

ПРОЕКТ СТАТЬИ

Оценка риска эскалации аварий при идентификации и регистрации опасных производственных объектов нефтегазового комплекса в соответствии с изменениями в Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»



И.С. Жуков,
ст. науч. сотрудник,
ilzhukov@safety.ru



М.В. Лисанов,
д-р техн. наук, директор центра
анализа риска



И.А. Кручинина,
д-р техн. наук, ген. директор



Г.М. Селезнёв,
вед. науч. сотрудник

АНО «Агентство исследований
промышленных рисков», Москва,
Российская Федерация

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Российская Федерация

Проанализированы изменения в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», касающиеся уточнения класса опасности опасных производственных объектов, находящихся на расстоянии менее 500 м друг от друга, их идентификации и регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов. Приводится трактовка понятия «эскалация аварий», а также анализ статистических данных по авариям на промышленных объектах, которые сопровождались эскалацией. Рассмотрены методы определения возможности возникновения и развития эскалации аварий, приведены критерии эскалации аварий и предложения по внесению изменений в методические документы Ростехнадзора для единого подхода при учете риска эскалации аварий при регистрации и идентификации опасных производственных объектов.

Ключевые слова: эскалация, авария, анализ риска, идентификация, регистрация, опасный производственный объект, эффект домино, класс опасности, промышленная безопасность.

Для цитирования: Жуков И.С., Лисанов М.В., Кручинина И.А., Селезнёв Г.М. Оценка риска эскалации аварий при идентификации и регистрации опасных производственных объектов нефтегазового комплекса в соответствии с изменениями в Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»// Безопасность труда в промышленности. 2024. № 9. С. . DOI: 10.24000/0409-2961-2024-9-

Accident Escalation Risk Assessment During Identification and Registration of Hazardous Production Facilities of Oil and Gas Industry in Accordance with Changes in the Federal Law «On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities»

I.S. Zhukov, Senior Researcher, ilzhukov@safety.ru, ANO «Industrial Risk Research Agency», Moscow, Russian Federation
M.V. Lisanov, Dr. Sci. (Eng.), the Director of Risk Analysis Center, STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russian Federation
I.A. Kruchinina, Dr. Sci. (Eng.), General Director, STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russian Federation
G.M. Seleznev, Leading Researcher, STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article analyses the requirements of the Federal Law № 534-FZ «On the introduction of changes to the Federal Law «On industrial safety of hazardous production facilities» in accordance with the changes in the Federal Law № 116-FZ regarding the specification of a hazard class of hazardous production facilities located at a distance of less than 500 m from each other.

Accidents that involved escalation (domino effect accident development) have been analyzed.

Proposals for the development of an integral approach to meeting the requirements of the Federal Law № 534-FZ have been provided for the cases when it is necessary to specify a hazard class of hazardous production facilities located at a distance of less than 500 m from each other regarding the substantiation of:

the terminology associated with accident escalation, including the interpretation of the term «limits of the probable area affected by accident damage factors»;

threshold values of equipment destruction under pressure and thermal impacts causing accident escalation;

quantitative criteria of permissible accident escalation risk.

The results of the study are recommended to include as a complementary material to the Safety Guide «Methodological premises of hazard analysis and accident risk assessment at hazardous production facilities».

Keywords: escalation, accident, risk analysis, identification, registration, hazardous production facility, domino effect, hazard class, industrial safety.

For citation: Zhukov I.S., Lisanov M.V., Kruchinina I.A., Seleznev G.M. Accident Escalation Risk Assessment During Identification and Registration of Hazardous Production Facilities of Oil and Gas Industry in Accordance with Changes in the Federal Law «On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities». *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2024. № 9. pp. . (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2024-9-

Введение

В Российской Федерации деятельность в области промышленной безопасности, в частности классификация опасных производственных объектов (ОПО), регламентируется Федеральным законом от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [1]. В соответствии с примечанием 3 приложения 2 [1]: «В случае, если расстояние между опасными производственными объектами составляет менее чем пятьсот метров, независимо от того, эксплуатируются они одной организацией или разными организациями, учитывается суммарное количество опасных веществ одного вида». Это связано с тем, что авария на одном ОПО может спровоцировать аварию на соседнем ОПО, т.е. произойдет эскалация аварии, иначе называемая еще эффектом домино или каскадным развитием аварии (далее — эскалация аварии). Возможность (риск) реализации этого эффекта, которая может существенно повысить ущерб от первичной аварии, зависит как от размеров зон действия поражающих факторов, так и от величины этого воздействия. Подобный подход отражен в Федеральном законе от 14 ноября 2023 г. № 534-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [2], в соответствии с которым в приложение 2 добавлено примечание 4: «Правило, указанное в пункте 3 настоящего примечания, применяется с учетом следующих особенностей:

1) в случае, если в соответствии со сведениями, содержащимися в декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта, иные опасные производственные объекты в пределах вероятной зоны действия поражающих факторов аварии на таком опасном производственном объекте не располагаются, суммарное количество опасных веществ одного вида, которые находятся или могут находиться на таком опасном производственном объекте и иных опасных производственных объектах, при определении класса опасности такого опасного производственного объекта не учитывается;

2) при установлении класса опасности опасного производственного объекта трубопроводного транспорта (опасного производственного объекта магистрального трубопровода для транспортирования жидких и газообразных углеводородов, морского трубопровода, промыслового (межпромыслового) трубопровода, трубопровода для транспортирования широкой фракции легких углеводородов и сжижен-

ных углеводородных газов, аммиакопровода) суммарное количество опасных веществ одного вида, которые находятся или могут находиться в линейных частях присоединенных трубопроводов, оснащенных отключающей трубопроводной арматурой, обеспечивающей возможность автоматического управления остановкой технологического процесса, учитывается до узлов такой арматуры, расположенных на расстоянии не менее 500 метров от границ указанного опасного производственного объекта».

Однако в [2] отсутствует определение термина «пределов вероятной зоны действия поражающих факторов», что на практике приводит к неоднозначности в трактовке данного положения.

В связи с этим для целей определения класса ОПО необходимо:

уточнить терминологию, в том числе толкование термина «пределов вероятной зоны действия поражающих факторов аварии»;

установить пороговые значения возникновения аварии на рассматриваемом ОПО вследствие аварий на соседнем ОПО;

обосновать критерии допустимого риска эскалации аварии.

Необходимость установления допустимого риска эскалации (как и для целей размещения зданий и сооружений согласно [3]), согласно риск-ориентированному подходу [4], связана с необходимостью исключения избыточной нагрузки на бизнес при необоснованном повышении класса ОПО, что возможно при установлении критериев «нулевого риска», т.е. по размеру «максимально возможной» вероятной зоны действия поражающих факторов без учета вероятности реализации такой зоны. Такая ситуация может возникнуть, например, для ОПО, технологически связанных потоками опасных веществ.

Терминология

Проблеме эскалации аварий посвящено достаточно большое число публикаций и документов, например [3, 5–11], причем эффект эскалации аварий упоминается с 1947 г. в [5].

В руководстве по безопасности [3] эскалация аварии трактуется как последовательное возникновение аварии, причинами здесь являются поражающие факторы аварии на соседних составных частях анализируемого ОПО или рядом расположенных производственных объектов.

В [9] дано более детальное, но не противоречащее вышеизложенному: «Каскадное развитие аварии — это неблагоприятный сценарий развития аварийной

ситуации, при котором (вследствие несовершенства систем защиты и (или) неверных действий персонала) возможен выход поражающих факторов аварии за пределы аварийного блока, оборудования или объекта и вовлечение опасного вещества, находящегося в расположенном рядом неаварийном оборудовании, в последующую стадию развития аварии».

В [8] авторы разделяют все аварии с эффектом домино на несколько типов: в зависимости от поражающего фактора, вызвавшего эскалацию, вовлеченности оборудования и трубопроводов вне технологического блока или объекта, где возникла первичная авария, механизма развития эскалации и т.д.

Вероятные зоны действия поражающих факторов (барическое, термическое, токсическое и пр.) рассчитываются при количественной оценке риска в декларации промышленной безопасности ОПО, которая в настоящее время по инициативе владельца может быть разработана также для ОПО 3-го или 4-го классов опасности. Исходя из п. 34 [3] в качестве «предела вероятных зон действия поражающих факторов» следует понимать показатель $R_{пот}$ — потенциальный риск (или потенциальный территориальный риск) — частоту реализации поражающих факторов аварии (давление ударной волны, тепловой поток или иное воздействие) в рассматриваемой точке на площадке ОПО и прилегающей территории.

При этом необходимо различать понятие «нанесение ущерба» от аварий на соседних объектах от понятия «эскалации» аварии. Например, известно, что наибольшая опасность чрезвычайного риска при аварии на ОПО может быть связана с токсическим поражением людей, но при этом риск аварии на соседних объектах (эскалации) может быть невелик вследствие низкой вероятности разрушения оборудования токсичным облаком и дополнительного выброса новых опасных веществ. Также, если взрыв на соседнем ОПО не привел к разрушению оборудования и выбросу опасных веществ на соседнем объекте, хотя и нанес ущерб в виде повреждения зданий, сооружений, это не может считаться аварией с эскалацией, поскольку это воздействие не приводит к необходимости технического расследования аварии на этом объекте.

