запасами нефти и нефтепродуктов, которые составляют 6,3 % от мирового. Поэтому обеспечение безопасности хранения нефти и нефтепродуктов в России является актуальной задачей. Однако, несмотря на постоянное совершенствование превентивных мероприятий, пожары на нефтебазах случаются довольно часто. Только с 1990 по 2007 г. на территории России зарегистрировано 238 пожаров в резервуарах, прежде всего в надземных (93,3 %). Основными причинами пожаров являлись проявления атмосферного и статического электричества, самовозгорание пиррофоров, механические удары при отборе проб и замерах уровня жидкости, искры электроустановок, технологические огневые устройства. Пожары на нефтебазах носят затяжной характер, приводят к огромным материальным ущербам и гибели людей. Поэтому вопросы профилактики таких пожаров остаются крайне важными.

Профилактическая работа по снижению пожарной опасности объекта на современном этапе начинается, в основном, с оценки индивидуального пожарного риска, показателя, который отражает пожарную опасность объекта для жизни людей. В настоящее время для определения величины индивидуального пожарного риска производственных предприятий предложена методика. В силу того, что нравственные устои нашей страны не позволяют измерять человеческую жизнь в денежных или других единицах ущерба, индивидуальный пожарный риск в данной методике определяется как вероятность гибели человека в результате воздействия на него опасных факторов пожара. Опыт применения методики ограничен в силу ее новизны¹.

* Sedov D.V. Individual fire risk estimation of petroleum maintenance objects.

Поэтому представляется актуальным обсуждение аспектов ее практической реализации на примере таких стратегически важных объектов, как нефтебазы.

Общая характеристика нефтебазы

Объектом исследования является нефтебаза (рис. 1), схема размещения объектов и технологического процесса которой являются традиционными для Иркутской области.

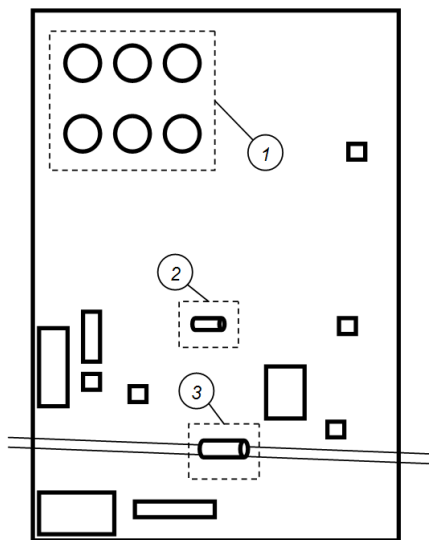


Рис. 1. Схема размещения наиболее опасных участков нефтебазы: 1 – резервуарный парк; 2 – эстакада для загрузки автоцистерн; 3 – эстакада для выгрузки железнодорожной цистерны; прямоугольниками обозначены административно-бытовые, складские здания, насосные и др.

Резервуарный парк состоит из 6 вертикальных стальных резервуаров РВС-2000. Нефтепродукты на нефтебазу поступают с заводов-производителей по железной дороге в цистернах. Здесь они самотеком или с помощью насосного оборудования сливаются для хранения в резервуары. Затем с помощью насосного оборудования нефтепродукты переливаются в автоцистерны и транспортируются оптовым покупателям.

На территории нефтебазы можно выделить три наиболее опасных участка: резервуарный парк, автоцистерна, находящаяся на загрузочной эстакаде, и железнодорожная цистерна, расположенная на эстакаде выгрузки.

Анализ опасности аварии железнодорожной цистерны

Выход перевозимых нефтепродуктов из железнодорожной цистерны в окружающее пространство возможен либо в результате утечки из-за образования трещин и неплотностей в котле и арматуре цистерны, либо при пробое котла, например, в результате опрокидывания цистерны. Образование

неплотностей или щелей в корпусе цистерны может произойти из-за накапливания усталостных напряжений металла, коррозии, расслоения сварных швов или биметалла, брака при изготовлении технических элементов. Кроме того, могут терять герметичность разгрузочные узлы цистерны и запорная арматура. Развинчивание болтов и других соединяющих элементов, деформация силовых запорных устройств могут приводить к образованию щелей и зазоров задвижек и клапанов. Как показывает практика, если авария в результате вышеуказанных причин будет обнаружена своевременно, то масштабы ее будут незначительными, так как при подобных утечках жидкость выходит сравнительно медленно. К тому же стоянка цистерн с нефтепродуктами на территории нефтебазы не осуществляется. Разгрузка прибывающих цистерн производится в течение 1–2 часов под наблюдением персонала.

