

ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.12.2018).

16. Об утверждении Правил по охране труда при хранении, транспортировании и реализации нефтепродуктов: Приказ Министерства труда и социальной защиты Рос. Федерации от 16 нояб. 2015 г. № 873 // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.12.2018).

17. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.12.2018).

18. Петрова Н.В., Чешко И.Д. Установление причинно-следственных связей нарушений требований пожарной безопасности при чрезвычайной ситуации (пожаре) на объектах хранения нефтепродуктов // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2018. № 2. С. 42–49.

19. ГОСТ 1510–84. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 14.12.2018).

20. Судебная нормативная пожарно-техническая экспертиза пожаров объектов хранения нефтепродуктов: монография / Н.В. Петрова [и др.]. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2018.

МЕТОДИКА МИНИМИЗАЦИИ ПОЖАРНЫХ РИСКОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ МЕЖДУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИЕЙ И СТРАНАМИ ЕС

С.А. Головин;

Г.К. Ивахнюк, доктор химических наук, профессор.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Предложена методика расчета пожарного риска при перевозках жидких углеводородов железнодорожным транспортом. Приведены основные причины пожаров и аварий в сфере железнодорожного транспорта нефти. Произведено моделирование происшествия на железной дороге с цистерной для перевозки нефтепродуктов при определенных исходных данных. Представлено дерево событий при разрушении железнодорожной цистерны с нефтью.

Ключевые слова: пожарный риск, железнодорожный транспорт, жидкие углеводороды, пожар, взрыв, авария

THE METHOD OF MINIMIZING FIRE RISKS IN TRANSPORT OF PETROLEUM PRODUCTS RAILWAY TRANSPORT BETWEEN RUSSIAN FEDERATION AND THE EU COUNTRIES

S.A. Golovin; G.K. Ivakhnyuk.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

A method of calculating the fire risk during the transport of liquid hydrocarbons by rail is proposed. The main causes of fires and accidents in the field of railway oil transportation are given. The simulation of the accident on the railway with a tank for the transportation of petroleum products with certain initial data. An event tree is presented for the destruction of a railroad tank with oil.

Keywords: fire risk, railway transport, liquid hydrocarbons, fire, explosion, accident

Нефть и нефтепродукты, которые широко применяются в различных отраслях промышленности и на транспорте, в современном мире играют важную роль. Актуальными остаются вопросы, связанные с доставкой жидких углеводородов до конечного потребителя [1].

Одним из основных видов доставки нефтепродуктов является железнодорожный транспорт. Это обусловлено его всесезонностью, достаточной скоростью, широкой географией и возможностью перевозки значительных объемов грузов.

Железнодорожный транспорт можно отнести к наиболее пожароопасному виду транспорта. На возникновение пожаров и взрывов при осуществлении процесса перевозки нефтепродуктов оказывает влияние ряд факторов. Учет риска пожаров и аварий при перевозке жидких углеводородов железнодорожным транспортом позволит снизить их количество и минимизировать причиняемый ущерб [2].

Кроме того, в настоящее время существенно увеличились перевозки нефти и нефтепродуктов между Российской Федерацией и странами Европейского союза (ЕС), что связано с реализацией положений долгосрочных контрактов между странами. Очевидно, что в ближайшем будущем доля транспортировки таких грузов между Российской Федерацией и странами ЕС будет только расти и, следовательно, будут расти и риски при перевозке жидких углеводородов железнодорожным транспортом [3].

При транспортировке нефти и нефтепродуктов ключевой проблемой, как показало комплексное исследование, проведенное в рамках настоящей темы, является расстояние между объектами железнодорожной инфраструктуры, производственными и жилыми объектами [2]. Действующие на территории Российской Федерации строительные нормы и правила допускают отделять жилые застройки от железных дорог специальной зоной 100 м, считая от оси крайнего железнодорожного пути. В ЕС такие нормы не установлены в принципе. Некоторые жилые дома в Российской Федерации, возведенные до принятия вышеназванных технических требований, располагаются на меньшем расстоянии от железнодорожного полотна, что не учитывает уровень опасности, даже при возникновении небольших пожаров и аварий.