Анализ аварий, происшедших с эскалацией

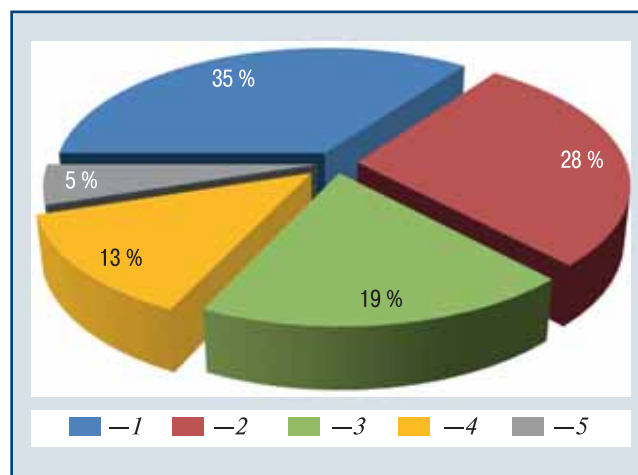
В [10] проведен анализ аварий, сопровождавшихся эскалацией, на объектах хранения, переработки и транспортировки опасных веществ по всему миру. Всего выделено 225 аварий, сопровождавшихся эффектом домино. Из них 25 % аварий произошло в Европе, 56 % — в Австралии, Канаде, Японии, Новой Зеландии, Норвегии и США, 19 % — в других странах. Данный анализ касается эскалации не только между крупными технологическими объектами (аналогами ОПО), а включает «внутреннюю» эскалацию между оборудованием или отдельными блоками, установками таких объектов.

В табл. 1 приведена статистика по опасным веществам, выброс которых сопровождался эскалацией аварий согласно [10].

Таблица 1

Опасное вещество	Число аварий	Процент
Сжиженные углеводородные газы (СУГ)	60	26,7
Нефть	25	11,1
Бензин	24	10,7
Нафта	14	6,2
Дизельное топливо	12	5,3
Толуол	9	4,0
Винилхлорид	9	4,0
Этилен	8	3,6
Оксид этилена	7	3,1
Природный газ	7	3,1
Хлор	7	3,1
Метанол	6	2,7

Большинство из рассмотренных в [10] аварий происходили на объектах хранения, переработки и транспортировки опасных веществ (рис. 1, здесь 1 — хранение; 2 — переработка; 3 — транспортирование; 4 — потребление; 5 — другие).

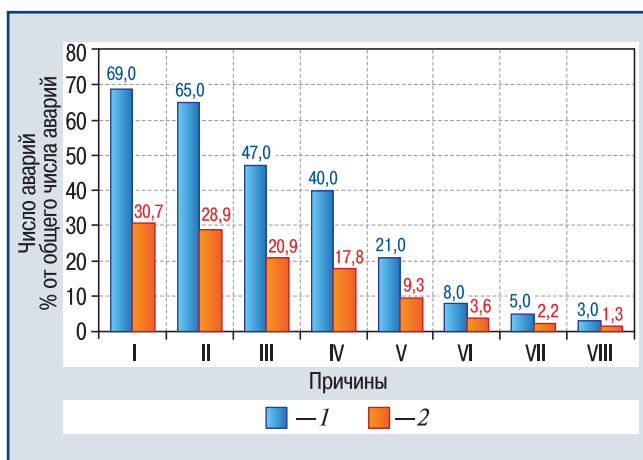


▲ Рис. 1. Распределение аварий с эффектом домино по типам объектов

▲ Fig. 1. Distribution of domino effect accidents by types of facilities

Причины рассмотренных в [10] аварий с эскалацией приведены на рис. 2 (здесь I — внешнее воздействие; II — механические причины; III — человеческий фактор; IV — воздействие ударов; V — неуправляемые реакции; VI — отказ оборудования; VII — нарушение условий процесса; VIII — ошибки обслуживания; 1 — число; 2 — процент).

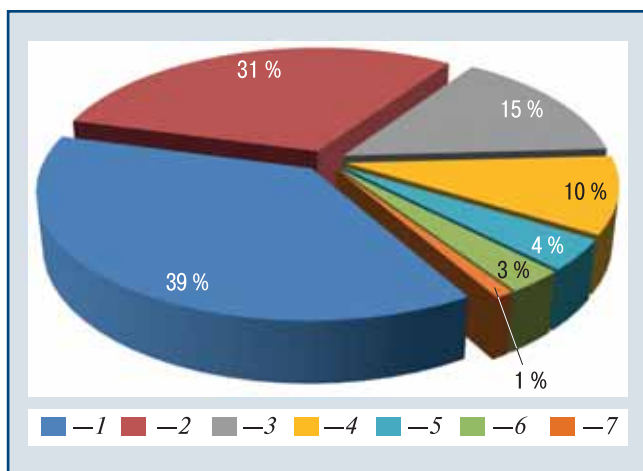
Среди событий, инициировавших эскалацию аварии, выделяются тепловое воздействие и повреждение ударной волной. При этом причинами теплового воздействия, повлекшего разрушение соседнего оборудования, в 80 % случаев послужили пожары про-