При опрокидывании же котла цистерны произойдет его удар о землю с образованием пробоя либо в месте удара, либо в месте крепления сливного устройства к котлу (при переворачивании цистерн сливное устройство часто отрывается), в результате чего все содержимое цистерны выйдет в окружающее пространство. В результате трения цистерны о землю образуется множество искр и нагретых поверхностей, которые могут привести к воспламенению разлитого нефтепродукта. Однако в силу малых скоростей движения цистерны по территории нефтебазы (не более $5 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$) удар при опрокидывании цистерны может оказаться недостаточно сильным для образования пробоя. Но можно утверждать, что он произойдет, если котел цистерны будет находиться в предаварийном состоянии, т.е. его герметичность будет ослаблена в результате коррозии и других разрушительных процессов, возникающих при длительной эксплуатации.

Таким образом, выход нефтепродукта из цистерны возможен при реализации двух независимых событий: ослаблении герметичности котла и опрокидывании цистерны. Опрокидывание цистерны возможно в результате реализации хотя бы одного из следующих событий: отказа тележки и отказа рамы цистерны. К отказу тележки в свою очередь может привести отказ рамы тележки и отказ колесной пары. Причины ослабления герметичности котла указаны выше. Структурная схема возникновения аварии железнодорожной цистерны представлена на рис. 2.

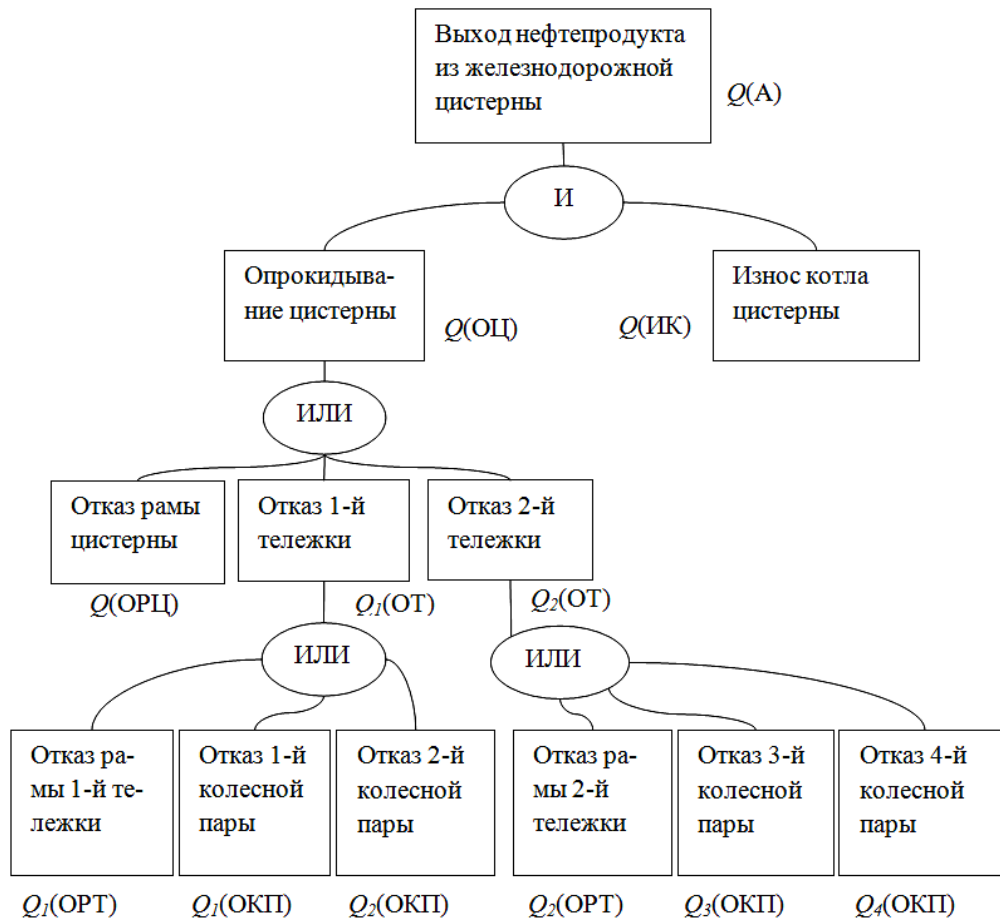


Рис. 2. Структурная схема возникновения аварии железнодорожной цистерны

Вероятности того, что инициирующие события – отказ рамы цистерны (ОРЦ), отказ колесной пары (ОКП), отказ рамы тележки (ОРТ), износ котла в результате коррозии обечайки и расслоения швов (ИК) – могут произойти в течение 1 года, были рассчитаны по экспоненциальному закону распределения вероятностей на основе информации об интенсивностях отказов элементов цистерн, взятых из справочного пособия² (интенсивности отказов соответственно равны $\lambda(\text{ОРЦ}) = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda(\text{ОКП}) = 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda(\text{ОРТ}) = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda(\text{ИК}) = 8 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$). Вероятности инициирующих событий составили: $Q(\text{ОРЦ}) = 1,3 \cdot 10^{-2}$ в год; $Q(\text{ОКП}) = 2,3 \cdot 10^{-3}$ в год; $Q(\text{ОРТ}) = 1,8 \cdot 10^{-2}$ в год; $Q(\text{ИК}) = 7 \cdot 10^{-3}$ в год. Расчет по представленной выше структурной схеме показал, что вероятность аварии цистерны с выбросом нефтепродукта $Q(A) = 4,1 \cdot 10^{-4}$ в год.

