

DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-81-89

УДК 004.021

© А.С. Софьин, С.И. Сумской, 2022

Расчет показателей риска поражения людей с учетом вариативности их присутствия в областях воздействия аварийных процессов на опасных производственных объектах



А.С. Софьин,

канд. техн. наук, зав. отделом,
toxi@safety.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия



С.И. Сумской,

канд. техн. наук,
доцент

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Проведен обзор отечественных и зарубежных подходов к расчету показателей риска. Представлены нововведения в порядок вычисления этих показателей, направленные на более детальный учет времени и вариантов присутствия людей в момент возникновения аварийной ситуации. Рассмотрен пример использования предлагаемого подхода для оценки социального и коллективного рисков.

Ключевые слова: количественная оценка риска, потенциальный риск, индивидуальный риск, социальный риск, коллективный риск, расчет числа погибших, аварийные процессы, опасный производственный объект.

Для цитирования: Софьин А.С., Сумской С.И. Расчет показателей риска поражения людей с учетом вариативности их присутствия в областях воздействия аварийных процессов на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 6. — С. 81–89. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-81-89

Введение

Количественная оценка риска (КОР) — современное средство, позволяющее характеризовать угрозы, исходящие от опасных производственных объектов (ОПО). В результате выполнения КОР рассчитываются показатели риска, как правило, интегральные значения для определенных реципиентов (людей, оборудования, зданий и сооружений), учитывающие частоту и степень их поражения в результате воздействия опасных факторов возможных аварий с выбросом опасных веществ (ОВ). Показатели риска используются для оценки эффективности компенсирующих мероприятий, новых требований промышленной и пожарной безопасности или опасности отступлений от них при разработке специальных

технических условий [1], обоснования безопасности ОПО [2]. Количественная оценка риска является обязательной процедурой при декларировании промышленной безопасности [3].

В настоящее время методология КОР активно развивается во всем мире. Порядок расчета показателей риска — базовый раздел этой методологии, приведен в различных нормативных и методических документах, как отечественных [4, 5], так и зарубежных [6–8]. Примеры применения КОР на практике можно найти в литературе [9–11].

Перечень основных рассчитываемых показателей риска сложился еще в 1970–1980-е годы. Так, например, в отечественной практике применяются следующие показатели риска гибели людей:

потенциальный риск, представляющий собой территориальное распределение частоты реализации опасных факторов, соответствующих гибели человека. В зарубежной практике данный показатель имеет название «индивидуальный риск» (англ. Individual Risk) [6–8];

коллективный риск (в зарубежных источниках — «средний уровень смертности» (англ. Average Rate of Death) [7] — ожидаемое количество погибших в течение заданного периода (обычно года);

социальный риск (англ. Societal Risk [6–8]) — функция зависимости накопленной частоты аварий, при которых погибнут N и более человек;

индивидуальный риск — частота гибели отдельного человека либо одного человека из определенной группы людей, имеющих сходные характеристики пребывания. В отечественной практике наряду с социальным риском данный показатель является основным индикатором опасности для человека. Именно для этих двух показателей в [12] представлены предельно допустимые значения для персонала ОПО и людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи ОПО. Показатель, соответствующий индивидуальному риску, в зарубежных источниках не приводится, вместо него применяются показатели Potential Loss of Life (для населения), Fatal Accident Rate (для персонала ОПО) и Average Rate of Death.

Аналогичные показатели используются как для других (отличных от смертельного) уровней поражения, так и иных реципиентов.

Несмотря на некоторые различия в терминах и в выборе ключевых показателей, отражающих опасность для реципиентов, принципы расчета перечисленных величин риска в отечественной и зарубежной практиках абсолютно идентичны. Они базируются на методах математической статистики и теории вероятности. Наиболее подробно эти подходы описаны в руководстве по безопасности Ростехнадзора [4] и технической документации DNV GL к программному продукту PHAST.

Рассмотрим особенности отечественных и зарубежных методик по расчету показателей риска.

Потенциальный риск

Порядок определения показателей «потенциальный риск» [4] и Individual Risk [6–8] базируется на схожих соотношениях с некоторыми отличиями.

Потенциальный риск гибели человека на открытом пространстве в некоторой точке (x, y) (в предположении постоянного нахождения человека в этой точке), согласно [4], вычисляется по формуле:

$$R_{\text{пот}} = \sum_{i=1}^I Q_i \min \left\{ 1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} \left[1 - v_{ij \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y) \right] \right\}, \quad (1)$$

где I — число сценариев развития аварий; Q_i — частота реализации в течение года i -го сценария развития аварии, год⁻¹; $\Phi_i(x, y)$ — число опасных факторов, которые реализуются одновременно в результате возникновения i -го сценария аварии; $v_{ij \text{ уяз}}(x, y)$ — коэффициент уязвимости человека от j -го поражающего фактора при реализации i -го сценария аварии; $P_{ij \text{ гиб}}(x, y)$ — условная вероятность гибели незащищенного человека на открытом пространстве в точке территории с координатами (x, y) от j -го поражающего фактора при реализации i -го сценария аварии.

Расчет Individual Risk, например в программном продукте DNV PHAST, выполняется по соотношению:

$$IR_{\text{Tot } xy} = \sum_{\text{All EDFs}} \sum_{\text{All weathers}} P_w F_{\text{EDF}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_{\theta/w} P_{d/\theta w}) d\theta, \quad (2)$$

где All EDFs — учитываются все сценарии аварии (от англ. EDF — Equivalent Discrete Failure — эквивалентная дискретная авария); All weathers — учитываются все варианты погодных условий; P_w — вероятность заданных погодных условий; F_{EDF} — частота эквивалентной дискретной аварии; θ_2, θ_1 — углы, определяющие границы сектора (румба), в котором направления ветра заменяются дискретным значением; $P_{\theta/w}$ — условная вероятность того, что при заданных погодных условиях реализуется данное дискретное направление ветра; $P_{d/\theta w}$ — условная вероятность смертельного поражения при определенных дискретном направлении ветра и погодных условиях в точке (x, y) .

Формула (2) в конечном итоге также является распределением в координатах (x, y) , но получаемым при рассмотрении зон поражения в виде секторов на различных расстояниях. При этом в логике расчета территориального распределения вероятности смертельного поражения $P_{ij \text{ гиб}}(x, y)$ в формуле (1) также может быть заложен механизм осреднения вероятностей в пределах румба, аналогичный

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} [P_{\theta/w} P_{d/\theta w}] d\theta.$$

Соотношение (1) имеет более общую формулировку, поскольку формула (2) учитывает появление различных опасных факторов только в разных EDF, в то время как формула (1) позволяет учесть вероятность гибели человека в рамках сценариев, при которых реализуется несколько опасных факторов. Характерным примером такого сценария является разрушение магистрального газопровода, в результате которого возникает вероятность поражения осколками, воздушной ударной волной, кинетическим воздействием высокоскоростной струи и (или) тепловым излучением при возгорании газа [13].

Дополнительно в формуле (2), согласно документации к программному продукту PHAST, учитывается коэффициент летальности (Fatality Factor), который корректирует вероятность смертельного поражения для людей различной степени защищенности, находящихся в зданиях или сооружениях и на открытой местности. Значение этого коэффициента также зависит от характера опасного фактора. Как легко заметить, значения коэффициента уязвимости $v_{ij \text{ уяз}}$ в точке (x, y) [4] и коэффициента летальности представляют собой близкие по смыслу величины.

Условные вероятности $P_{ij \text{ гиб}}(x, y)$ и $P_{d/\theta w}$ обычно рассчитываются для незащищенного человека, находящегося на открытом пространстве. Коэффициенты уязвимости $v_{ij \text{ уяз}}(x, y)$ и коэффициенты летальности (Fatality Factor) позволяют учесть как средства защиты людей от опасных факторов (в том числе и индивидуальные), так и барьеры на пути их распространения. Если барьеры (естественные и искусственные препятствия на пути опасных факторов) являются характеристикой местности, то, например, индивидуальные средства защиты представляют собой характеристику определенной группы реципиентов. Таким образом, при учете, например, наличия средств защиты органов дыхания у персонала ОПО с помощью коэффициента $v_{ij \text{ уяз}}(x, y)$ поля потенциального риска выброса токсических веществ для персонала и населения будут отличаться.

Расчет числа погибших

Важным элементом расчета таких показателей риска, как коллективный и социальный, является оценка возможного числа погибших в результате действия опасных факторов аварии. Такие оценки выполняются на основе территориальных распределений вероятностей смертельного поражения $P_{ij \text{ гиб}}(x, y)$ j -м опасным фактором i -й аварии и территориального

(по области $\Omega_i = \bigcup_{j=1}^{\Phi_i} \Omega_{ij}$, где Ω_{ij} — область действия j -го поражающего фактора) распределения людей $\mu_d(x, y)$ на момент начала и период протекания аварии [4]:

$$N_{i \text{ гиб}} = \int_{\Omega_i} \mu_d(x, y) \min \{1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x, y)} [1 - v_{ij \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y)]\} dx dy. \quad (3)$$

Аналогичный подход предлагается и в других методиках, в том числе и зарубежных [6, 7]. Данное соотношение позволяет получить количество погибших в результате конкретной аварии i и при определенном размещении людей $\mu_d(x, y)$, выраженное в общем случае нецелым числом. При этом в отечественных отчетных материалах по КОР принято представлять число жертв аварии в виде округленного до большего целого числа. Такое правило используется, в частности, в программном комплексе TOXI+Risk 5 [14]. В программном комплексе PHAST/SAFETI данное значение выводится в отчетах без округления (за исключением $F-N$ -диаграммы).

Руководство по безопасности [4] также учитывает, что люди могут перемещаться по площадке в течение дня и присутствовать в разное время в области воздействия опасных факторов: одна и та же i -я аварийная ситуация может возникнуть при различных l -х распределениях $\mu_l(x, y)$.

Состояния l выбираются в зависимости от сменности персонала, проведения аварийных (регламентных) ремонтных или строительных работ на территории ОПО, периодического появления массового скопления людей вблизи ОПО. При этом проводится разделение людей на группы и подгруппы. Как правило, выделяют две группы людей: персонал ОПО и третьих лиц (жители окрестных населенных пунктов, работники расположенных поблизости к ОПО предприятий). Разбиение на подгруппы проводят исходя из различий в расположении мест нахождения людей (рабочих мест, мест проживания, присутствия и т.д.) и во времени их присутствия в области возможного воздействия аварии. В пределах каждой подгруппы поведение людей характеризуется одинаковыми параметрами: степенью защищенности, временем нахождения на соответствующей территории. Практика показывает, что такой двухуровневой структуры вполне достаточно, чтобы учесть практически все различные особенности пребывания людей.

Приведем пример, в котором опасность подвергают люди из двух выделенных групп:

персонала ОПО (группа с индексом $p = 1$ состоит из двух смен — ежедневной смены 8–20 ч, подгруппа с $k = 1$, и смены по будням 8–17 ч, подгруппа с $k = 2$); населения, присутствующего вблизи ОПО постоянно (группа с индексом $p = 2$).

Тогда имеются три состояния L , в которых могут пострадать люди:

состояние $l = 1$ реализуется по будням с 8 до 17 ч (в результате аварии могут пострадать персонал подгрупп $k = 1$ и $k = 2$, а также местные жители);

состояние $l = 2$ реализуется по будням с 17 до 20 ч и выходным с 8 до 20 ч (в результате аварии могут пострадать персонал подгруппы $k = 1$, а также местные жители);

состояние $l = 3$ реализуется в остальное время (пострадать могут только местные жители).

Описанный подход позволяет рассчитывать и среднее число погибших для L распределений людей:

$$N_{i \text{ ср. гиб}} = \sum_{l=1}^L \int_{\Omega_i} \mu_l(x, y) q_l \min \{1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x, y)} [1 - v_{ij \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y)]\} dx dy, \quad (4)$$

где q_l — доля времени, в течение которого сохраняется l -е территориальное распределение людей $\mu_l(x, y)$.

В практике анализа риска принято определять показатели риска отдельно для каждой подгруппы лиц и в целом по группе. При этом порядок применения формул (3), (4) в условиях разделения людей на группы и подгруппы не описан ни в одной из методик. Формулы (3) и (4) предназначены для расчета общего числа погибших в результате реализации сценария i . Соответственно, оценка погибших по всем подгруппам выполняется суммированием средних оценок погибших по каждой группе, выраженных вещественными числами.

Такой подход приводит к ситуации, когда возникает ошибка округления. Проиллюстрировать это можно следующим примером. На предприятии в момент аварии находились две подгруппы людей (k), имеющие разный режим работы. Оценка погибших по формуле (3) показала, например, что в первой группе число погибших составляет $N_{i(k=1) \text{ гиб}}(x, y) = 0,3$ человека, а во второй $N_{i(k=2) \text{ гиб}}(x, y) = 0,5$ человека, итого 0,8 человека. Максимальное среднее число погибших по формуле (3) $\lceil N_{i \text{ гиб}} \rceil = 1$ человек. Если проводить округление по каждой группе, то общее максимальное среднее число погибших составляет $\lceil N_{i(k=1) \text{ гиб}} \rceil + \lceil N_{i(k=2) \text{ гиб}} \rceil = 2$ человека. При этом в отчетах об оценке погибших, как правило, приводятся максимальные средние значения погибших в каждой группе и подгруппе людей $\lceil N_{i(k=1) \text{ гиб}} \rceil$ и $\lceil N_{i(k=2) \text{ гиб}} \rceil$, а при построении $F-N$ -диаграммы $\lceil N_{i \text{ гиб}} \rceil$. Это в ряде случаев приводит к расхождению числа погибших в этих показателях на 1.

Для исправления этого недостатка предлагается выполнять расчет и округление среднего числа погибших по каждой подгруппе лиц. Для этого пред-

¹ Здесь и далее: скобки $\lceil \dots \rceil$ и $\lfloor \dots \rfloor$ используются для округления соответственно до большего и меньшего целого.

лагается переписать формулы (3) и (4) следующим образом:

$$N_{ikpl \text{ гиб}} = \int \int_{\Omega_i} \mu_{kpl}(x, y) \min \{1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} [1 - v_{ijkpl \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y)]\} dx dy; \quad (5)$$

$$N_{ikp \text{ ср. гиб}} = \sum_{l=1}^L \left(\int \int_{\Omega_i} \mu_{kpl}(x, y) q_{kpl}(x, y) \min \{1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} [1 - v_{ijkpl \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y)]\} dx dy \right), \quad (6)$$

где индексы k и p обозначают номер подгруппы в группе людей и номер группы людей; $v_{ijkpl \text{ уяз}}(x, y)$ — коэффициент уязвимости от j -го фактора в i -м сценарии для людей из k -й подгруппы p -й группы; $\mu_{kpl}(x, y)$ — плотность распределения людей из k -й подгруппы p -й группы в момент аварии i ; q_{kpl} — доля времени, в течение которого реализуется распределение l .

При расчетах по формулам (5) и (6) будут также получены вещественные результаты, которые при представлении в отчетах следует округлять в большую сторону. Для расчета числа погибших по группе p или общего числа погибших следует применять формулы:

$$N_{il \text{ гиб(ср. гиб)}} = \sum_{p=1}^P N_{ipl \text{ гиб(ср. гиб)}}; \quad (7)$$

$$N_{ip \text{ гиб(ср. гиб)}} = \sum_{k=1}^K [N_{ikpl \text{ гиб(ср. гиб)}}]. \quad (8)$$

Коллективный риск

Подходы к расчету коллективного риска [4] и его зарубежного аналога Average Rate of Death [7] являются идентичными:

$$R_{\text{колл}} = \sum_{i=1}^I N_{i \text{ гиб}} Q_i. \quad (9)$$

Данная формула исторически связана с рассмотрением единственного не меняющегося от аварии к аварии распределения людей, в этом случае Q_i рассматривается как частота разрушения оборудования.

Однако эта формула может использоваться и в случае пребывания одних и тех же людей в разных местах — $\mu_{kpl}(x, y)$. Тогда, чтобы избежать двойного учета пострадавших, в качестве Q_i необходимо рассматривать частоту разгерметизации при конкретном распределении людей. То есть при одних и тех же условиях аварии рассматриваются несколько сценариев, отличных по месту нахождения одной и той же

группы людей. Для учета этого, а также для расчета коллективного риска с разбиением по группам (подгруппам) соотношение (9) может быть переписано в следующем виде для людей из k -й подгруппы p -й группы, для всех людей из p -й группы и всех людей вблизи объекта:

$$R_{kp \text{ колл. гиб}} = \sum_{i=1}^I N_{ikp \text{ ср. гиб}} Q_i; \quad (10)$$

$$R_p \text{ колл. гиб} = \sum_{k=1}^K R_{kp \text{ колл. гиб}}; \quad (11)$$

$$R_{\text{колл. гиб}} = \sum_{p=1}^P R_p \text{ колл. гиб}. \quad (12)$$

Социальный риск

Социальный риск определяется в зарубежной и отечественной литературе [4, 6–8] как функция зависимости частоты гибели N и более людей в результате реализации аварийного события. Данная функция представляется в виде столбчатой диаграммы (F – N -диаграмма):

$$F(x) = \sum_{i=1}^{I(x)} Q_{xi}, \quad (13)$$

где Q_{xi} — ожидаемые частоты реализации i -х аварийных ситуаций, при которых гибнет не менее x человек.

Описаны различные методы построения этой функции [4, 15]. Стандартный подход, применяемый в программных комплексах TOXI+Risk 5 [14] и DNV PHAST/SAFETI, подразумевает использование в качестве значений N результатов расчета $N_{i \text{ гиб}}$ для одного распределения людей $\mu(x, y)$. Так как N — это целое число, то вещественное значение $N_{i \text{ гиб}}$ представляется в виде распределений $\lceil N_{i \text{ гиб}} \rceil$ (округление до большего целого) с условной вероятностью $(N_{i \text{ гиб}} - \lfloor N_{i \text{ гиб}} \rfloor)$ и $\lfloor N_{i \text{ гиб}} \rfloor$ (округление до меньшего целого) с условной вероятностью $(\lceil N_{i \text{ гиб}} \rceil - N_{i \text{ гиб}})$. Таким образом, один сценарий аварии, при котором с частотой Q_i в среднем погибало $N_{i \text{ гиб}}$, разделяется на два исхода: с частотой $Q_i(N_{i \text{ гиб}} - \lfloor N_{i \text{ гиб}} \rfloor)$ реализуется гибель $\lceil N_{i \text{ гиб}} \rceil$ человек; с частотой $Q_i(\lceil N_{i \text{ гиб}} \rceil - N_{i \text{ гиб}})$ реализуется гибель $\lfloor N_{i \text{ гиб}} \rfloor$. Существуют и другие подходы, основанные на использовании иных распределений гибели людей в результате аварии, например, с применением функции ошибок или формулы Бернулли [15].

В данной работе предлагается модернизировать стандартный подход, чтобы он учитывал различные варианты распределения людей $\mu(x, y)$.

При использовании формулы (5) в результате реализации сценария аварии i число погибших $N_{ikpl \text{ гиб}}$ определяется для каждой k -й подгруппы p -й группы лиц и l -го варианта их распределения. Указанные значения для представления в F – N -диаграмме необходимо округлять до целых. Округление прово-

дится аналогично приведенному выше описанию до меньшего и большего целых ($\lfloor N_{ikpl \text{ гиб}} \rfloor$ и $\lceil N_{ikpl \text{ гиб}} \rceil$). Частота реализации таких сценариев аварии в этом случае вычисляется с учетом доли времени реализации распределения q_i :

$$Q_i q_i (\lceil N_{ikpl \text{ гиб}} \rceil - N_{ikpl \text{ гиб}}) \text{ для сценария с гибелью } \lfloor N_{ikpl \text{ гиб}} \rfloor \text{ человек;}$$

$$Q_i q_i (N_{ikpl \text{ гиб}} - \lfloor N_{ikpl \text{ гиб}} \rfloor) \text{ для сценария с гибелью } \lceil N_{ikpl \text{ гиб}} \rceil \text{ человек.} \quad (14)$$

С учетом того, что в каждой подгруппе k число погибших описывается распределением (14), то для людей в p -й группе при их l -м распределении и реализации i -го сценария получается $T = 2^K$ вариантов возможных исходов. Данные исходы описываются уникальными комбинациями значений ($\lceil N_{ikpl \text{ гиб}} \rceil$ и $\lfloor N_{ikpl \text{ гиб}} \rfloor$) среди k -х подгрупп p -й группы лиц. Комбинации строятся по принципу полного факторного эксперимента. Минимальное число погибших $N_{ip(t=1)l \text{ гиб}}$ будет определяться первым соотношением ($t = 1$), а максимальное — последним ($t = 2^K$):

$$\left\{ \begin{aligned} N_{ip(t=1)l \text{ гиб}} &= \lfloor N_{i(k=1)pl \text{ гиб}} \rfloor + \lfloor N_{i(k=2)pl \text{ гиб}} \rfloor + \dots + \\ &+ \lfloor N_{i(k=K-1)pl \text{ гиб}} \rfloor + \lfloor N_{i(k=K)pl \text{ гиб}} \rfloor; \\ &\vdots \\ N_{ip(t=2^K)l \text{ гиб}} &= \lceil N_{i(k=1)pl \text{ гиб}} \rceil + \lceil N_{i(k=2)pl \text{ гиб}} \rceil + \dots + \\ &+ \lceil N_{i(k=K-1)pl \text{ гиб}} \rceil + \lceil N_{i(k=K)pl \text{ гиб}} \rceil. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Частоты возникновения соответствующих t -х вариантов гибели людей Q_{it} определяются следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{it(t=1)} &= Q_i q_i (\lceil N_{i(k=1)pl \text{ гиб}} \rceil - N_{i(k=1)pl \text{ гиб}}) \times \\ &\times (\lceil N_{i(k=2)pl \text{ гиб}} \rceil - N_{i(k=2)pl \text{ гиб}}) \dots \times \\ &\times (\lceil N_{i(k=K-1)pl \text{ гиб}} \rceil - N_{i(k=K-1)pl \text{ гиб}}) \times \\ &\times (\lceil N_{i(k=K)pl \text{ гиб}} \rceil - N_{i(k=K)pl \text{ гиб}}); \\ &\vdots \\ Q_{it(t=2^K)} &= Q_i q_i (N_{i(k=1)pl \text{ гиб}} - \lfloor N_{i(k=1)pl \text{ гиб}} \rfloor) \times \\ &\times (N_{i(k=2)pl \text{ гиб}} - \lfloor N_{i(k=2)pl \text{ гиб}} \rfloor) \dots \times \\ &\times (N_{i(k=K-1)pl \text{ гиб}} - \lfloor N_{i(k=K-1)pl \text{ гиб}} \rfloor) \times \\ &\times (N_{i(k=K)pl \text{ гиб}} - \lfloor N_{i(k=K)pl \text{ гиб}} \rfloor). \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Для учета вариантов расположения людей l соотношение по определению социального риска (13) для людей из p -й группы следует записать следующим образом:

$$F(N) = \sum_i \sum_l \sum_t^{2^K} Q_{it} \theta(N_{ip(t) \text{ гиб}} - N), \quad (17)$$

где $\theta(X)$ — функция Хевисайда:

$$\theta(X) = \begin{cases} 0, & X < 0; \\ 1, & X \geq 0. \end{cases} \quad (18)$$

Пример расчета социального и коллективного рисков

Рассмотрим следующий пример.

Вблизи ОПО находится предприятие, на котором работают (группа лиц $p = 1$) два диспетчера (подгруппа $k = 1$) и бригада рабочих из шести человек (подгруппа $k = 2$). Диспетчеры работают с 8 до 20 ч каждый день. Бригада рабочих трудится с 8 до 17 ч ежедневно и может находиться с вероятностью 40 % в одной части предприятия (объект 1), а с вероятностью 60 % в другой (объект 2). В результате реализации единственно возможного сценария ($i = 1$) аварии на ОПО с частотой $Q = 1 \cdot 10^{-6}$ 1/год оценены следующие условные вероятности гибели людей в местах их пребывания: диспетчеров ($k = 1$) — 0,4; бригады работников ($k = 2$) на объекте 1 — 0,7; бригады рабочих ($k = 2$) на объекте 2 — 0,5.

Ниже представлен алгоритм построения F - N -диаграммы с учетом нового подхода, предложенного в работе.

1. Определим варианты размещения людей l и вероятность их реализации, а также частоту реализации вариантов последствий аварии с учетом l :

$l = 1$: с 8 до 17 ч, когда диспетчеры и бригада рабочих присутствуют на ОПО одновременно, причем бригада рабочих находится на объекте 1:

$$q_1 = 8/24 \cdot 0,4 = 0,133;$$

$$Qq_1 = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,133 = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год;}$$

$l = 2$: с 8 до 17 ч, когда диспетчеры и бригада рабочих присутствуют на ОПО одновременно, причем бригада рабочих находится на объекте 2:

$$q_2 = 8/24 \cdot 0,6 = 0,2;$$

$$Qq_2 = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год;}$$

$l = 3$: с 17 до 20 ч, когда диспетчеры присутствуют на рабочем месте, а бригада рабочих ушла:

$$q_3 = 3/24 = 0,125;$$

$$Qq_3 = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,125 = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год;}$$

$l = 4$: с 20 до 8 ч, когда предприятие не работает, в этом случае пострадавших в результате аварии нет.

2. Определим число погибших для каждой подгруппы лиц по формуле (5). Для удобства чтения индексы i и p пропущены, $v_{ijp \text{ уяз}}(x, y) = 1$; $\Phi_i(x, y) = 1$:

$$N_{(k=1)(l=1) \text{ гиб}} = \int \int_{\Omega_i} \mu_{kpl}(x, y) \min \{1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} [1 - v_{ij \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y)]\} \times dx dy = 2 \cdot 0,4 = 0,8;$$

$$N_{(k=2)(l=1) \text{ гиб}} = 6 \cdot 0,7 = 4,2;$$

$$N_{(k=1)(l=2) \text{ гиб}} = 2 \cdot 0,4 = 0,8;$$

$$N_{(k=2)(l=2) \text{ гиб}} = 6 \cdot 0,5 = 3;$$

$$N_{(k=1)(l=3) \text{ гиб}} = 2 \cdot 0,4 = 0,8;$$

$$N_{(k=2)(l=3) \text{ гиб}} = 0;$$

$$N_{(k=1)(l=4) \text{ гиб}} = 0;$$

$$N_{(k=2)(l=4) \text{ гиб}} = 0.$$

3. Определяем варианты гибели людей t для различных вариантов их присутствия l (табл. 1).

$$N_{(k=1) \text{ ср. гиб}} = \sum_{l=1}^L \left(\int \int_{\Omega_i} \mu_{kpl}(x, y) q_{kpl} \min \{1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} [1 - v_{ij \text{ уяз}}(x, y) P_{ij \text{ гиб}}(x, y)]\} dx dy \right) = 2 \cdot 0,133 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,2 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,125 \cdot 0,4 = 0,3664.$$

Среднее число погибших работников бригады:

$$N_{(k=2) \text{ ср. гиб}} = 6 \cdot 0,133 \cdot 0,7 + 6 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = 1,1586.$$

Коллективный риск гибели диспетчеров, 1/год:

$$R_{(k=1) \text{ колл}} = \sum_{i=1}^I N_{(k=1) \text{ ср. гиб}} Q = 0,3664 \cdot 10^{-6} = 3,664 \cdot 10^{-7}.$$

Коллективный риск гибели работников бригады, 1/год:

$$R_{(k=2) \text{ колл}} = 1,1586 \cdot 10^{-6}.$$

Общий коллективный риск гибели диспетчеров и работников бригады $R_{\text{колл}}$, 1/год:

$$R_{\text{колл. гиб}} = \sum_{k=1}^K R_{k \text{ колл. гиб}} = 3,664 \cdot 10^{-7} + 1,1586 \cdot 10^{-6} = 1,525 \cdot 10^{-6}.$$

Таблица 1

Вариант t	Округленное число погибших диспетчеров $N_{(k=1) \text{ гиб}}$	Округленное число погибших работников бригады $N_{(k=2) \text{ гиб}}$	Общее число погибших $N_{\text{гиб}}$	Частота реализации вариантов последствий аварии Q_{it} , 1/год
$l = 1$				
1	0	4	4	$1,33 \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 \cdot 0,8 = 2,128 \cdot 10^{-8}$
2	1	4	5	$1,33 \cdot 10^{-7} \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 8,512 \cdot 10^{-8}$
3	0	5	5	$1,33 \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 \cdot 0,2 = 5,320 \cdot 10^{-9}$
4	1	5	6	$1,33 \cdot 10^{-7} \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 2,128 \cdot 10^{-8}$
$l = 2$				
1	0	3	3	$2,00 \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 \cdot 1 = 4,000 \cdot 10^{-8}$
2	1	3	4	$2,00 \cdot 10^{-7} \cdot 0,8 \cdot 1 = 1,600 \cdot 10^{-7}$
$l = 3$				
1	0	0	0	$1,25 \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 \cdot 1 = 2,500 \cdot 10^{-8}$
2	1	0	1	$1,25 \cdot 10^{-7} \cdot 0,8 \cdot 1 = 1,000 \cdot 10^{-7}$
$l = 4$				
Нет погибших				

4. По данным табл. 1 с помощью формулы (17) выполняется построение $F-N$ -диаграммы. В табл. 2 представлены значения аргумента и функции $F-N$ -диаграммы (см. рисунок).

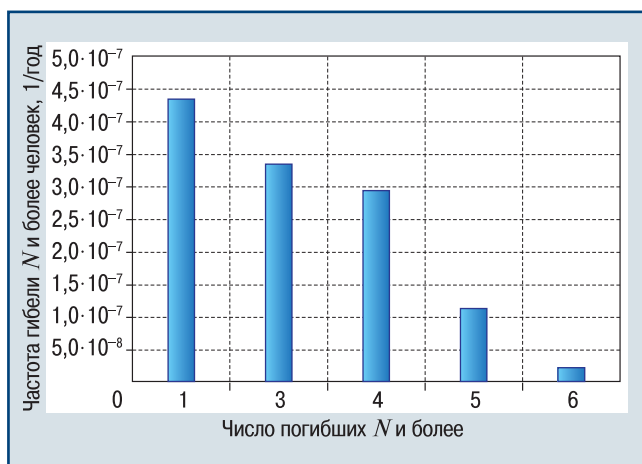
5. Проверка. Интеграл по $F-N$ -диаграмме должен быть равен коллективному риску.

Определим коллективный риск по формулам (6) и (10)–(12).

Среднее число погибших диспетчеров:

Таблица 2

Число погибших N и более	Частота гибели N и более человек, 1/год
1	$4,330 \cdot 10^{-7}$
3	$3,330 \cdot 10^{-7}$
4	$2,930 \cdot 10^{-7}$
5	$1,117 \cdot 10^{-7}$
6	$2,128 \cdot 10^{-8}$



▲ *F-N*-диаграмма
▲ *F-N*-diagram

Интеграл по *F-N*-диаграмме составляет $1,525 \cdot 10^{-6}$ 1/год, что свидетельствует о совпадении результатов и корректности изложенного подхода.

Заключение

Проведен обзор отечественной и зарубежной методологии оценки показателей риска. Показано, что, несмотря на различия в названиях, базовые подходы для определения показателей коллективного, потенциального и социального риска являются общепринятыми. Существующие расхождения в конкретных формулах подчеркивают развитие алгоритмов расчета показателей риска в нескольких параллельных направлениях.

Одним из таких направлений является более детальный учет расположения людей и времени их пребывания при проведении оценки последствий аварий, предложенный в статье. Такой подход позволяет учесть:

динамику изменения числа людей на объекте и в его окрестностях в течение заданного периода (день, неделя, месяц). Такая возможность позволяет учесть, например, то, что наихудшие варианты устойчивости атмосферы, которые существенно влияют на рассеивание опасных веществ, реализуются главным образом в вечернее и ночное время, когда существенно меньше сотрудников присутствует на опасном производственном объекте, больше людей находятся дома, а также временные скопления людей в течение дня, например, в обеденный перерыв в столовой;

вероятность нахождения людей в различных местах зоны потенциальной опасности;

больше возможных вариантов последствий аварий и получить более детальные и точные оценки числа погибших и социального риска по сравнению с существующими подходами.

Приведенный подход может быть использован не только для оценок числа погибших, но и для расчета числа пострадавших более легкой степени тяжести, что обеспечивается путем замены распределения условной вероятности гибели с учетом защищеннос-

ти $v_{ijkp_{\text{уяз}}}(x, y)P_{ij_{\text{гиб}}}(x, y)$ на соответствующее значение условной вероятности получения нелетального поражения.

Представлен пример, иллюстрирующий применение нового алгоритма расчета показателей социального и коллективного рисков. Показана непротиворечивость полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение с ОИВТ РАН от 23 сентября 2020 г. № 075-15-2020-785).

Список литературы

1. *Методические рекомендации «Порядок построения и оформления специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства»: решение Нормативно-технического совета Минрегиона России, протокол от 1 февр. 2011 г. № 1.* URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200086233> (дата обращения: 30.04.2022).
2. *О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ.* — 23-е изд., испр. и доп. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2022. — 52 с.
3. *Об утверждении Порядка оформления декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов и перечня включаемых в нее сведений: приказ Ростехнадзора от 16 окт. 2020 г. № 414.* URL: <https://base.garant.ru/75073030/> (дата обращения: 30.04.2022).
4. *Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: приказ Ростехнадзора от 11 апр. 2016 г. № 144.* URL: <https://docs.cntd.ru/document/420347908> (дата обращения: 30.04.2022).
5. *Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (с изменениями на 14 декабря 2010 г.): приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404.* URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения: 30.04.2022).
6. *Uijt de Haag P.A.M., Ale B.J.M. Guidelines for quantitative risk assessment. Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3). Part one: Establishments.* URL: <https://content.publicatierEEKSgevaarlijkstoff.nl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf> (дата обращения: 30.04.2022).
7. *Guidelines For Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Second edition.* — New York: American Institute of Chemical Engineers, 2000. — 756 p.
8. *Lees F.P. Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Volume 1. Second edition.* — Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.
9. *Анализ риска аварий на магистральном трубопроводе, транспортирующем широкую фракцию легких углеводородов/ С.И. Сумской, А.В. Пчельников, Е.Л. Шанина и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2007. — № 2. — С. 48–52.*
10. *Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обоснова-*

нии минимальных безопасных расстояний// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 3. — С. 58–63.

11. *Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений/ Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.А. Швыряев// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 6. — С. 82–89.*

12. *Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 30.04.2022).*

13. *Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа»: приказ Ростехнадзора от 26 дек. 2018 г. № 647. URL: <https://docs.cntd.ru/document/552055785> (дата обращения: 30.04.2022).*

14. *Использование программного комплекса ТОКСИ+Risk для оценки пожарного риска/ А.А. Агапов, И.О. Лазукина, А.П. Марухленко и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 1. — С. 46–52.*

15. *Дегтярев Д.В., Печеркин А.С. Проблемы методологии оценки социального риска. Применение формулы Бернулли// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 11. — С. 50–53.*

toxi@safety.ru

Материал поступил в редакцию 5 мая 2022 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2022, № 6, pp. 81–89.
DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-81-89

Calculation of the Indicators of the Risk of People Damage Considering the Variability of Their Presence in the Areas of Emergency Processes Impact at Hazardous Production Facilities

A.S. Sofyin, Cand. Sci. (Eng.), Department Head,
toxi@safety.ru

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

S.I. Sumskoy, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.

NRNU MEPhI, Moscow, Russia

Abstract

Risk indicators, as a rule, are integral values for certain recipients (people, equipment, buildings, and structures) considering the frequency and degree of their damage as the result of exposure to hazardous factors of possible accidents with the release of hazardous substances. Risk indicators are used for assessing the efficiency of the compensatory measures, new industrial and fire safety requirements, or the risk of deviations from them when developing special technical conditions, safety case for hazardous production facilities. The list of the main calculated risk indicators was formed back in the 1970s–1980s. For example, in the domestic and foreign practice, the following indicators of the risk of people death are used: potential risk (individual risk), collective risk (average rate of death), social risk (societal risk), individual risk (there is no foreign analogue). Overview of the approaches to the calculation of these indicators is given in the article, it is shown that they are generally accepted.

A new approach to the calculation of risk indicators is proposed, which allows to consider the location of people and the time of their stay in more detail. Consider, in particular, dynamics of changes in the number of people at the facility, and in its vicinity during a given period, and the likelihood of people being in different places of the potential hazard zone at a particular point in time. These innovations make it possible to consider, for example, presence of the employees in different places during the working day, temporary gatherings of people during the day, for example, at the lunchtime in the canteen.

Example of performing calculations according to the presented methodology is given. Consistency of the obtained results is shown.

Key words: quantitative risk assessment, potential risk, individual risk, social risk, collective risk, calculation of the death toll, emergency processes, hazardous production facility.

References

1. Methodological recommendations «Procedure for the construction and execution of special technical conditions for the development of design documentation for a capital construction object»: decision of the Regulatory and Technical Council of the Ministry of Regional Development of Russia, protocol dated February 1, 2011 № 1. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200086233> (accessed: April 30, 2022). (In Russ.).

2. On industrial safety of hazardous production facilities: Federal Law of July 21, 1997 № 116-FZ. 23-e izd., ispr. i dop. Moscow: ZAO NTTs PB, 2022. 52 p. (In Russ.).

3. On the approval of the Procedure of executing an industrial safety declaration for hazardous production facilities, and the list of information included in it: Order of Rostekhnadzor dated October 16, 2020 № 414. Available at: <https://base.garant.ru/75073030/> (accessed: April 30, 2022). (In Russ.).

4. On the approval of Safety Guide «Methodological Framework for Hazard Analysis and Accident Risk Assessment at Hazardous Production Facilities»: Order of Rostekhnadzor dated April 11, 2016 № 144. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420347908> (accessed: April 30, 2022). (In Russ.).

5. On the approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities (with the amendments as of December 14, 2010): Order of the Russian Emergencies Ministry dated July 10, 2009 № 404. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902170886> (accessed: April 30, 2022). (In Russ.).

6. Uijt de Haag P.A.M., Ale B.J.M. Guidelines for quantitative risk assessment. Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3). Part one: Establishments. Available at: <https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf> (accessed: April 30, 2022).

7. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Second edition. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2000. 756 p.

8. Lees F.P. Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Volume 1. Second edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

9. Sumskoy S.I., Pchelnikov A.V., Shanina E.L., Lisnov M.V., Zozulya V.V. Analysis of the risk of accidents on the

main pipeline transporting a wide fraction of light hydrocarbons. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2007. № 2. pp. 48–52. (In Russ.).

10. Savina A.V., Sumskey S.I., Lisanov M.V. Risk Analysis of Accidents at Trunklines Used for Substantiating Minimum Safe Distances. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 3. pp. 58–63. (In Russ.).

11. Degtyarev D.V., Lisanov M.V., Sumskey S.I., Shvyryaev A.A. Quantitative Risk Assessment in the Process of Substantiation of Buildings and Structures Explosion-Resistance. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2013. № 6. pp. 82–89. (In Russ.).

12. Technical regulation on fire safety requirements: Federal Law of July 22, 2008 № 123-FZ (last edition). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (accessed: April 30, 2022). (In Russ.).

13. On the approval of Safety Guide «Methodology for assessing the risk of accidents at hazardous production facilities of the main pipeline gas transport»: Order of Rostekhnadzor dated December 26, 2018 № 647. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/552055785> (accessed: April 30, 2022). (In Russ.).

14. Agapov A.A., Lazukina I.O., Marukhlenko A.L., Marukhlenko S.L., Sofin A.S. Use of Software Complex TOXI + Risk for Fire Risk Assessment. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2010. № 1. pp. 46–52. (In Russ.).

15. Degtyarev D.V., Pecherkin A.S. Methodology Problems of Social Risk Assessment. Use of Bernoulli Formula. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 11. pp. 50–53. (In Russ.).

Received May 5, 2022

По страницам научно-технических журналов

июнь 2022 г.

Актуальные вопросы пожарной безопасности

(сетевой научный журнал)

Формы проверочных листов и порядок обязательного применения при осуществлении федерального государственного пожарного надзора/ Е.А. Хрыкин, И.Ф. Зенкова, И.О. Виноградова, М.А. Шаранов. — 2021. — № 4. — С. 28–31.

Рассмотрены требования к разработке и содержанию проектов форм проверочных листов, их утверждению, применению, в том числе обязательному, а также основания для актуализации проверочных листов. Проанализировано соответствие указанных требований принятой концепции проведения государственного контроля (надзора) и муниципального контроля в Российской Федерации. Подготовлен вывод о возможности актуализации форм проверочных листов для применения при осуществлении плановых контрольных (надзорных) мероприятий должностными лицами органов государственного пожарного надзора.

Пожарная безопасность

(научно-технический журнал)

Требуемая кратность пены для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в вертикальных стальных резервуарах/ В.П. Молчанов, Д.Л. Бастриков, С.А. Макаров и др. — 2021. — № 2 (103). — С. 12–18.

Критически рассмотрены существующие методики испытаний высоконапорных пеногенераторов для подслоного пожаротушения. Предложены расчетные формулы для определения величины минимальной кратности пены, способной к подъему, в зависимости от состава и плотности горючей жид-

кости, высоты столба горючей жидкости, типа используемого пенообразователя. Обоснованы условия применения существующих систем подслоного пожаротушения для резервуаров с различной высотой стенки.

Простов Е.Е. Экспериментальные исследования истечения пропана в закрытом производственном помещении. — 2021. — № 4. — С. 25–30.

Представлены результаты экспериментальных исследований истечения пропана в различных направлениях в закрытом помещении. Рассматривался случай, когда источник истечения находился в багажнике автомобиля — имитация нахождения автомобиля с газомоторным топливом на станции технического обслуживания. Целью эксперимента являлось изучение механизма пространственного распространения газа в закрытом помещении для валидации математических моделей, используемых в программном комплексе «ANSYS Fluent» при моделировании поступления пропана в закрытое помещение.

Болодьян И.А., Пузач С.В., Барановский А.С. Применение численного моделирования для оценки влияния продольного уклона в автотранспортном тоннеле на распространение опасных факторов пожара. — 2021. — № 4. — С. 31–39.

Рассмотрено влияние продольного уклона автодорожного тоннеля на распространение в нем опасных факторов пожара при возникновении загорания. Для оценки этого влияния использован полевой метод моделирования. Проведен анализ полученных результатов. Сделан вывод о том, что «классическое» понимание картины пожара, основывающееся на принципе «чем больше уклон тоннеля, тем быстрее происходит блокирование», при определенных условиях может не соответствовать действительности. При этом большое влияние на результат расчетов может оказывать постановка граничного условия постоянства давления.