

УДК 621.642.88; 331.43

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКА АВАРИЙ НЕФТЕНАЛИВНЫХ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭСТАКАД**

**METHODS TO ASSESS THE RISK OF ACCIDENTS  
OIL LOADINGRACK**

**Козлитин А.М.**

**ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет  
им. Гагарина Ю. А.», г. Саратов, Российская Федерация**

**A. M. Kozlitin**

**FSBEI HE «Saratov State Technical University named after  
Yu. A. Gagarin»,  
Saratov, Russian Federation**

**e-mail: kammov@gmail.com**

**Аннотация.** В статье проведен анализ возможных причин возникновения и развития аварийных ситуаций с учетом отказов и неполадок оборудования, возможности ошибочных действий персонала, внешних воздействий природного характера. Рассмотрены и проанализированы возможные сценарии возникновения и развития аварийных ситуаций на нефтеналивных железнодорожных эстакадах. Обосновано применение метода анализа опасностей технологического объекта по степени опасности. Предложена методика расчета количества паров бензина, участвующего в создании поражающих факторов при штатном наливе закрытой струей вагона-цистерны. Обоснован дискретный процесс формирования слоев бензина при наливе вагона-цистерны. На ее основе для разных погодных условий рассчитаны объемы паров бензина вытесняемых через горловину цистерны по мере ее заполнения. Выполнена оценка условия возникновения взрыво-

опасной паровоздушной смеси нефтепродуктов на территории нефтеналивной железнодорожной эстакаде. Для оценки степени опасности реальной нефтеналивной железнодорожной эстакады, на которой налив нефтепродуктов в вагоны-цистерны осуществляется с отступлениями от обязательных требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности разработана диаграмма «причина-следствие». На ее основе выполнен анализ и количественная оценка риска аварий при штатном наливе закрытой струей вагона-цистерны. Применение предлагаемой методики позволяет при выполнении комплексного обследования фактического состояния нефтеналивной железнодорожной эстакады с учетом наличия отступлений от обязательных требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности получить объективную информацию на основе количественной оценки риска о состоянии промышленной безопасности на объекте.

**Abstract.** In article we analyze the possible causes of emergence and development of emergency situations taking into account failures and malfunctions of equipment, possibility of human errors, external impacts of natural character. The analysis of possible scenarios of occurrence and development of emergencies in technological blocks is carried out. Application of a method of the analysis of dangers of technological object on danger degree is proved. The design procedure of quantity of steams of the gasoline participating in creation of hit hard factors at ordinary filling by the closed stream of the railway tank is offered. Justified discrete process of forming layers of gasoline when filling the railway tank-car. Volumes of steams of gasoline forced out through a mouth of the tank for different weather conditions are calculated. The estimation of a condition of occurrence of explosion of an air mix of oil products in territory a railway loading rack is given. For an estimation of degree of danger of a real railway loading rack on which filling oil products in railway tank it is carried out with deviations from obligatory requirements of Federal norms and rules in the field of industrial safety the diagramme "reason-consequence" is developed. On

its basis the analysis and a quantitative estimation of risk of failures is made for ordinary filling by the closed stream of the railway tank. Application of an offered technique allows at performance of complex inspection of an actual state of a bulk-oil railway loading rack into account presence of deviations from obligatory requirements of Federal norms and rules in the field of industrial safety to receive the objective information on the basis of a quantitative estimation of risk about a condition of industrial safety on object.

**Ключевые слова:** риск, авария, аварийная ситуация, безопасность, сценарии аварийной ситуации, технический риск, железнодорожная цистерна, железнодорожная наливная эстакада

**Key words:** risk, accidents, accident situation, safety, accident situation scenarios, technical risk, railway tank-car, railway loading rack

Сливоналивные железнодорожные эстакады (СНЭ) для нефтепродуктов – это совокупность сооружений и устройств, обеспечивающих налив и слив продуктов из железнодорожных цистерн.

Различают открытый и герметизированный налив. При открытом наливе существует два способа налива - открытой и закрытой струей.

Если производится налив открытой струей, то в этом случае струя нефтепродукта соприкасается с атмосферным воздухом, что приводит к значительному испарению светлых нефтепродуктов и образованию зарядов статического электричества. Поэтому налив открытой струей используют только для налива темных нефтепродуктов.