▲ Рис. 2. Причины аварий с эскалацией
▲ Fig. 2. Causes of accidents involving escalations

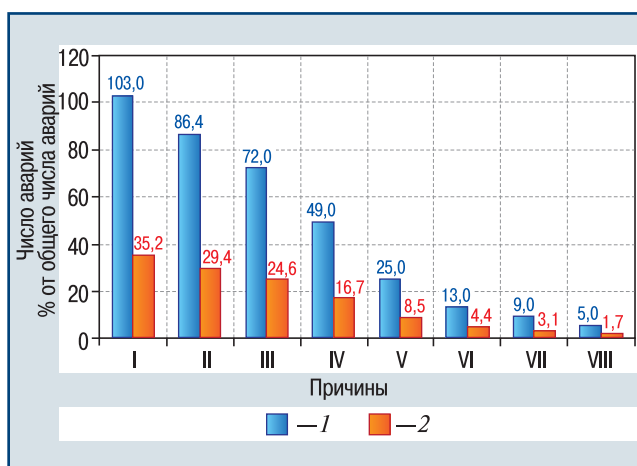
лива, в 12 % — «пожар — вспышка», в 8 % — струевое горение. Причиной воздействия ударной волны в 84 % случаев является взрыв облаков топливно-воздушных смесей (ТВС). В 10 % — физические взрывы, в 5 % случаев — взрывы мелкодисперсной пыли.

Более поздние, по сравнению с [10], исследования, приведенные в [8, 12], включают в себя уже 330 проанализированных аварий и несколько иные результаты, представленные на рис. 3 (здесь 1 — переработка; 2 — хранение; 3 — транспортирование; 4 — перемещение; 5 — складирование; 6 — жилые и коммерческие помещения; 7 — хранение или захоронение отходов) и рис. 4 (здесь обозначения — то же, что на рис. 2). Статистические данные по выбросам ОВ, сопровождавшиеся эскалацией согласно [12], представлены в табл. 2.



▲ Рис. 3. Распределение аварий с эффектом домино по типам объектов
▲ Fig. 3. Distribution of domino effect accidents by types of facilities

Как видно из более позднего исследования [12], при анализе большего количества аварий существенно увеличилось количество аварий на объектах переработки опасных веществ. А среди причин



▲ Рис. 4. Причины аварий с эскалацией
▲ Fig. 4. Causes of accidents involving escalations

Таблица 2

Опасное вещество	Число аварий	Процент
СУГ	72	22
Бензин	33	10
Нефть	29	9
Газойль (мазут)	20	6
Нафта	14	4
Винилхлорид	13	4
Хлор	11	3
Природный газ	11	3
Аммиак	10	3
Оксид этилена	10	3
Другие вещества	314	95

аварий с эскалацией увеличилось и заняло лидирующую позицию количество аварий по причине внешнего воздействия. Если же рассматривать аварии с эскалацией в различных частях мира, то в промышленно развитых странах больше всего аварий происходило на объектах переработки (44,4 % в странах Евросоюза и 37,8 % в других промышленно развитых странах), тогда как в развивающихся странах количество аварий на объектах хранения и объектах переработки находится на одинаковом уровне (34,6 %). Авторы [12] связывают это с тем, что в развивающихся странах количество объектов хранения больше, чем переработки. Наиболее распространенными источниками аварий с эскалацией являлись резервуары хранения под атмосферным давлением (18,6 %), передвижные транспортные контейнеры и железнодорожные цистерны (13,5 %). Стоит отдельно отметить увеличение числа аварий с эскалацией по причине человеческого фактора. При этом авторы [12] отмечают, что количество аварий с эскалацией по причине человеческого фактора в развивающихся странах составляет 33 %, а в промышленно развитых странах 21 % — для стран Евросоюза и 26 % — для остальных промышленно развитых стран. Авторы объясняют это более плохой подготовкой операторов в области безопасно-

сти, более низкой культурой безопасности, а также менее строгим законодательством в области промышленной безопасности. Среди механических причин аварий с эскалацией авторы [12] в качестве наиболее частых называют превышение давления (16,1 %) и перегрев (15 %), за которыми следуют металлургические дефекты (11,5 %) и утечки через муфты и фланцы (10,3 %). Среди аварий с эскалацией по причине внешнего воздействия большинство связано с воздействием пожаров (49 %), взрывов (28 %) и молний (14 %). Наибольшее количество аварий в обоих случаях [10, 12] сопровождалось выбросом СУГ. Стоит отметить, что 83 % аварий с эскалацией были связаны с горючими веществами и лишь 27 % — с токсическими, 7 % — с коррозионно-активными, при этом, как видно здесь и в табл. 2, суммарный процент превышает 100 — это связано с тем, что во многие аварии было вовлечено более одного опасного вещества [12].