В случае аварии железнодорожной цистерны возможны следующие опасные для человека сценарии развития событий (рис. 3): 1) мгновенное воспламенение нефтепродукта (сценарий A_1), при котором волны избыточного давления не образуется, так как паровоздушное взрывоопасное облако не успевает образоваться; 2) воспламенение разлива спустя некоторое время без образования волн избыточного давления (сценарий A_2) взрывоопасное облако рассеивается из-за действия ветрового потока; 3) воспламенение разлива спустя

некоторое время с образованием волн избыточного давления (сценарий A_3). Опасность первого и второго сценариев связана с тепловым излучением из зоны горения, третьего – с образованием взрывной волны.

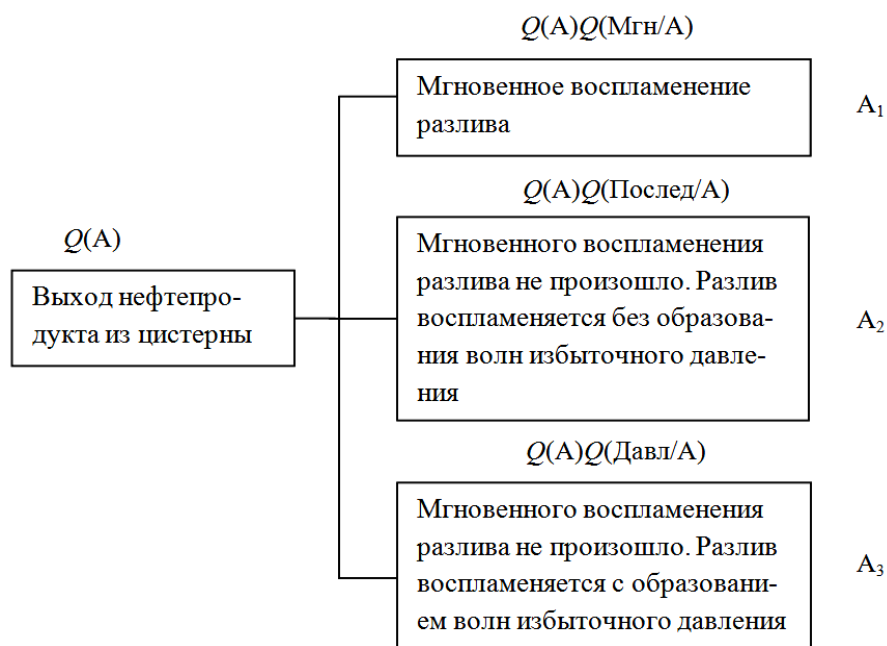


Рис. 3. Логическая схема развития аварии железнодорожной цистерны

Значения условных вероятностей мгновенного воспламенения нефтепродукта при его разливе [$Q(\text{Мгн}/A) = 0,05$], последующего загорания без образования волн избыточного давления [$Q(\text{Послед}/A) = 0,061$] и последующего загорания с образованием волн избыточного давления [$Q(\text{Давл}/A) = 0,1$]³. Таким образом, вероятности реализации различных сценариев развития аварии железнодорожной цистерны составили: $Q(A_1) = 2,1 \cdot 10^{-5}$ в год, $Q(A_2) = 2,5 \cdot 10^{-5}$ в год, $Q(A_3) = 4,1 \cdot 10^{-5}$ в год.

Далее были определены значения опасных факторов пожара и взрыва для рассматриваемых сценариев аварии на различном расстоянии от эпицентра аварии. При расчете было принято, что объем цистерны составляет $61,3 \text{ м}^3$, степень ее заполнения – 0,95, нефтепродукт – бензин, 1 л которого разливается на $0,15 \text{ м}^2$ производственной площадки⁴, температура окружающей среды была принята равной максимальной для Иркутской области (37°C)⁵. Так, в частности, было установлено, что интенсивность теплового излучения будет настолько высокой, что на расстоянии 100 м от центра разлива человек получит ожог первой степени через 15–20 с⁶. Избыточное давление ударной волны при пожаре-вспышке представляет опасность для человека на всей территории нефтебазы (безопасная зона находится на расстоянии более 400 м от эпицентра).