Налив закрытой струей выполняется следующим образом - наливной шланг опускается до низа цистерны и как следствие контакт струи нефтепродукта с воздухом ограничен. Поэтому, при наливе закрытой струей значительно сокращаются потери нефтепродукта, например, для бензина почти в 2 раза.

Герметичный налив вагонов-цистерн производится через специальные автоматизированные системы налива (АСН). В данном случае используется герметизирующая крышка, телескопическая труба и линия отвода образующихся паров нефтепродукта.

На сливоналивных железнодорожных эстакадах возможно возникновение и развитие аварий по разным сценариям.

Во-первых, это наиболее тяжелые сценарии максимальной гипотетической аварии, связанные со сходом с рельс и опрокидыванием или разгерметизацией вагонов-цистерн с мгновенным выбросом в окружающую среду всей массы содержащегося в них вещества и формированием зон действия поражающих факторов с риском нанесения ущерба.

Во-вторых, это сценарии возникновения аварийных ситуаций с риском нанесения ущерба при штатном наливе нефтепродуктов в вагоны-цистерны на сливоналивных железнодорожных эстакадах, оборудование которых выполнено с отступлениями от требований федеральных норм и правил в области промышленной безопасности (ФНиП «ОПВБ») [1].

В качестве таких отступлений можно выделить:

- п. 4.7.15 ФНиП «ОПВБ» технические устройства системы налива ЛВЖ выполнены не герметично, что не исключает возможность поступления горючих паров в атмосферу при проведении сливоналивных операций;

- п. 4.7.22 ФНиП «ОПВБ» не обеспечена возможность подключения системы слива-налива к установкам организованного сбора и утилизации парогазовой фазы при необходимости освобождения системы от этих продуктов.

При возникновении пожаров на эстакадах, как правило, возникает угроза повреждения или уничтожения эстакад с полным выгоранием нефти и нефтепродуктов, а также распространение пожара (в случае разрушения железнодорожных цистерн в результате взрыва) на объекты резервуарного парка.

Представляет особый интерес рассмотреть методы оценки риска аварий при штатном наливе закрытой струей светлых нефтепродуктов на сливно-наливных железнодорожных эстакадах, оборудованных с отступлениями от требований ФНиП «ОПВБ».

*Условия возникновения взрывоопасной паровоздушной смеси нефтепродуктов на территории СНЭ при штатном наливе закрытой струей*

Размеры взрывоопасной зоны на СНЭ зависят от характера изменения во времени концентрации горючего в паровоздушной смеси, выходящей в атмосферу из цистерны при ее наливе.

Плотность паров бензина в среднем составляет 3,4 относительно воздуха. Поэтому, при наливе железнодорожной цистерны сверху, т.е. закрытой струей (конец наливного шланга находится на 0,1 м от низа вагона-цистерны) изменение концентрации паров бензина на выходе из горловины цистерны происходит значительно медленнее. Это обусловлено тем, что пока верхняя граница диффузионного слоя не достигла горловины, концентрация паров в смеси мала и, как правило, недостаточна для создания наружной пожароопасной загазованности.

С подходом границы этого слоя к горловине цистерны мощность выбросов паров резко возрастает и примерно при уровне налива 0,85 от высоты цистерны достигает своего максимального значения, которое до конца операции наполнения остается постоянным и соответствует концентрации насыщения.

Испарение бензина происходит с зеркала налива в течение всего времени заполнения цистерны, которое составляет по данным предприятия 1 ч.

В первом приближении можно представить заполнение цистерны в виде дискретного процесса, когда каждую минуту формируется новый слой бензина, с поверхности которого происходит его испарение, рисунок 1.