Основными причинами пожаров (аварий) при транспортировке железнодорожным транспортом нефтепродуктов являются:

- разгерметизация запорной арматуры, фланцевых и сварных соединений;
- механические повреждения емкостного оборудования, коррозионное и тепловое воздействия;
- попадание в цистерны посторонних веществ;
- дефекты и усталостные явления в металлах и сварных элементах цистерн, сосудов, нефтепроводов;
- ошибки при транспортировке и выполнении ремонтных работ;
- необоснованные увеличения встречных перевозок опасных веществ железнодорожным транспортом вследствие отсутствия системы регулирования и оптимизации маршрутов доставки аварийно химически опасных веществ потребителям.

Для выявления наиболее приемлемого математического аппарата необходимо смоделировать стандартную ситуацию, при которой может произойти пожар или авария при транспортировке нефтепродуктов [4].

Моделирование происшествия выполним при следующих исходных данных: груз – нефтепродукты, перевозимые в цистерне для вязких нефтепродуктов модели 15-1210-01 (рис. 1), объем цистерны – 74 м³. Давление в оборудовании аналогично давлению насыщенных паров. Температура окружающей среды – 10 °С. Температура в оборудовании равна температуре окружающей среды. Скорость ветра – 3 м/с, направление ветра – 190°. Высота замера скорости ветра 8 м. Модель распространения нефтепродукта на плоскую, ровную поверхность. Время ликвидации аварии 4 000 с. Моделирование выполнялось с помощью программного комплекса ТОКСИ+Risk.



Рис. 1. Цистерна для вязких нефтепродуктов модели 15-1210-01

Сделаем акцент на том, что выброс жидкости с низкой летучестью, хранящейся в условиях окружающей среды, обычно не представляет опасности для людей за пределами железнодорожного массива при их достаточном удалении от места аварии, поскольку испарение из нефтяного пятна будет небольшим. Опасность может возникнуть в том случае, если жидкость воспламенится или повлияет на окружающую среду при просачивании в водоносные слои почвы. Выброс газов из цистерны может представлять большую опасность, поскольку газ может достаточно быстро переноситься ветром [5].

После разлива из цистерны нефтепродукты растекаются по земле и распространяются до тех пор, пока не достигнут какой-либо искусственной границы, такой как дамба или стена, либо пока не достигнут глубины, на которой они больше не смогут распространяться, или пока скорость испарения не будет равна скорости высвобождения. Также нефтепродукты начинают нагреваться по мере того, как они поглощают жару от воздуха, земли или солнца.

Чтобы моделировать поведение нефтяного пятна или газового облака (выделяемого из цистерны при перевозке нефтепродуктов) в процессе риск-ориентированного подхода, необходимо знать скорость и продолжительность испарения нефтепродуктов и газа. Для их расчета необходимо сначала рассмотреть процесс распространения, чтобы найти радиус нефтяного пятна как функцию времени. Это важно для определения скорости испарения как функции времени, потому что теплопередача жидкости и массообмен от ветра зависят от площади поверхности пятна.

В рамках математического аппарата, предлагаемого в настоящей статье, целесообразно использовать модель распространения нефтепродуктов Шоу и Бриско, предполагающую, что нефтяное пятно распространяется на гладкой ровной поверхности.

Радиус задается следующим образом – для мгновенного разлива:

$$r = \left[\frac{t}{\beta} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где

$$\beta = \left[\frac{\pi \rho_l}{8 g m} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Учитывая радиус, можно рассчитать скорость испарения в данный момент времени. Сразу после выливания большая часть тепла берется нефтепродуктами из земли.

Для расчета скорости испарения m_g воспользуемся следующим уравнением:

$$m_g = \frac{\lambda_s(T_a - T_b)}{H_{vap}(\pi\alpha_s t)^{\frac{1}{2}}}$$

где λ_s – теплопроводность; α_s – температуропроводность (табл. 1).

Таблица 1. Свойства передачи тепла некоторых поверхностей

Поверхность	λ_s (теплопроводность), Вт/(м·К)	α_s (температуропроводность), м ² /с
Бетон	1,1	$1,29 \times 10^{-7}$
Земля (8 % воды)	0,9	$4,3 \times 10^{-7}$
Сухой песок	0,3	$2,3 \times 10^{-7}$
Влажный песчаный грунт	0,6	$3,3 \times 10^{-7}$
Гравий	2,5	11×10^{-7}

Со временем теплопередача становится незначительной по сравнению с переносом массы ветром, который не зависит от времени и продолжается до тех пор, пока вся жидкость не испарится. Формула, приведенная для массопереноса ветром, была предложена Саттоном и представляет собой уравнение:

$$m_w = a \left[\frac{p_s M}{RT_a} \right] u^{\frac{(2-n)}{(2+n)}} r^{\frac{(4+n)}{(2+n)}}$$

где a и n имеют отношение к устойчивости атмосферы, как показано в табл. 2.

Таблица 2. Параметры в модели испарения нефтяного пятна по Саттону

Условие устойчивости	a	n
Неустойчивая	0,2	$3,846 \times 10^{-3}$
Нейтральная	0,25	$4,685 \times 10^{-3}$
Стабильная	0,3	$5,285 \times 10^{-3}$

Скорость уноса воздуха в пар определяет плотность облака и тем самым определяет выбор модели рассеивания облака. Скорость уноса будет зависеть от таких факторов, как скорость ветра, стабильность воздуха, плотность пара, а принятой модели нет. Простейшим подходом было бы выбрать высоту над нефтяным пятном, выше которой, как предполагается, не будет значительной концентрации пара. Масса, испаряясь, смешается при ветре, дующем через поверхность пятна, на определенной высоте. Массовый расход потока воздуха можно рассчитать. Для правильных расчетов необходимо использовать соответствующее компьютерное моделирование, как уже было отмечено, моделирование выполнялось с помощью программного комплекса ТОКСИ+Risk.

Максимальный диаметр разлива нефтепродуктов зависит от рельефа местности вблизи точки выброса и от того, является ли выброс непрерывным или мгновенным. Каналы, стоки, стены могут повлиять на распространение нефтепродуктов. Часто, например, имеются приспособления, способствующие локализации разлива возле железнодорожных путей, такие как канавы.

Для непрерывного или мгновенного выпуска с наличием заграждения распространение нефти будет сокращено, когда она достигнет заграждения, так что максимальный диаметр нефтяного пятна будет рассчитываться до заграждения. В отсутствии искусственной границы, чтобы остановить распространение, необходимо понимать, что нефтяное пятно остановится только тогда, когда к нему не будет добавлено больше жидкости (либо когда ее запасы

исчерпаны, либо когда скорость испарения равна скорости выброса жидкости на землю) в момент, когда произойдет одно из этих событий, диаметр нефтяного пятна будет максимальным. Исходя из этого, можно предположить следующий процесс: сначала должен быть рассчитан радиус r_w , при котором скорость испарения от ветра равна скорости высвобождения жидкости. Затем вычисляется время T_w , за которое пятно достигнет этого радиуса. Если t_w меньше, чем продолжительность жидкостного отпуска, то максимальный радиус пятна дается равным r_w . Если t_w больше продолжительности жидкостного отпуска, то максимальный радиус нефтяного пятна задается радиусом r_d .

Для мгновенного пролива все гораздо сложнее в плане моделирования, поскольку в отличие от непрерывного высвобождения, рассмотренного выше, невозможно сказать, что распространение остановится, когда в нефтяное пятно больше не добавляется жидкость, так как вся жидкость высвобождается в нефтяное пятно в момент пролива. На плоской, гладкой, ровной поверхности, такой, как рассматриваемая поверхность в этой модели, пятно перестанет распространяться только при достижении некоторой минимальной толщины. На полностью гладкой поверхности эта минимальная толщина будет зависеть от поверхностного натяжения; на шероховатой поверхности минимальная толщина будет зависеть от шероховатости поверхности. При этом научных данных относительно связи результатов, связывающих минимальную толщину с шероховатостью поверхности нет. В отдельных исследованиях допускается, что максимальный диаметр бассейна можно высчитать, предполагая, что жидкость распространяется мгновенно к минимальной толщине.

Расчет в данной ситуации производился для наиболее вероятного сценария – пожара при проливе [6]. Зона рассеяния паров определялась по концентрационным пределам воспламенения: нижний концентрационный предел воспламенения – $0,03456 \text{ кг/м}^3$ и верхний концентрационный предел – $0,17064 \text{ кг/м}^3$. Зона, где достигается нижний концентрационный предел воспламенения: 25 м по ветру, 16 м против ветра, максимальный радиус 20 м в эпицентре пролива. Зона, где достигается верхний концентрационный предел: на расстоянии 15 м по ветру, 10 м против ветра с максимальным радиусом 12 м в эпицентре пролива. Представим дерево событий при разрушении цистерны с нефтепродуктами (рис. 2).

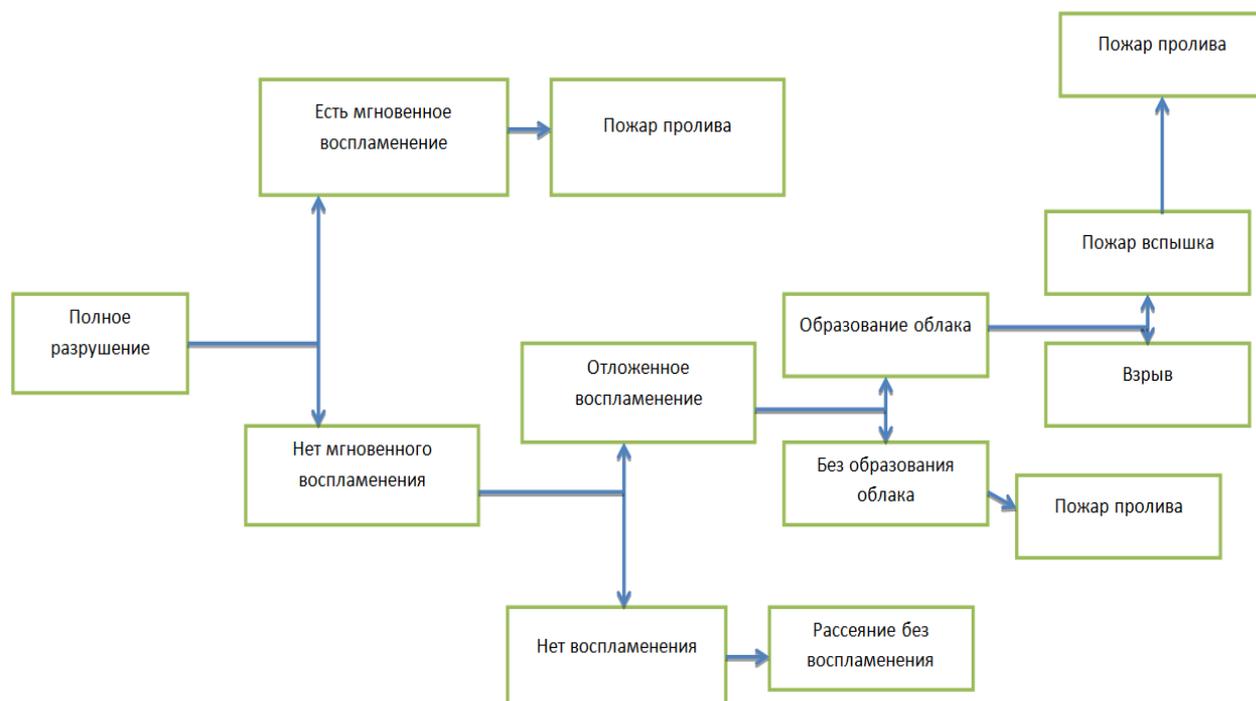


Рис. 2. Дерево событий при разрушении железнодорожной цистерны с нефтью

Моделирование показало, что предложенный математический аппарат предоставляет возможность произвести оценку риска пожаров и аварий при перевозке нефтепродуктов, что при взаимной адаптации позволит избежать аварийных ситуаций и сделает трансграничную перевозку нефтепродуктов более эффективной и безопасной.

Литература

1. Перспективы перевозок нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: риски и перспективы. URL: <http://www.logistika-prim.ru/press-releases/perspektivy-perevozok-neftenalivnyh-gruzov-zheleznodorozhnym-transportom-riski-i> (дата обращения 15.02.2019).

2. Мартынюк И.В. Повышение безопасности железнодорожных перевозок опасных грузов с учетом взаимодействия с другими видами транспорта и окружающей среды: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-н./Д., 2007. 154 с.

3. ГОСТ 54145–2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Общая методология // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.11.2018).

4. РД 03-26–2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (введ. 25 янв. 2020 г.). М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008. 124 с.

5. ГОСТ Р 12.3.047–98. Пожарная безопасность технологических процессов общие требования. Методы контроля // ЭЛЕКТРОННЫЙ ФОНД правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 15.11.2018).

6. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