Полученные данные позволили рассчитать территориальное распределение условных вероятностей поражения человека для различных

сценариев развития аварии железнодорожной цистерны. Условные вероятности поражения человека в каждой точке территории нефтебазы рассчитывались по формуле:

$$Q(\text{Пораж}/A_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} e^{-\frac{U^2}{2}} dU,$$

где i – порядковый номер сценария;

$\text{Pr} = f(\sqrt{x^2 + y^2})$ – зависимость «пробит»-функции от расстояния между эпицентром и точкой, в которой определяется опасность для человека (x и y – координаты в прямоугольной системе координат, центр которой совпадает с эпицентром аварии);

U – параметр, равный Pr .

После этого были проведены расчеты потенциального риска P , который характеризует опасность в определенной точке пространства, т.е. показывает вероятность гибели человека, если бы этот человек постоянно находился в данной точке. Было получено территориальное распределение потенциального риска для аварии железнодорожной цистерны с бензином:

$$P(\text{ЖДЦ}) = \sum_i Q(\text{Пораж}/A_i) Q(A_i).$$

Графическая иллюстрация полученного распределения потенциального риска по территории нефтебазы представлена на рис. 4.

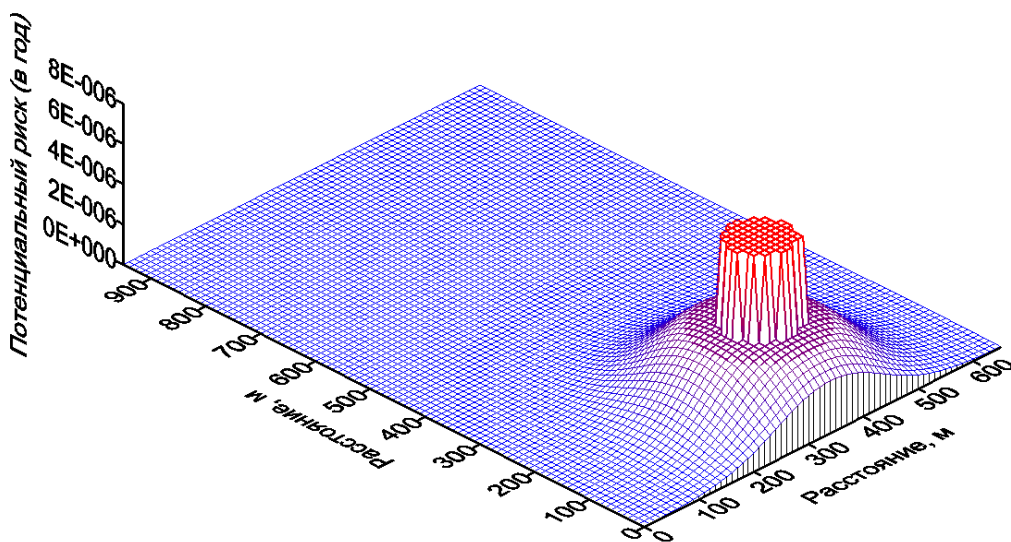


Рис. 4. Трехмерная диаграмма распределения потенциального риска $P(\text{ЖДЦ})$ для аварии железнодорожной цистерны с бензином

Из рис. 4 видно, что в эпицентре аварии находится высокая «колонка» потенциального риска $P(\text{ЖДЦ})$ (максимальное значение равно $8 \cdot 10^{-6}$ в год). Диаметр данной «колонки» равен диаметру разлива бензина. Дело в том, что внутри зоны разлива условная вероятность поражения человека тепловым излучением равна 1. За границами интенсивность излучения скачкообразно уменьшается, что приводит к резкому снижению потенциального риска. Величина же избыточного давления по мере удаления от эпицентра уменьшается плавно. В результате суммарная опасность теплового излучения и избыточного давления взрыва при удалении от места аварии снижается так, как показано на рис. 4.

Анализ опасности аварии автоцистерны

Разгерметизация автомобильной цистерны на территории нефтебазы может произойти, прежде всего, из-за ошибки человека или нарушения правил транспортировки нефтепродуктов (опрокидывание автоцистерны после наезда на препятствие, либо в результате гидродинамического удара, если уровень жидкости в цистерне ниже требуемого, пробой цистерны при столкновении с другим автомобилем или сооружением). Поэтому вероятность рассматриваемой аварии нельзя определить только на основе отказов ее технических элементов. Анализ многолетних статистических данных показал, что вероятность разгерметизации автоцистерны составляет $Q(\text{Б}) = 4,75 \cdot 10^{-6}$ в год.

Сценарии развития данной аварии, которые представляют непосредственную угрозу жизни человека, аналогичные тем, которые были рассмотрены при аварии железнодорожной цистерны. Получено, что вероятность мгновенного воспламенения разлива нефтепродукта $Q(\text{Б}_1) = 2,3 \cdot 10^{-6}$ в год, вероятность того, что разлив воспламенится через некоторое время без образования волн избыточного давления $Q(\text{Б}_2) = 2,9 \cdot 10^{-6}$ в год, вероятность немгновенного воспламенения с образованием ударной волны $Q(\text{Б}_3) = 4,8 \cdot 10^{-7}$ в год.