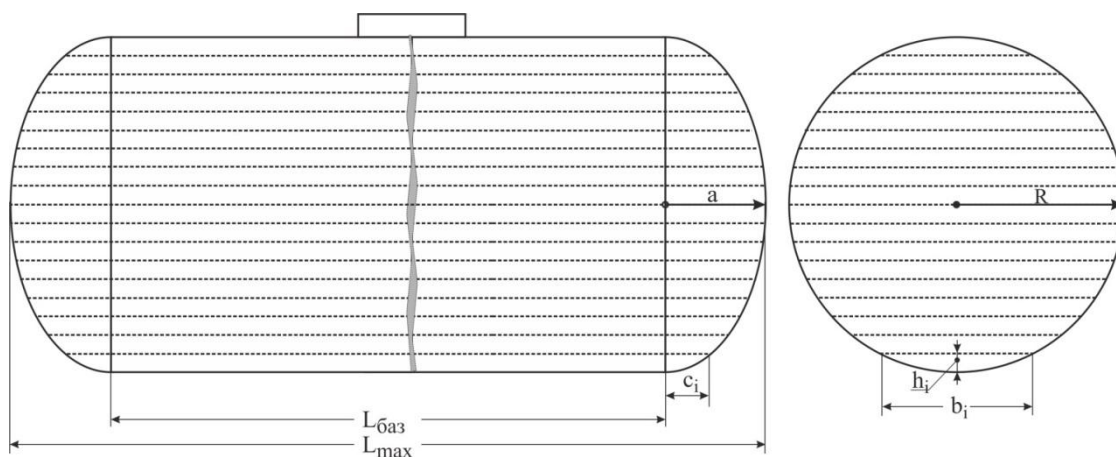


Рисунок 1. Дискретный процесс формирования слоев бензина при наливе вагона-цистерны

Ввиду достаточно сложной конфигурации котла цистерны, по мере изменения высоты залива меняется и площадь зеркала наливаемого бензина, следовательно, и масса паров в дискретные моменты времени будет меняться в функции этой площади, рисунок 2.

Ширина слоя определяется известной формулой

$$b_i = \sqrt{4 \cdot [R^2 - (R - h_i)^2]}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус поперечного сечения котла цистерны;  $h_i$  – высота  $i$ -го слоя от нижней образующей котла цистерны.

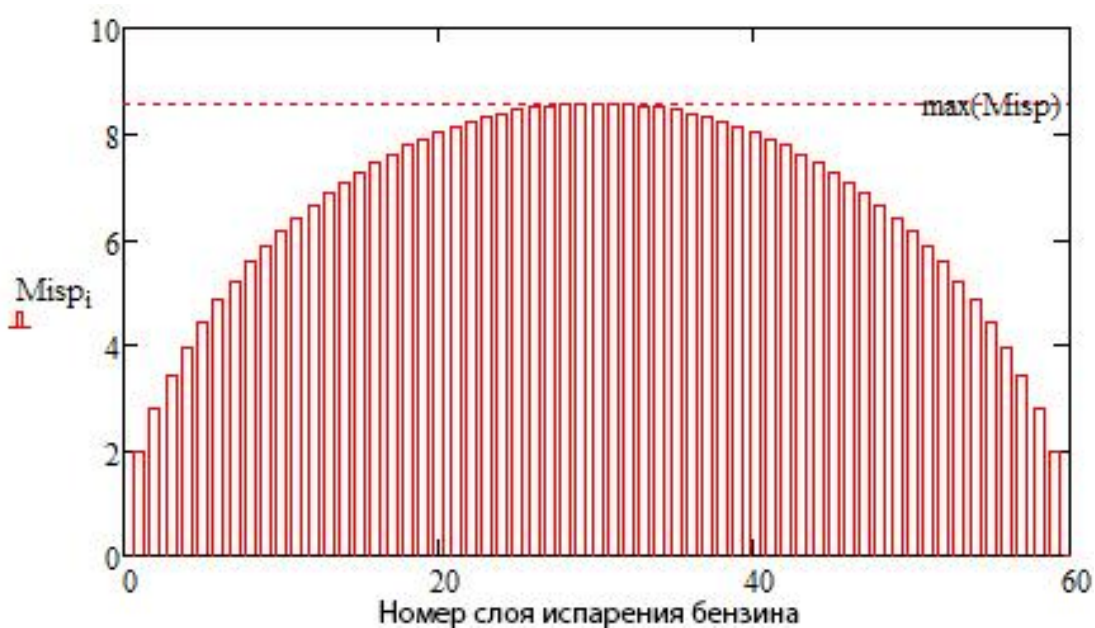


Рисунок 2. Послойное изменение массы паров бензина

Длина слоя рассчитывается по формуле

$$L_i = (L_{\max} - 2a) + \sqrt{4 \cdot [a^2 - (a - c_i)^2]}, \quad (2)$$

где  $L_{\max}$  – максимальная длина котла цистерны;  $a$  – длина малой полуоси эллипса, образующей котла цистерны;  $c_i$  – изменение длины  $i$ -го слоя. Площадь зеркала испарения равна  $S_{ж_i} = L_i \cdot b_i$