Авторы также выделяют «двухстадийные» аварии с эскалацией, которые включают только первичные (инициирующие) и вторичные события, «трехстадийные» аварии, для которых инициирующие события приводят к возникновению и развитию двух других последующих событий [12]. Из 330 исследованных в [12] аварий 53 % аварий начинались со взрыва, а 47 % — с пожара. Вторичным событием в 61,2 % аварий был взрыв, в 33,5 % — пожар и в 5,3 % — взрыв и облако токсичного газа. Для трехэтапных аварий с эскалацией наиболее частой была последовательность «пожар — взрыв — пожар».

Большинство взрывов на первом этапе аварий с эскалацией приводили к пожару как вторичному событию (81,1 %). В остальных случаях за первым взрывом последовал другой (12,6 %), или образовалось токсичное облако (5,1 %), или произошло то и другое вместе (1,2 %). Достигали третьей стадии 30 аварий: «взрывы — пожар — взрыв» (25 случаев), «взрыв — пожар — пожар» (4 случая) и «взрыв — пожар — токсичное облако» (1 случай) [12].

Из 330 исследованных в [12] аварий 282 являлись «двухстадийными» (85,5 %), 48 аварий были «трехстадийными» и всего лишь одна авария была «четырёхстадийной» со стадийностью «пожар — взрыв — пожар — взрыв».

При оценке возможности и сценариев возникновения и развития эскалации аварии существует мнение, что наибольшую опасность при эскалации аварии представляют возможные реакционные взаимодействия между собой различных опасных веществ, участвующих как в первичной, так и во вторичной, а также последующих авариях, с образованием новых более опасных веществ и полупродуктов.

Реальная возможность такого сценария аварии (тем более эскалации) не подтверждается материалами Ростехнадзора, анализом аварий, а также трудами ведущих специалистов [13, 14]. Как отме-

чено выше, все аварии с эскалацией начинались с воспламенения, горения с пожаром или взрывом ТВС (по сути с химическим процессом образования новых продуктов, во время которого происходят исключительно реакции горения одного или нескольких опасных веществ, полнота протекания которых будет зависеть только от соотношения концентраций горючего и окислителя — воздуха). При этом вторичной аварией в абсолютном большинстве случаев в результате эскалации помимо разрушения оборудования и выброса опасных веществ также были пожар или взрыв, опасность которых оценивается существующими методиками [15]. Для образования новых более опасных веществ (отличающихся от процесса воспламенения ТВС), как правило, нужны очень специфические условия, в том числе наличие катализатора, время, достаточное для смешения и образования массы нового продукта, способной распространяться хотя бы на десятки метров. Более реальным сценарием такого типа может быть ситуация при неуправляемых реакционных процессах внутри химического реактора, сопровождающихся экзотермическими реакциями с последующим внутренним (тепловым) взрывом. Тем не менее, несмотря на то, что данный процесс мало связан с проблемой уточнения класса ОПО, при необходимости такое воздействие при наличии исходных данных о продуктах химического взаимодействия может быть промоделировано на основе существующих методик.

Таким образом, для оценки возможности эскалации аварии необходимо, в первую очередь, определить критерии возможности эскалации аварии в виде пороговых значений воздействия теплового излучения и ударной волны на емкостное оборудование и трубопроводы.

Пороговые величины поражающих факторов эскалации аварии

В приложении 5 руководства [3] приведены критерии разрушения оборудования, в том числе с эскалацией аварии, для различных категорий оборудования ударной волной и тепловым излучением, а также пробит-функции, на основании которых они были получены согласно [5, 16]. Анализ различных источников, приведенных в [9], показывает, что пороговые величины разрушения оборудования при барическом воздействии находятся в интервале от 16 до 37 кПа. При этом слабое разрушение наземных трубопроводов (наиболее частый случай аварий на ОПО) соответствует значению 20 кПа (табл. 5-5 [3]). В [8] приводятся следующие пороговые значения: 20 кПа для оборудования, работающего под избыточным давлением, 31 и 20 кПа для протяженного оборудования с воспламеняющимися и токсичными веществами соответственно и 22 кПа для оборудования, работающего под атмосферным давлением. Данные критерии согласуются с полученными на основании вероятностного подхода [3, 5, 8, 16].

В [17] для определения возможности эскалации авторы предлагают полуколичественный подход, основанный на применении матрицы риска «вероятность — тяжесть последствий», аналогичной приведенной в [3], однако подобный подход является слишком упрощенным, многое в нем зависит от квалификации, опыта и экспертных оценок применяющего данный метод.

Согласно [3] минимальное значение разрушения оборудования вследствие термического поражения (при бесконечно большом времени воздействия) составляет 12 кВт/м^2 . В [8] для оценки риска эскалации предлагают значение плотности теплового излучения при сценариях с развитием факельного горения или пожара пролива, равное 45 кВт/м^2 для оборудования, работающего под избыточным давлением, и 15 кВт/м^2 — для оборудования, работающего под атмосферным давлением. Для сценариев с возникновением огненного шара, вне зависимости от типа оборудования, пороговая интенсивность теплового излучения составляет более 100 кВт/м^2 . Такое большое пороговое значение можно объяснить чрезвычайно коротким временем существования огненного шара (несколько секунд).

Что касается учета иных поражающих факторов, то, как показывают опыт и расчеты, риск инициирования эскалации при осколочном и токсическом воздействии значительно меньше барического и термического воздействия. Тем не менее опасность осколочного поражения должна рассчитываться исходя из конкретного размещения оборудования на ОПО согласно [18]. Токсическое воздействие, несмотря на наибольшую опасность для людей по сравнению с другими поражающими факторами, не может привести к разрушению оборудования, поэтому, учитывая существующие меры химической безопасности, включая оповещение, подготовленность персонала, защищенность операторных, возможность эскалации на ОПО, представляется реальным лишь в случае смертельного поражения персонала, связанного с аварийным остановом и действиями в аварийной ситуации.

Предложения по учету эскалации при идентификации опасных производственных объектов

На основании проведенного анализа для целей уточнения класса опасности ОПО, находящихся на расстоянии менее 500 м друг от друга, их идентификации и регистрации в государственном реестре ОПО рекомендуется рассчитывать пределы вероятных зон действия поражающих факторов аварии, возникшей на рассматриваемом ОПО (т.е. зон воздействия (поражения), возникающих с определенной вероятностью).

Предлагается считать, что соседние ОПО располагаются за пределами вероятной зоны действия поражающих факторов аварий (отсутствие эскалации аварии), если в области расположения оборудования

соседних ОПО, в котором обращаются ОВ, не достигаются следующие показатели:

давление на фронте падающей ударной волны равно 20 кПа , что соответствует нижней границе слабой степени разрушения оборудования (наземных трубопроводов) по табл. № 5-5 приложения 5 к [3], а также критерию разрушения оборудования, работающего под избыточным давлением в соответствии с [8];

интенсивность теплового излучения равна 12 кВт/м^2 , что соответствует минимальной величине интенсивности теплового воздействия, при котором возникает разрушение технологического оборудования согласно формуле 5.4 приложения 5 к [3];

токсодоза смертельного поражения согласно приложению 5 к [3], в том числе определяемая по формуле 5-20 и табл. 5-9 приложения 5 к [3];

зона осколочного поражения, соответствующая 1 % вероятности поражения согласно [18].

При необходимости менее консервативных оценок и наличия необходимой информации (например, при проектировании ОПО) допускается применение иных критериев, в том числе с учетом продолжительности воздействия поражающих факторов, численного моделирования взрывных, тепловых, токсичных и осколочных воздействий, представленных в методиках количественной оценки риска аварий на ОПО.

Предельная частота (вероятность) превышения указанных показателей может быть обоснована при установлении критериев допустимого риска эскалации в соответствии с требованиями федеральных норм и правил и п. 22 [3] путем разработки обоснования безопасности ОПО. Исходя из отечественного и зарубежного опыта [19], декларирования и обоснования безопасности ОПО для крупных проектов («Ямал СПГ», «Арктик СПГ 2» и др.) допустимый риск эскалации может быть установлен на уровне $1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$. В целях учета повышенной опасности эскалации на химически опасных объектах в качестве критерия может быть принят «нулевой риск» — по расчету не «вероятной», а максимальной зоны действия поражающих факторов токсического поражения с учетом мер безопасности и действия персонала при аварийных ситуациях.

Предложенный выше подход в целом может быть также применен для определения зон действия локальной системы оповещения согласно [20] в соответствии с требованиями промышленной безопасности по расчету границ зон воздействия поражающих факторов аварии на декларируемых ОПО.

Заключение

В статье проанализированы требования Федерального закона № 534-ФЗ по изменениям в Федеральном законе № 116-ФЗ, касающимся уточнения класса опасности опасных производственных объектов, находящихся на расстоянии менее 500 м друг от друга.

Проведен анализ происшедших аварий, сопровождавшихся эскалацией (каскадным развитием аварии), показавший, что первичными событиями, инициирующими последующую эскалацию, во всех случаях были пожар или взрыв.

Представлены предложения для выработки единого подхода при выполнении требований Федерального закона № 534-ФЗ при определении класса опасности опасных производственных объектов, находящихся на расстоянии менее 500 м, касающиеся:

уточнения терминологии, связанной с эскалацией аварии, в том числе толкование термина «пределы вероятной зоны действия поражающих факторов аварии»;

установления пороговых значений разрушения оборудования при барическом и термическом воздействиях, приводящих к возникновению эскалации аварии;

обоснования количественных критериев допустимого риска эскалации аварии.

Результаты данной работы рекомендуется отразить в виде дополнения в Руководство по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.С. Софьину (ЗАО НТЦ ПБ), В.А. Ткаченко (АНО «Агентство исследований промышленных рисков») за ценные советы при обсуждении статьи.

Список литературы

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 05.06.2024).
2. О внесении изменений в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»: федер. закон от 14 нояб. 2023 г. № 534-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1303674569> (дата обращения: 05.06.2024).
3. Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: приказ Ростехнадзора от 3 нояб. 2022 г. № 387. URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/acts/Пр-387%20от%2003.11.2022.pdf> (дата обращения: 05.06.2024).
4. Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: Указ Президента Рос. Федерации от 6 мая 2018 г. № 198. URL: <https://docs.cntd.ru/document/557306107> (дата обращения: 05.06.2024).
5. Kardi F., Chatelet E. Domino effect analysis and assessment of industrial sites: A review of methodologies and software tools// International Journal of Computers and Distributed Systems. 2013. № 2 (3). P. 1–10.
6. Chen M.L., Geng Z., Zhu Q.X. A model for the Domino effect analysis in quantitative risk assessment// Applied mechanics

and materials. 2013. Vol. 328. P. 314–317. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.328.314

7. Wu J., Yang H., Cheng Y. Domino effect analysis, assessment and prevention in process industries// Journal of Systems Science and Information. 2015. Vol. 3. Iss. 6. P. 481–498. DOI: 10.1515/JSSI-2015-0481

8. Chao C., Genserik R., Ming Y. Safety and Security of domino effects in the process industry: the state of the art// Integrating safety and security management to protect chemical industrial areas from domino effects. (Springer Series in Reliability Engineering). Springer, 2022. P. 1–48. DOI: 10.1007/978-3-030-88911-1_1

9. Анализ возможности каскадного развития аварии на взрывопожароопасных объектах/ Н.И. Азаров, О.В. Давидюк, Н.В. Кошовец, М.В. Лисанов// Безопасность труда в промышленности. 2007. № 5. С. 42–48.

10. Darbra R.M., Palacios A., Casal J. Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences// Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 183. Iss. 1–3. P. 565–573. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.061

11. Analyzing domino effects occurring on gasoline storage tanks at the bulk oil storage and transportation (bost) depot/ G.A.K. MacCarthy, C.N. Asamoah, B.A. Ephraim et al.// Russian Journal of Construction Science and Technology. 2019. Vol. 5. № 2. P. 15–22. DOI: 10.15826/rjct.2019.2.002

12. The significance of domino effect in chemical accident/ B. Hemmatian, B. Abdolhamidzadeh, R.M. Darbra, J. Casal// Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 29. P. 30–38. DOI: 10.1016/j.jlpl.2014.01.003

13. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 672 с.

14. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. 432 с.

15. Актуализация руководств по безопасности в области оценки риска аварий на производственных объектах/ М.В. Лисанов, А.А. Агапов, С.Х. Зайнетдинов и др.// Безопасность труда в промышленности. 2023. № 7. С. 85–92. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-85-92

16. Cozzani V., Salzano E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models// Journal of Hazardous Materials. 2004. Vol. 107. Iss. 3. P. 67–80. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2003.09.013

17. Domino effect analysis in industrial sites/ L. Sandoval, A. Vallée, B. Le-Roux et al.// Chemical Engineering Transactions. 2019. Vol. 77. P. 583–588. DOI: 10.3303/CET1977098

18. Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа»: приказ Ростехнадзора от 22 дек. 2022 г. № 454. URL: http://www.oaontc.ru/media/filebrowser/pr_454.pdf (дата обращения: 05.06.2024).

19. Жуков И.С., Лисанов М.В. О единых критериях допустимого риска на опасных производственных объектах// Вести газовой науки. 2022. № 2 (51). С. 82–90.

20. О порядке создания, реконструкции и поддержания в состоянии постоянной готовности к использованию систем оповещения населения: постановление Правительства Рос. Федерации от 17 мая 2023 г. № 769. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1301603262> (дата обращения: 05.06.2024).

References

1. On industrial safety of hazardous production facilities: Federal Law of July 21, 1997 № 116-FZ. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/9046058> (accessed: June 5, 2024). (In Russ).
2. On the introduction of changes to the Federal Law «On industrial safety of hazardous production facilities»: the Federal Law of November 14, 2023, № 534-FZ. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1303674569> (accessed: June 5, 2024). (In Russ).
3. On approval of the Safety Guide «Methodological basis for hazard analysis and accident risk assessment at hazardous production facilities»: Order of Rostekhnadzor dated November 3, 2022 № 387. Available at: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/acts/Пп-387%20от%2003.11.2022.pdf> (accessed: June 5, 2024). (In Russ).
4. On the Basics of State Policy of the Russian Federation in the sphere of industrial safety for the period until 2025 and further perspectives: the Decree of the President of the Russian Federation of May 6, 2018, № 198. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/557306107> (accessed: June 5, 2024). (In Russ).
5. Kardi F., Chatelet E. Domino effect analysis and assessment of industrial sites: A review of methodologies and software tools. *International Journal of Computers and Distributed Systems*. 2013. № 2 (3). pp. 1–10.
6. Chen M.L., Geng Z., Zhu Q.X. A model for the Domino effect analysis in quantitative risk assessment. *Applied mechanics and materials*. 2013. Vol. 328. pp. 314–317. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.328.314
7. Wu J., Yang H., Cheng Y. Domino effect analysis, assessment and prevention in process industries. *Journal of Systems Science and Information*. 2015. Vol. 3. Iss. 6. pp. 481–498. DOI: 10.1515/JSSI-2015-0481
8. Chao C., Genserik R., Ming Y. Safety and Security of domino effects in the process industry: the state of the art. Integrating safety and security management to protect chemical industrial areas from domino effects. (Springer Series in Reliability Engineering). Springer, 2022. pp. 1–48. DOI: 10.1007/978-3-030-88911-1_1
9. Azarov N.I., Davidyuk O.V., Koshovets N.V., Lisanov M.V. Analysis of potential development of domino effect accident at explosive and fire-hazardous facilities. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2007. № 5. pp. 42–48. (In Russ).
10. Darbra R.M., Palacios A., Casal J. Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 183. Iss. 1–3. pp. 565–573. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.061
11. MacCarthy G.A.K., Asamoah C.N., Ephraim B.A., Alekhin V.N., Poluyan L.V. Analyzing domino effects occurring on gasoline storage tanks at the bulk oil storage and transportation (bost) depot. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2019. Vol. 5. № 2. pp. 15–22. DOI: 10.15826/rjct.2019.2.002
12. Hemmatian B., Abdolhamidzadeh B., Darbra R.M., Casal J. The significance of domino effect in chemical accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 29. pp. 30–38. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.01.003
13. Marshall V. Basic hazards of chemical productions. Moscow: Mir, 1989. 672 p. (In Russ).
14. Beschastnov M.V. Industrial explosions. Assessment and prevention. Moscow: Khimiya, 1991. 432 p. (In Russ).
15. Lisanov M.V., Agapov A.A., Zaynetdinov S.Kh., Sumskey S.I., Sofyin A.S. Updating Safety Guides in the Field of Accident Risk Assessment at the Production Facilities. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2023. № 7. pp. 85–92. (In Russ). DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-85-92
16. Cozzani V., Salzano E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*. 2004. Vol. 107. Iss. 3. pp. 67–80. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2003.09.013
17. Sandoval L., Vallée A., Le-Roux B., Prod'Homme G., Prats F. Domino effect analyses in industrial sites. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 77. pp. 583–588. DOI: 10.3303/CET1977098
18. On approval of the Safety Guide «Methodology of accident risk assessment at hazardous production facilities of gas transportation trunk pipelines»: the Order of Rostekhnadzor of December 22, 2022, № 454. Available at: http://www.oaontc.ru/media/filebrowser/pr_454.pdf (accessed: June 5, 2024). (In Russ).
19. Zhukov I.S., Lisanov M.V. About the unity of acceptable risk criteria at hazardous production facilities. *Vesti gazovoy nauki = Proceedings of Gas Industry*. 2022. № 2 (51). pp. 82–90. (In Russ).
20. On the procedure of establishment, reconstruction, and maintenance in the constant ready-to-use state of public alert systems: the Resolution of the Government of the Russian Federation of May 17, 2023, № 769. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1301603262> (accessed: June 5, 2024). (In Russ).

E-mail: ilzhukov@safety.ru

**ПАМЯТКА
АВТОРУ**

С авторов научно-технических статей, включая аспирантов, за публикацию их рукописей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Электронная версия опубликованной статьи высылается каждому автору на его электронную почту.