Исходные данные для расчета поражающих факторов пожара и взрыва аналогичны тем, которые были приняты при анализе аварии железнодорожной цистерны. В качестве нефтепродукта рассматривался бензин, объем автоцистерны составлял 23 м^3 . Распределение потенциального риска по территории нефтебазы в случае аварии автоцистерны с бензином определялось также по методике⁷. Результаты расчетов представлены в виде диаграммы на рис. 5.

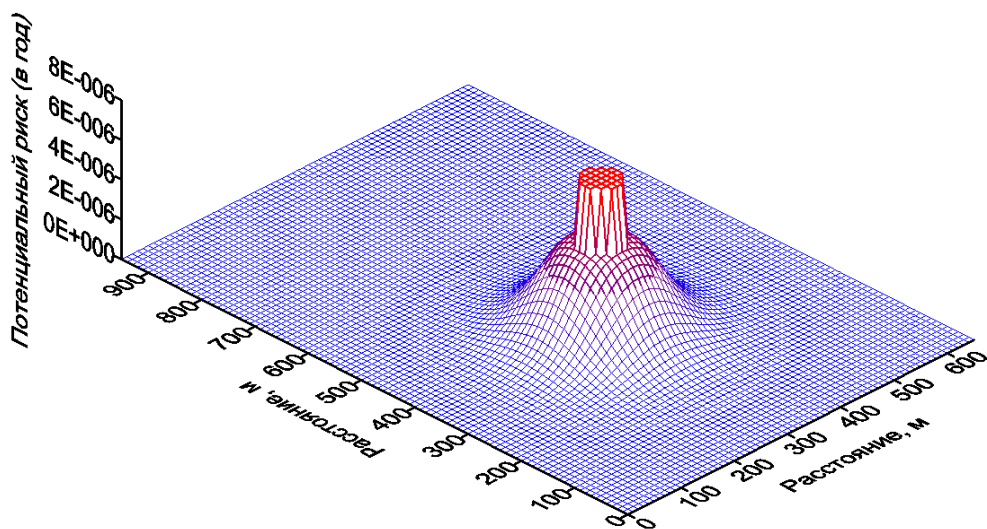


Рис. 5. Трехмерная диаграмма распределения потенциального риска $P(AЦ)$ для аварии автоцистерны с бензином

Как и в случае аварии железнодорожной цистерны, опасность аварии автоцистерны для человека резко возрастает внутри границы разлива бензина. Если приближаться к эпицентру аварии, то начало скачкообразного увеличения потенциального риска отмечается на границе зоны разлива. Максимальное значение потенциального риска $P(AЦ)$ составило $7,87 \cdot 10^{-6}$ в год.

Анализ опасности аварии резервуаров РВС-2000

Как было отмечено выше, на территории нефтебазы расположено 6 резервуаров РВС-2000 с бензином. Суммарную опасность аварии, которую данные резервуары представляют для человека, можно проанализировать, если сначала рассмотреть опасность аварии одного резервуара.

Повреждение резервуара возможно в результате усталостных напряжений металла, коррозионных процессов, при внешнем механическом воздействии. Последствиями повреждения могут явиться либо локальное, либо полное (квазимгновенное) его разрушение. В первом случае нефтепродукт будет постепенно выходить из резервуара, пока уровень жидкости не достигнет нижнего края отверстия (в наихудшем случае аварийное отверстие образуется на уровне основания резервуара). Во втором случае вся жидкость практически сразу выйдет в окружающую среду и заполнит обвалование. Таким образом, площадь разлива, как в первом, так и во втором случае, будет равна площади обвалования. Однако в связи с тем, что на территории нефтебазы организовано постоянное патрулирование и осмотр резервуарного парка, то в случае локального повреждения постепенное истечение нефтепродукта будет замечено и опасность более тяжелых последствий ликвидирована. Поэтому данный вариант аварии можно исключить из рассмотрения. Что касается мгновенного разрушения резервуара, то оно сразу же создаст угрозу дальнейшего развития

аварии. Для вероятности полного разрушения резервуара в литературе приводятся различные данные: от $3 \cdot 10^{-7}$ в год⁸ до 10^{-5} в год⁹. Ориентируясь на наиболее опасный вариант, считаем целесообразным принять вероятность полного разрушения равной $Q(B) = 10^{-5}$ в год.

Сценарии развития аварии резервуара будут аналогичными тем, которые рассматривались при аварии железнодорожной цистерны и автоцистерны. Вероятность того, что после разрушения резервуара образовавшийся разлив бензина мгновенно воспламенится, составила $Q(B_1) = 5 \cdot 10^{-7}$ в год. Вероятность немгновенного воспламенения без возникновения пожара-вспышки и образования ударной волны составила $Q(B_2) = 6,1 \cdot 10^{-7}$ в год. Вероятность того, что разлив воспламенится через некоторое время, и при этом образуются волны избыточного давления, получилась равной $Q(B_3) = 10^{-6}$ в год.