*Методика расчета количества паров бензина, участвующего в здании поражающих факторов при штатном наливе закрытой струей вагона-цистерны*

Для выполнения расчетов интенсивности испарения рассматриваемый нефтепродукт представлен нами [2] набором узких фракций с температурами кипения в пределах  $10 \div 20$  °С. Для каждой такой компоненты нефтепродукта рассчитываются требуемые физические параметры для оценки количества опасного вещества, которое участвует в формировании поражающих факторов.

Интенсивность испарения  $\sigma(t, v, P_{\text{пр}})_{j,k}$  с зеркала разлития для  $j$ -й узкой фракции бензина определяется по формуле Мацака [3, 4], учитывающей изменение температуры атмосферного воздуха, скорость приземного ветра, а так же парциальное давление паров  $j$ -й узкой фракции над бензином при заданной  $k$ -й температуре атмосферного воздуха [2]

$$\sigma(t_v, v)_{j,k} = 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot (5,38 + 4,1 \cdot v) \cdot P_{\text{пр}}(t_v)_{j,k} \cdot \sqrt{\Delta\mu_j}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{пр}}(t_v)_{j,k}$  – парциальное давление паров  $j$ -й фракции над бензином при заданной  $k$ -й температуре атмосферного воздуха;  $t_v$  – температура атмосферного воздуха;  $v$  – скорость приземного ветра,  $\Delta\mu_j$  – мольная доля  $j$ -й фракции бензина.



Последовательность определения интенсивности испарения  $j$ -й фракции бензина при температуре воздуха  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра  $v = 1\text{ м/с}$ , показана на рисунке 3.

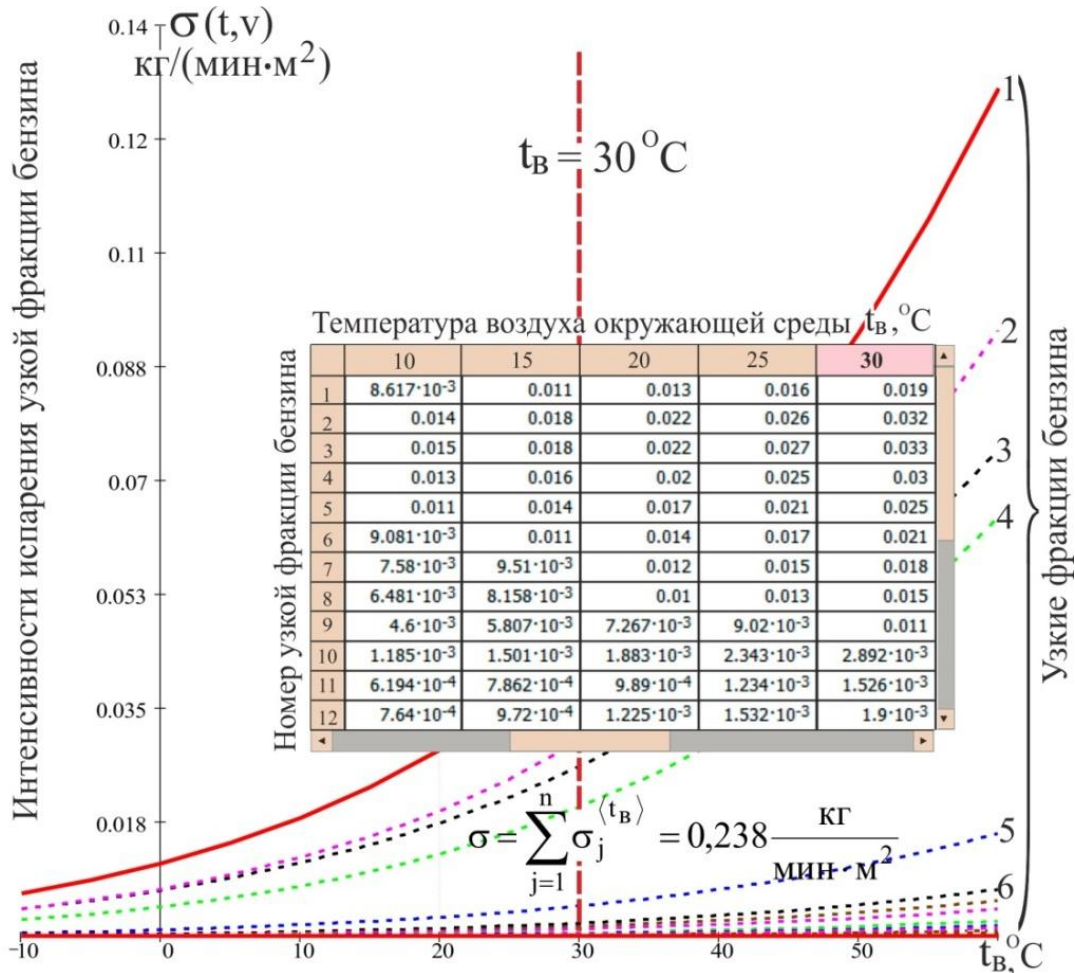


Рисунок 3. Интенсивность испарения узких фракций бензина

Масса испарившегося бензина  $M$  будет зависеть от  $\tau_{иж}$  - времени испарения, с;  $\sigma$  - интенсивности испарения,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  $S_{ж}$  - площади зеркала испарения,  $\text{м}^2$ ;  $n$  - количества слоев испарения бензина в котле цистерны

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot S_{ж_i} \cdot \tau_{уж_i} \quad (4)$$

Площадь зеркала испарения равна  $S_{ж_i} = L_i \cdot b_i$

Характер изменения объемов паров и жидкой фазы бензина, степень уменьшения свободного объема котла цистерны и нарастание объема па-



ров бензина вытесняемых через горловину цистерны по мере ее заполнения показано на рисунке 4.

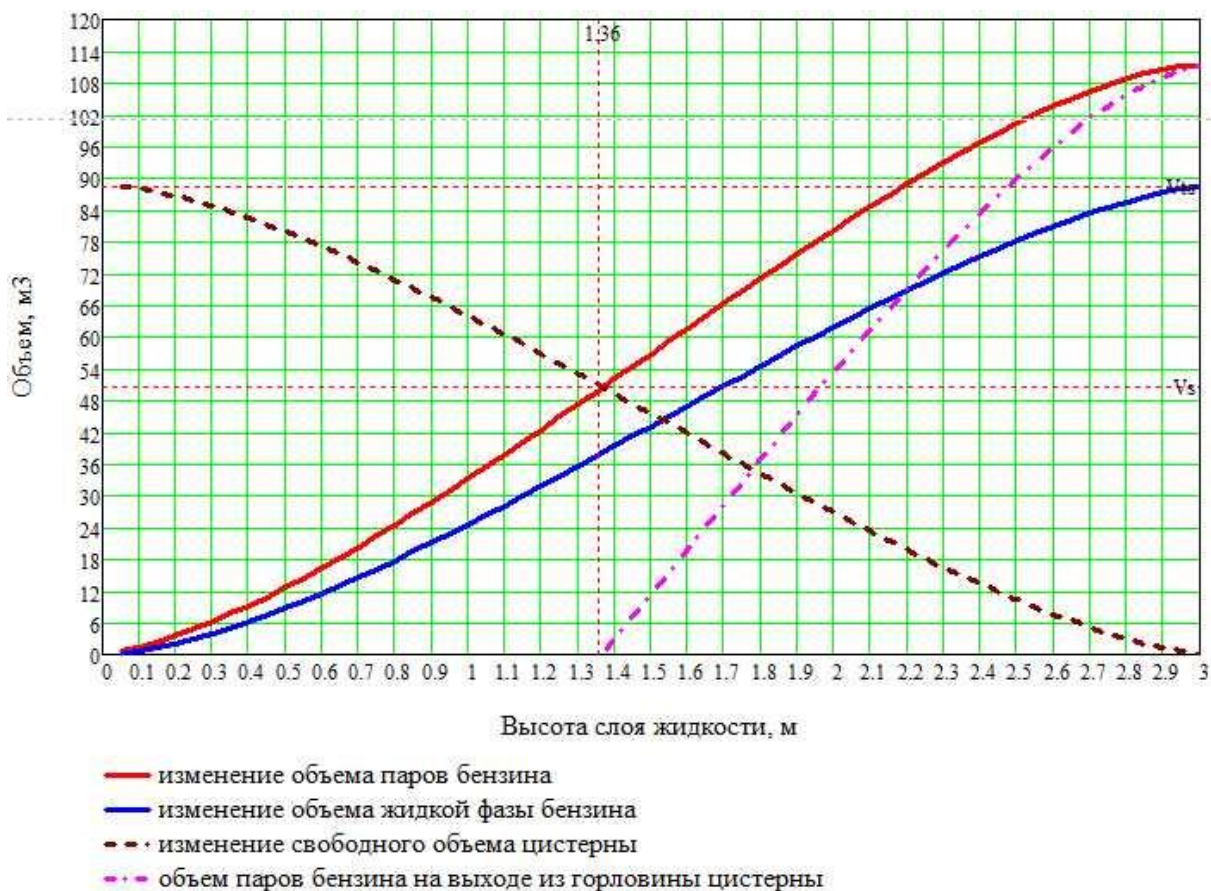


Рисунок 4. Изменение объема паров бензина, выходящих в атмосферу из цистерны при ее наливе

Результаты расчетов массы испарившегося бензина при различных температурах атмосферного воздуха, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Масса испарившегося бензина

Температура атмосферного воздуха, $t_b$ , °C	-10	0	10	20	30	40
Давление насыщенных паров бензина $R_{пр}(t)$ , кПа	3,429	5,662	8,996	13,81	20,561	29,778
Интенсивность испарения $\sigma(t,v)$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$6,63 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-3}$	$1,74 \times 10^{-3}$	$2,67 \times 10^{-3}$	$3,97 \times 10^{-3}$	$5,75 \times 10^{-3}$
Масса паров бензина $M_{исп}$ , кг	65,771	108,601	172,55	264,886	394,374	571,163

*Анализ и количественная оценка риска аварий при штатном наливе закрытой струей вагона-цистерны*

При выходе паров бензина в атмосферу из люка цистерны при ее наливе происходит загазованность территории СНЭ.

Как следствие возможны два варианта развитие аварии:

- воспламенение паров бензина над люком цистерны с возникновением факельного горения;
- формирование облака паровоздушной смеси паров бензина в районе цистерны и при наличии источника воспламенения – взрыв.

Для оценки степени опасности реальной сливноналивной железнодорожной эстакады, на которой налив нефтепродуктов в вагоны-цистерны осуществляется с отступлениями от требований ФНиП «ОПВБ» важно определить технический риск – вероятность возникновения аварии. С этой целью воспользуемся методом анализа риска «причина-следствие» [5]. Диаграмма причина-следствие при негерметичном наливе железнодорожной цистерны сверху, т.е. закрытой струей бензина в вагоны-цистерны представлена на рисунке 5.

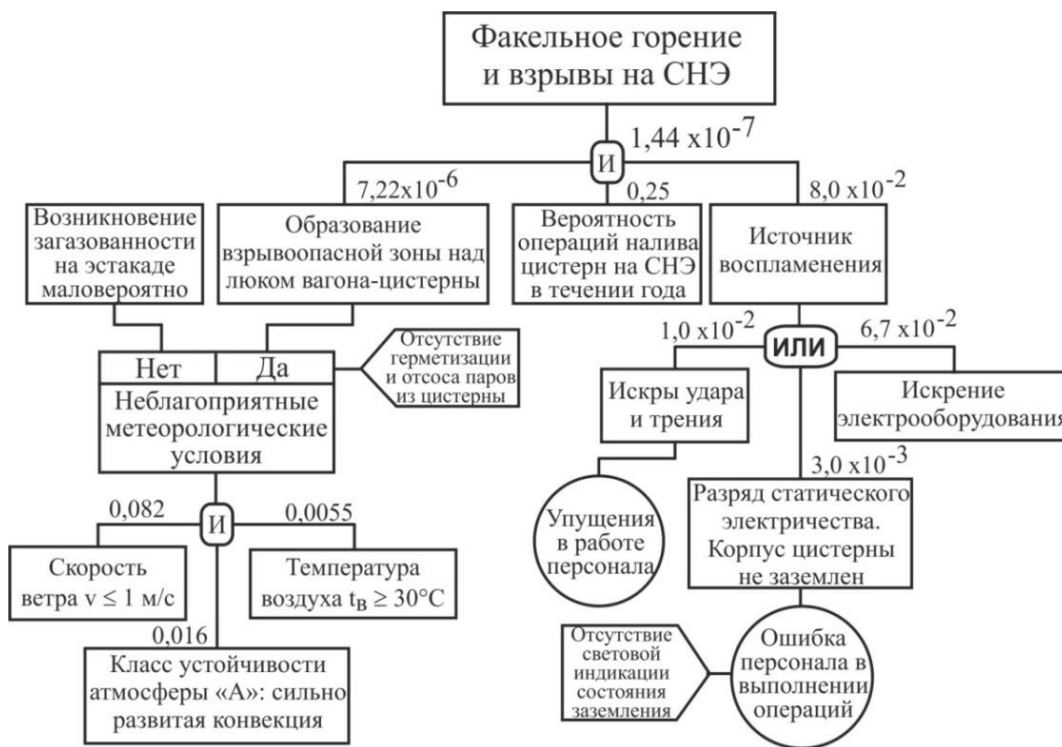


Рисунок 5. Диаграмма причина - следствие возникновения и развития аварии на сливноналивной железнодорожной эстакаде

Определим вероятности реализации неблагоприятных метеорологических условий, способствующие образованию взрывоопасной зоны над люком вагона-цистерны и вероятности, обуславливающие возникновения источника воспламенения.

При скорости ветра  $v \leq 1$  м/с и характере погоды: очень солнечная, летняя тихая погода с температурой воздуха  $t_b \geq 30$  °С наиболее характерный класс устойчивости атмосферы – очень неустойчивое состояние, сильно развитая конвекция. Среднегодовая относительная повторяемость данного класса устойчивости атмосферы для Центрально-Европейской части России по данным [6] составит 1,6 %.

Для оценки вероятности реализации скорости ветра и температуры окружающего воздуха за год взяты данные сайта «Статистика погоды в городах России».

По данным сайта число дней со скоростью ветра  $v \leq 1$  м/с составляет за последние 50 лет  $N_{\text{дн.}} = 1501$  день. Принимая в году количество дней равное 365, рассчитаем вероятность реализации скорости ветра  $v \leq 1$  м/с за год

$$P_{\text{ветра}} = \frac{1501}{50 \times 365} = 0,082 \quad \text{1/год} \quad (5)$$

При скорости ветра более 2 м/с опасность налива светлых нефтепродуктов существенно снижается [7].

По температуре обработана статистика для места расположения реального объекта нефтепереработки за 80 лет, с 1937 г. по 2016 г., согласно которой только в 48 годах данного периода отмечалась температура 30 °С и более. В основном были отмечены температуры 30 – 34 °С, температура 38 °С наблюдалась только один раз в 2010 году. Таким образом, за 48 лет число дней в году с температурами воздуха  $t_b \geq 30$  °С составило 96 дней. Следовательно, вероятность реализации температуры  $t_b \geq 30$  °С составит  $P_t = 96/(48 \times 365) = 0,0055$ .

Вероятности ошибок в действии персонала (оператора):

- ошибка оператора в выполнении операций -  $3,0 \times 10^{-3}$  [5];
- упущения в работе оператора -  $1,0 \times 10^{-2}$  [5];
- искрение электрооборудования –  $6,7 \times 10^{-2}$  [8, 9].

Учитывая, что производится одновременный налив бензина в 15 вагонов-цистерн, вероятность реализации хотя бы одной из рассматриваемых аварийной ситуации составит  $2,16 \times 10^{-6}$  1/год.

## **Выводы**

Предложенная в статье методика расчета количества паров бензина, участвующего в создании поражающих факторов при штатном наливе закрытой струей вагона-цистерны позволяет оценить условия возникновения взрывоопасной паровоздушной смеси нефтепродуктов на территории СНЭ и на этой основе выполнить анализ и количественную оценку риска аварий и при необходимости обосновать дополнительные мероприятия, направленные на повышение противоаварийной защиты и снижение последствий аварий на сливноналивных железнодорожных эстакадах.

## **Список используемых источников**

- 1 Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.03.2013 г. № 96 (ред. от 26.11.2015) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. 126с.
- 2 Козлитин А. М. Теория и методы анализа риска сложных технических систем: монография. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 200 с.
- 3 Мацак В. Г. Упругость пара и испарение веществ в подвижном воздухе // Гигиена и санитария. 1957. №8. С 35-41.

4 Мацак В. Г., Хоцянов Л. К. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве. М.: Медгиз, 1959. 230 с.

5 Хенли Э. Дж., Кумамото Х. М. Надежность технических систем и оценка риска; пер. с англ. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.

6 Измалков В. И., Измалков А. В. Безопасность и риск при техногенных воздействиях. М.: НИЦЭБ РАН, 1994. 269 с.

7 Таубкин И. С. Пожаровзрывобезопасность автомобильных сливно-наливных эстакад и экспертный анализ нормативно-технических документов, ее регламентирующих. М.: РФЦ СЭ, 1999. 75 с.

8 Колесников Е. Ю. Практика разработки паспортов безопасности (на примере паспорта безопасности автомобильной заправочной станции) // Проблемы анализа риска. 2007. Т. 4, №2. С 106-128.

9 Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: учеб. пособие. М.: Издат. центр «Академия», 2003. 512 с.

## References

1 Prikaz Federal'noj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 11.03.2013 g. № 96 (red. ot 26.11.2015) «Ob utverzhenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Obshhie pravila vzryvobezopasnosti dlja vzryvopozharoopasnyh himicheskikh, neftehimicheskikh i neftepererabatyvajushhhih proizvodstv». М.: ZAO NTC PB, 2013. 126s. [in Russian].

2 Kozlitin A. M. Teorija i metody analiza riska slozhnyh tehniceskikh sistem: monografija. Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t, 2009. 200 s. [in Russian].

3 Macak V. G. Uprugost' para i isparenie veshhestv v podvizhnom vozduhe // Gigiena i sanitarija. 1957. №8. S. 35-41. [in Russian].

4 Macak V. G., Hocjanov L. K. Gigienicheskoe znachenie skorosti isparenija i davlenija para toksicheskikh veshhestv, primenjaemyh v proizvodstve. М.: Medgiz, 1959. 230 s. [in Russian].

5 Henli Je. Dzh., Kumamoto H. M. Nadezhnost' tehniceskikh sistem i ocenka riska; per. s angl. M.: Mashinostroenie, 1984. 528 s. [in Russian].

6 Izmailov V. I., Izmailov A. V. Bezopasnost' i risk pri tehnogennykh vozdeystviyakh. M.: NII JeB RAN, 1994. 269 s. [in Russian].

7 Taubkin I. S. Pozharovzryvbezopasnost' avtomobil'nykh slivo-nalivnykh jestakad i jekspertnyj analiz normativno-tehniceskikh dokumentov, ee reglamentirujushhih. M.: RFC SJe, 1999. 75 s. [in Russian].

8 Kolesnikov E. Ju. Praktika razrabotki pasportov bezopasnosti (na primere pasporta bezopasnosti avtomobil'noj zapravochnoj stancii) // Problemy analiza riska. 2007. T. 4. №2. S 106-128. [in Russian].

9 Belov P. G. Sistemnyj analiz i modelirovanie opasnykh processov v tehnosfere: ucheb. posobie. M.: Izdat. centr «Akademija», 2003. 512 s. [in Russian].

### **Сведения об авторе**

#### **About the author**

Козлитин А.М., д-р техн. наук, проф. кафедры «Природная и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «СГТУ им. Гагарина Ю.А.», г. Саратов, Российская Федерация.

A. M. Kozlitin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Natural and technosphere safety», FSBEI HE «SSTU named after Yu. A. Gagarin», Saratov, Russian Federation

e-mail: kammov@gmail.com