Дальнейшие расчеты были проведены в соответствии с вышеописанным алгоритмом. На рис. 6 представлена диаграмма распределения потенциального риска в случае аварии одного резервуара РВС-2000.

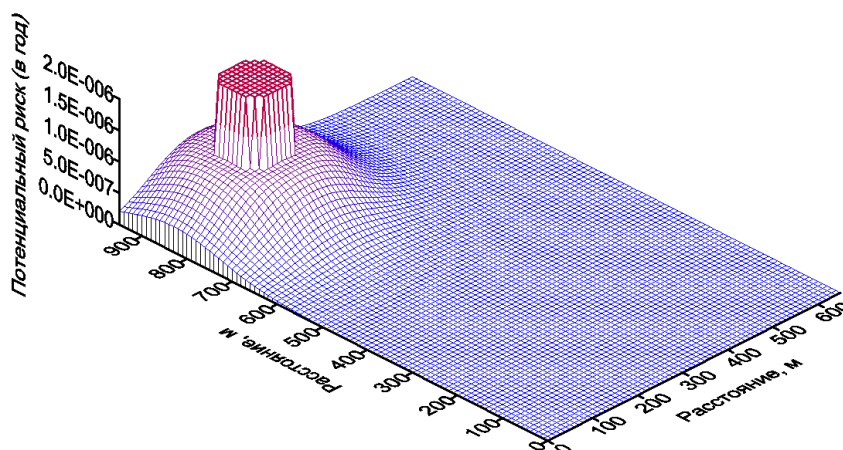


Рис. 6. Трехмерная диаграмма распределения потенциального риска $P(PBC_1)$ для аварии одного резервуара РВС-2000 с бензином

Максимальное значение потенциального риска $P(PBC_1)$, которое отмечается внутри обвалования, составляет $2,1 \cdot 10^{-6}$ в год.

Для определения результирующего поля потенциального риска, которое образуется в результате наложения полей риска, создаваемых каждым из резервуаров, использовалась формула объединения вероятностей, согласно которой потенциальный риск для всех 6 резервуаров составляет:

$$P(PBC) = 1 - \prod_i [1 - P(PBC_i)],$$

где $P(PBC_i)$ – распределение потенциального риска для аварии i -го резервуара РВС-2000.

Изображение результирующего распределения потенциального риска для аварии хотя бы одного из резервуаров представлено на рис. 7.

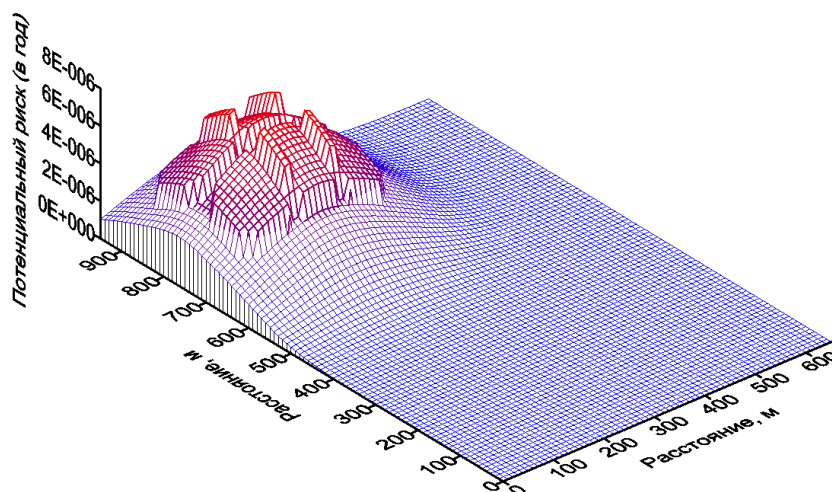


Рис. 7. Трехмерная диаграмма распределения потенциального риска $P(PBC)$ для аварии группы из 6 резервуаров PBC-2000 с бензином (происходит авария хотя бы одного резервуара)

Максимальное значение потенциального риска для аварии хотя бы одного из 6 резервуаров $P(PBC)$ отмечается в 4 областях, там, где происходит наложение потенциальных рисков соседних резервуаров друг на друга. Оно составляет $7,3 \cdot 10^{-6}$ в год.

Анализ суммарной опасности аварий на всех участках

После расчета потенциального риска для рассматриваемых участков (железнодорожной цистерны, автоцистерны и резервуаров) было определено распределение потенциального риска P для всей территории нефтебазы. Значения результирующего потенциального риска определялись также по закону объединения вероятностей. Результаты расчетов представлены на рис. 8.

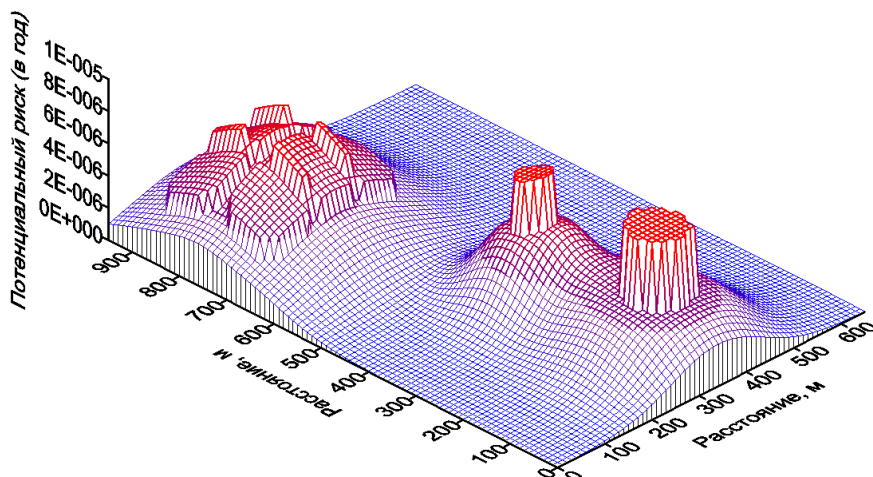


Рис. 8. Трехмерная диаграмма распределения потенциального риска P по территории нефтебазы

Максимальный потенциальный риск на территории нефтебазы отмечается в зоне эстакады для налива бензина в автоцистерну и составляет $P = 8,36 \cdot 10^{-6}$ в год.

Согласно методике¹⁰ для расчета величины индивидуального пожарного риска R , т.е. вероятности гибели отдельного человека, необходимо учесть вероятность q_j присутствия данного человека в той или иной точке нефтебазы, т.е. значение индивидуального риска определяется для каждого работника нефтебазы: $R_j = Pq_j$.

Было проанализировано время присутствия на территории каждого j -го работника и получено распределение времени t_j присутствия j -го работника на территории. При этом учитывалось только время нахождения людей на открытом пространстве (индивидуальный пожарный риск для пространства внутри зданий определяется по отдельной методике), включая время обслуживания оборудования (во время обслуживания персонал может находиться не только вблизи, например, резервуаров, но и на их крыше). Это позволило получить территориальное распределение q_j вероятности

присутствия j -го работника в той или иной точке: $q_j = \frac{t_j}{24}$.

Затем полученные территориальные распределения q_j были объединены, т.е. была рассчитана вероятность того, что в данной точке находится хотя бы один человек. В результате было получено вероятностное поле q присутствия персонала на территории нефтебазы. Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 9.

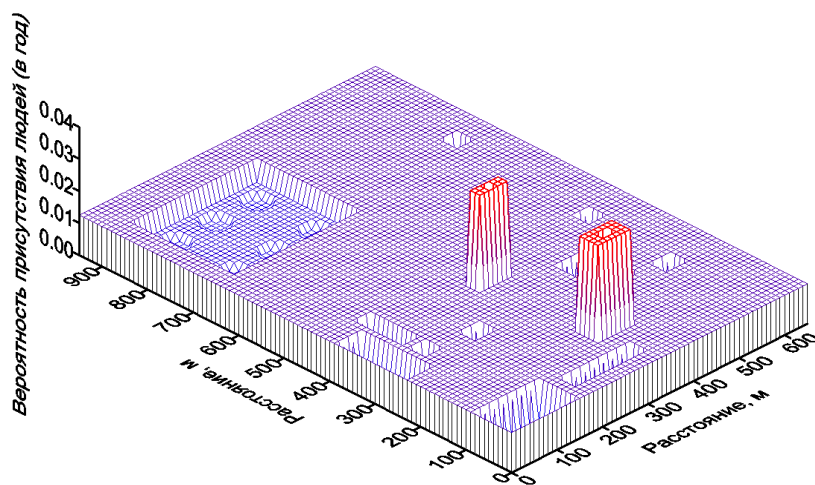


Рис. 9. Трехмерная диаграмма распределения вероятности q присутствия персонала на территории нефтебазы

Вероятностное поле q позволяет определить значение индивидуального пожарного риска в каждой точке территории и тем самым получить его территориальное распределение R . Поле R определяется как произведение территориального распределения потенциального риска P на территориальное

распределение вероятности q присутствия людей. Результаты расчетов представлены на рис. 10.

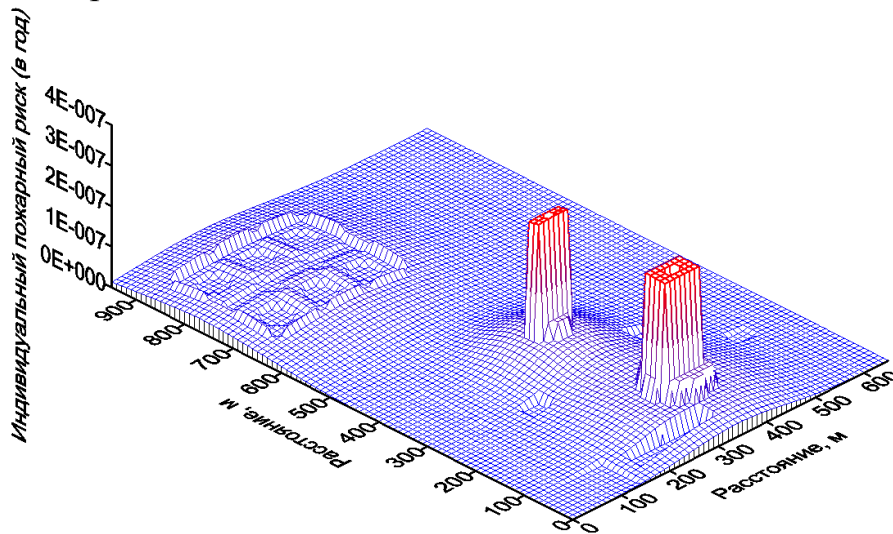


Рис. 10. Трехмерная диаграмма распределения индивидуального пожарного риска R по территории нефтебазы (без учета территории внутри зданий)

Максимальное значение индивидуального риска R наблюдается в месте расположения эстакады для налива автоцистерны и составляет $3,5 \cdot 10^{-7}$ в год.

Для большей информативности полученного распределения индивидуального пожарного риска R его можно представить в виде изолиний или цветового поля (рис. 11). В этом случае уже можно оценивать риск, выделять области с приемлемыми и недопустимыми уровнями опасности.

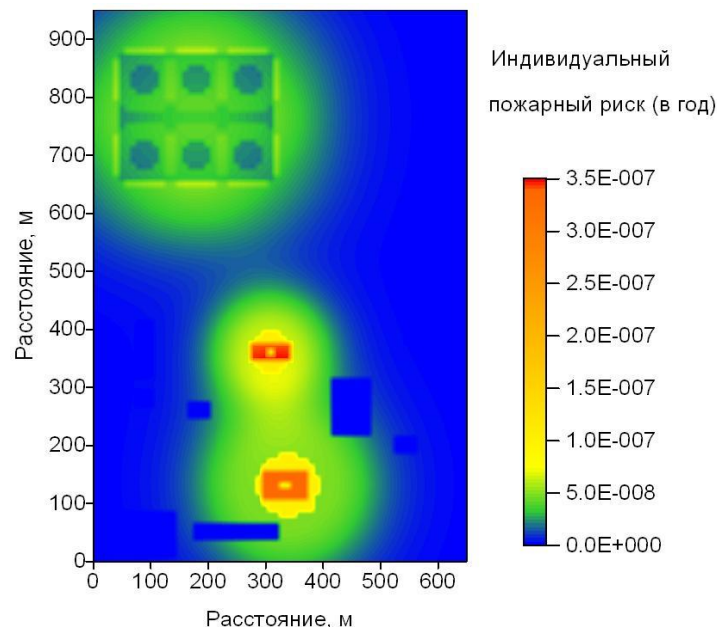


Рис. 11. Распределение индивидуального пожарного риска R по территории нефтебазы (без учета территории внутри зданий)

Из рисунка видно, что на территории нефтебазы максимальные значения индивидуального пожарного риска R отмечаются на площадке размещения эстакады для автоцистерны и в зоне размещения эстакады железнодорожной цистерны. Также значительные риски наблюдаются в обширных зонах, расположенных вокруг данных эстакад. Резервуарный парк характеризуется достаточно низкими значениями риска.

Таким образом, наибольшую опасность для персонала нефтебазы представляют участки слива нефтепродуктов из железнодорожной цистерны и их загрузки в автоцистерну. Поэтому мероприятия по снижению пожарной опасности должны разрабатываться, прежде всего, для данных участков. В качестве мер по снижению риска можно предложить сокращение продолжительности пребывания персонала в опасных зонах и автоматизацию операций загрузки-выгрузки.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ См.: Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Утв. приказом МЧС России № 382 от 30.06.2009 г.

² См.: Губенко В.К. Цистерны. Устройство, эксплуатация, ремонт: справочное пособие / В.К. Губенко, А.П. Никодимов, Г.К. Жилин и др. М.: Транспорт, 1990. 151 с.

³ См.: Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.

⁴ Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Заголовок: СП 12.13130.2009. Утв. приказом МЧС России № 182 от 25.03.2009 г.

⁵ Строительная климатология. Заголовок: СНиП 23-01-99. М.: Изд-во стандартов, 2000. 69 с.

⁶ Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.

⁷ Там же.

⁸ Там же.

⁹ Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта. Заголовок: РД 03-357-00. Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 26.04.00. № 23.

¹⁰ Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах.