

DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-89-96

УДК 519.857.6:004.413.4

© А.М. Сверчков, 2021

Учет нестационарности в развитии аварийных ситуаций при количественной оценке риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефте- и продуктопроводов



А.М. Сверчков,
науч. сотрудник,
sverchkov@safety.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

Предлагается использовать новый подход к оценке количественных показателей риска, позволяющий учесть временные нестационарности ряда процессов, включая развитие аварии и пространственные перемещения людей. Данный подход способствует снижению консервативности оценки количественных показателей риска аварий на опасных производственных объектах, заложенной в классическом риск-ориентированном подходе.

Ключевые слова: риск аварий, опасный производственный объект, гидроудар, трубопроводный транспорт, разгерметизация трубопровода, авария, аварийная ситуация, ТОХИ+Гидроудар.

Для цитирования: Сверчков А.М. Учет нестационарности в развитии аварийных ситуаций при количественной оценке риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефте- и продуктопроводов// Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 89–96. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-89-96

Введение

Принято считать, что основная неопределенность в расчете показателей риска аварий отражает степень точности знаний о частотах инициирующих событий [1, 2], прежде всего о частотах разрушения того или иного оборудования. Однако существуют статистические данные по технологическим отказам [3], где эти частоты определены достаточно точно по многолетним наблюдениям, в том числе и на протяженных сетях трубопроводов. Иногда такая статистика учитывается за весь период наблюдения, иногда предлагается использовать статистические данные за какой-то актуальный период времени, например, согласно Ростехнадзору, для магистральных нефтепроводов — за последние 5 лет. Тогда при одних и тех же исходных данных (сценариях развития аварий) от года к году показатели риска будут меняться, причем эти изменения могут быть как в большую сторону, так и в меньшую.

В такой ситуации наибольшую неопределенность в анализ риска со взрывопожароопасной составляющей вносят не используемые частоты инициирующих событий, а, например, данные по вероятностям воспламенения. Действительно, диапазон разброса этой вероятности составляет около двух порядков (условно от 1 до 100 %), а критерии и факторы, обуславливающие выбор этой величины, не всегда четко определены. Поэтому актуальными становятся вопросы о том, насколько точно учитывается фактор вероятности воспламенения, какие ограничения мо-

гут возникнуть при анализе риска в соответствии со сложившейся практикой, а также степень влияния нестационарных процессов (развитие аварии и пространственное перемещение людей) на количественные показатели риска аварий.

Учет вероятности воспламенения при анализе риска аварий

Для того чтобы учесть различную вероятность воспламенения на разных временных интервалах, необходимо знать вероятность зажигания выброса на том или ином этапе развития аварии. Количественно эту вероятность можно связать с зависимостью вероятности воспламенения от времени, которое прошло после начала выброса (или по площади, на которую уже распространилось опасное вещество). Зная такую зависимость, можно рассмотреть несколько сценариев с различным временем воспламенения после начала выброса и каждому сценарию поставить в соответствие определенные последствия и вероятность. Более того, можно для каждого единичного сценария на конкретной единице оборудования (участке трубопровода) получить нестационарные, т.е. изменяющиеся во времени, поля потенциального риска, из которых и получают традиционные поля потенциального риска, в том числе и с максимально достигаемыми значениями за весь рассматриваемый период.

В открытом доступе, например [4–6], имеются данные о вероятности воспламенения в зависимости от времени, прошедшего после начала выброса горю-

чего вещества из оборудования, а также публикации [7–8] об исследованиях воспламенения и о возможных источниках зажигания, таких как горячие твердые поверхности, тепло от механических ударов и трения, струи горячих газообразных продуктов сгорания; источники зажигания, создаваемые паразитными электрическими токами, токами катодной защиты от коррозии, статическим электричеством, молнией, высокочастотными электромагнитными волнами, оптическим и радиоактивным излучением, ультразвуковым излучением и нагревом за счет сжатия.

Рассмотрим подробнее, каким образом можно учесть вероятности воспламенения при определении показателей риска аварий.

Согласно [9] потенциальный риск $R_{\text{пот}}(x, y)$, год⁻¹, в конкретной точке пространства (x, y) на территории площадочного объекта и в зонах, граничащих с площадочным объектом, рекомендуется вычислять по формуле:

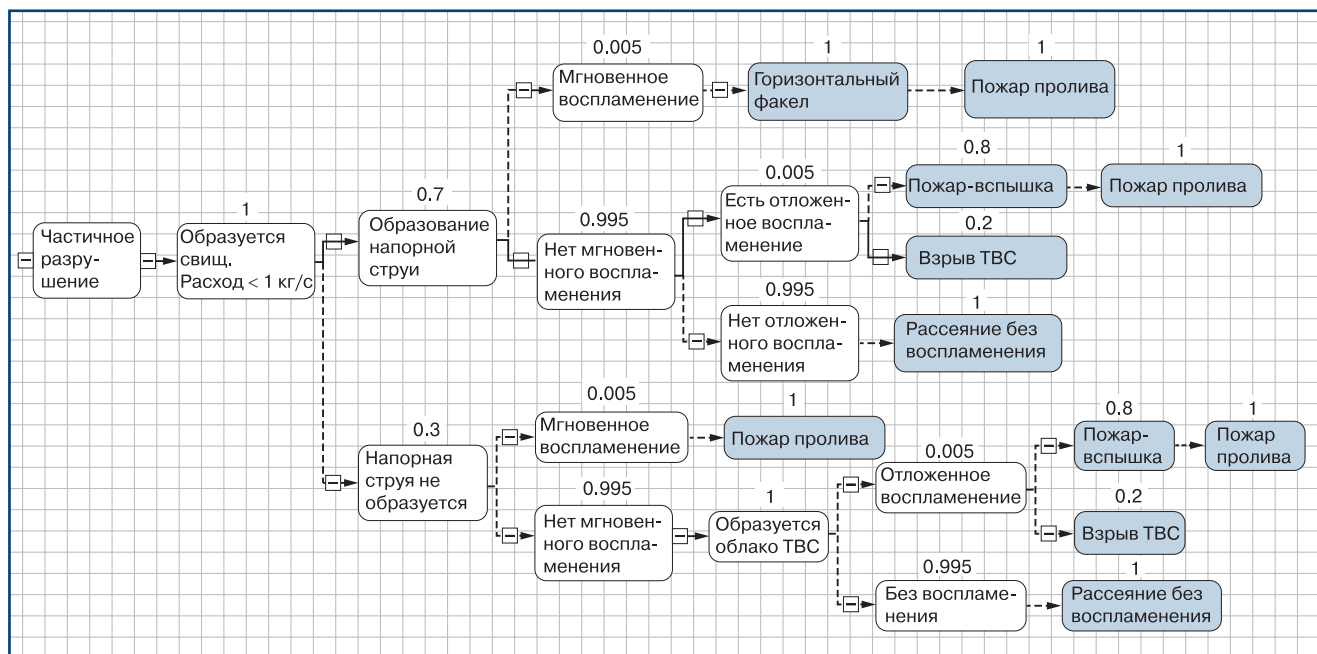
$$R_{\text{пот}} = \sum_{i=1}^I Q_i \min \left\{ 1, 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} \left[1 - v_{\text{уязв}}^{ij}(x, y) P_{\text{гиб}}^{ij}(x, y) \right] \right\}, \quad (1)$$

где I — число сценариев развития аварий; Q_i — частота реализации в течение года i -го сценария развития аварии (данные i -е сценарии включают и воспламенение), год⁻¹; $\Phi_i(x, y)$ — число поражающих факторов, которые могут действовать одновременно при реализации i -го сценария в точке с координатами (x, y) ; $v_{\text{уязв}}^{ij}(x, y)$ — коэффициент уязвимости человека, находящегося в точке территории с координатами

(x, y) , от j -го поражающего фактора, который может реализоваться в ходе i -го сценария аварии и зависит от защитных свойств помещения, укрытия, в котором может находиться человек в момент аварии, изменяющийся от 0 (человек неуязвим) до 1 (человек не защищен из-за незначительных защитных свойств укрытия) или превышающий 1 в случае гибели людей при обрушении зданий; $P_{\text{гиб}}^{ij}(x, y)$ — 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.

Обычно под сценарием аварии подразумевается последовательность отдельных логически связанных событий, обусловленных конкретным инициирующим (исходным) событием, приводящих к возникновению поражающих факторов аварии. В качестве сценария выбирается последовательность, например, вида «частичное разрушение трубопровода → образование напорной струи → нет мгновенного воспламенения, есть отложенное воспламенение → сгорание облака топливно-воздушной смеси (ТВС) с образованием ударных волн» (рис. 1). В этом случае, как правило, для конкретного отверстия разгерметизации с известным размером рассматриваются дрейф облака для конкретных погодных условий и сгорание этого облака ТВС в определенный момент времени. Этот момент времени консервативно выбирается тогда, когда может быть достигнута максимальная зона поражения.

Но под отдельным сценарием можно понимать и более суженный вариант развития событий, например, подсценарий: «частичное разрушение трубопровода → образование напорной струи → нет мгновенного воспламенения, есть отложенное вос-



▲ Рис. 1. Типовое дерево событий для частичного разрушения нефте- и продуктопровода

▲ Fig. 1. Typical event tree for partial destruction of an oil or product pipeline

пламенение с задержкой в интервале времени от τ_{ki} до τ_{k+1i} → сгорание облака ТВС с образованием ударных волн». Совокупность таких подсценариев в i -м сценарии общим числом L_i ($k = 1, \dots, L_i$) выбирается таким образом, чтобы за период времени от τ_{ki} до τ_{k+1i} суммарная вероятность воспламенения составляла условную вероятность воспламенения для всего сценария i . Каждый k -й временной интервал (τ_{ki}, τ_{k+1i}) в каждом i -м сценарии характеризуется вероятностью воспламенения облака в этот период времени $P_{\text{воспл}}^{ik}$.

Очевидно, что предпочтительнее иметь равномерное распределение вероятности по временным интервалам, тогда будет наиболее точно учтен в потенциальном риске вес каждой из задержек воспламенения.

С учетом наличия нескольких вариантов воспламенения поле потенциального риска может быть определено следующим образом:

$$R_{\text{пот}} = \sum_{i=1}^I Q_i \sum_{k=1}^{L_i} P_{\text{воспл}}^{ik} \left\{ \min 1, 1 - \prod_{j=1}^{\Phi(x,y)} \left[1 - v_{\text{уязв}}^{ijk}(x,y) P_{\text{гиб}}^{ijk}(x,y) \right] \right\}. \quad (2)$$

Формула (2) предполагает, что все поражающие факторы связаны с появлением источника воспламенения.

По сравнению с формулой (1) в (2) изменились условная вероятность гибели человека и коэффициент его уязвимости, теперь они в каждом i -м сценарии привязаны к конкретному временному интервалу k (τ_{ki}, τ_{k+1i}), что отражается в появлении у соответствующих переменных индекса k — $v_{\text{уязв}}^{ijk}(x,y)$ и $P_{\text{гиб}}^{ijk}(x,y)$ вместо $v_{\text{уязв}}^i(x,y)$ и $P_{\text{гиб}}^i(x,y)$. Такое изменение связано с тем, что, с одной стороны, в каждом сценарии i каждому интервалу времени (τ_{ki}, τ_{k+1i}) будет соответствовать своя собственная зона поражения, при которой условная вероятность смертельного поражения в точке (x,y) составит $P_{\text{гиб}}^{ijk}(x,y)$, а с другой — к началу k -го временного интервала человек может изменить и статус своей защищенности $v_{\text{уязв}}^{ijk}(x,y)$.

Расчеты по (1) и (2) будут отличаться. Такое отличие происходит за счет учета различных вариантов размера и положения взрывоопасных облаков. Это отличие наиболее просто понять в двух характеристиках поля потенциального риска. Первое отличие: спад потенциального риска при удалении от места выброса при расчете по (2) будет происходить быстрее. Это объясняется тем, что при рассмотрении нескольких вариантов инициирования, согласно (2), по сравнению с рассмотрением одного варианта инициирования по формуле (1) «снимается» часть потенциального риска с «дальней» зоны за счет того, что в спектре подсценариев появляются зоны поражения с меньшими размерами, чем та единственная зона поражения, что принимается в (1). Потенциальный

же риск в «ближней» зоне в целом сохраняется при расчете по (2) по сравнению с расчетом по (1), лишь небольшая часть рисков «уходит» из «ближней» зоны в «дальнюю» за счет того, что в спектре подсценариев появляются зоны поражения с большими размерами (облако распространяется дальше), чем та единственная зона поражения, что принимается в (1). Именно за счет этого возникает и второе отличие между полями потенциального риска, посчитанными по (1) и (2): в расчетах по (2) «дальняя» от места выброса зона с низкими рисками становится более протяженной.

Основная же причина уменьшения размеров зон поражения и, соответственно, зон достижения заданного уровня условной вероятности поражения $P_{\text{гиб}}^{ijk}(x,y)$ при каждом конкретном подсценарии k сценария i — более раннее инициирование распространяющегося облака, в этом случае и зона, где может существовать горение, и масса во взрывоопасных пределах будут меньше. Также в уменьшении размеров зон поражения может играть роль и снижение со временем аварийного расхода в выбросе (и, соответственно, массы ТВС в облаке) по мере уменьшения давления в оборудовании.

Из формулы (2) можно выделить одно выражение:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{\text{пот } i} &= Q_i \sum_{k=1}^m P_{\text{воспл}}^{ik} \times \\ &\times \min \left\{ 1, 1 - \prod_{j=1}^{\Phi(x,y)} \left[1 - v_{\text{уязв}}^{ijk}(x,y) P_{\text{гиб}}^{ijk}(x,y) \right] \right\}, \quad (3) \\ m &= 1, \dots, L_i. \end{aligned} \right.$$

Эта формула представляет собой не что иное, как записанное в виде ступенчатой функции (с шагом $\tau_{k+1i} - \tau_{ki}$) развитие во времени поля потенциального риска при i -м сценарии.

Выше уже отмечалось, что предложенный способ расчета поля потенциального риска по формуле (2) позволяет учесть и влияние изменения скорости выброса на показатели риска. Это достигается путем учета при расчете зон поражения изменения скорости поступления вещества из оборудования. Для этого в формуле (2) при заданной вероятности воспламенения и известной зависимости условной вероятности зажигания от времени, прошедшего после начала выброса, условная вероятность гибели человека $P_{\text{гиб}}^{ijk}(x,y)$ берется для зоны поражения, возникающей на (τ_{ki}, τ_{k+1i}) временном интервале с соответствующим этому временному интервалу расходом и с учетом тех расходов, что имели место на предыдущих временных интервалах. Поэтому если, например, на временном интервале (τ_{ki}, τ_{k+1i}) в результате перекрытия задвижек выброс прекратился, а взрывоопасное облако уже рассеялось, то часть рисков, которые возникают на более поздних интервалах, уже не будут реализовываться: взрыво-

опасной массы, например, в атмосфере больше нет, соответственно, потенциальные риски будут меньше по сравнению с ситуацией, когда задвижки не перекрываются в процессе истечения вещества.

Анализ риска с учетом нестационарности процессов, протекающих при аварии на нефте- и продуктопроводах

Риски могут изменяться во времени, т.е. они являются нестационарными характеристиками. Далее этот факт трансформируется в разработку теоретических основ количественной оценки риска с учетом нестационарности различных процессов, протекающих при аварийных ситуациях, возникающих при эксплуатации оборудования, индивидуальном поведении людей и изменении внешних условий.

Рассчитываемые показатели риска обычно представляют собой осредненные величины. В результате возникают ситуации, порождающие как завышенные, так и заниженные показатели риска, заметно отличающиеся от реальных оценок опасности. Например, расчет показателей индивидуального риска гибели некоторого человека, находящегося в некоторой точке A , согласно общепринятой практике, проводится путем перемножения величины потенциального риска в точке A на долю времени, которую этот человек находится в этой точке A . При таком подходе происходит осреднение индивидуального риска, вносящее ошибку в его величину, так как не учитываются изменения во времени тех факторов (или их сочетаний), что определяют риски (например, поражающий фактор возник в точке A , что может происходить в отсутствие людей в это время). В этом и заключается проблема текущей практики декларирования и обоснования безопасности опасных производственных объектов с применением методов количественной оценки риска.

Чтобы преодолеть такие неточности, предлагается рассмотреть многоуровневый подход, учитывающий нестационарность в изменении различных величин, оказывающих то или иное влияние на показатели риска. На основе характерного временного масштаба нестационарности можно выделить следующие факторы, вносящие нестационарность:

нестационарность частот событий, инициирующих чрезвычайную ситуацию, — это медленно, на протяжении нескольких лет изменяющаяся величина. Пример такой величины — изменение частоты аварийного разрушения трубопровода; условно будем называть такие нестационарности долговременными (крупномасштабными);

нестационарность условий возникновения аварийных ситуаций; сюда относятся изменения метеоусловий (сезонные, суточные), изменения в распределении и перемещении людей (также сезонные, суточные); условно будем называть такие нестационарности среднимасштабными;

нестационарность условий развития самой аварийной ситуации. Этот фактор обусловлен изме-

нением во времени зоны поражения, положения людей (выход (эвакуация), действием источника воспламенения. Эту нестационарность условно будем называть краткосрочной; обычно изменения на этом уровне происходят за несколько минут или несколько десятков минут.

Учет всех этих нестационарностей проводится одновременно в единые интегрированные показатели риска. При этом для более низких временных иерархий более высокие временные иерархии рассматриваются неизменными.

Учет долговременной нестационарности

Учесть долговременную нестационарность можно наиболее простым образом: для этого величина частоты инициирующих аварийную ситуацию событий — в формулах (1) и (2) — это величина Q_i , в которую заложена удельная частота разгерметизации — рассматривается как функция времени t , в соответствующих формулах (1) и (2) для расчета риска она перестает быть константой, а становится временной зависимостью $Q_i(t)$, допускающей в том числе и экстраполяцию вперед, на ближайшие годы. Таким образом, представляется возможным проанализировать изменения показателей риска на масштабах порядка годов.

Учет среднимасштабной нестационарности

Учет среднимасштабной нестационарности можно провести путем рассмотрения (выделения) временных интервалов, в пределах которых все величины, определяющие нестационарность показателей риска данного масштаба, лежат в определенных диапазонах, и их с определенной точностью можно считать постоянными. Величины, по которым ведется выделение временных интервалов: скорость ветра, его направление, температура окружающей среды, состояние устойчивости атмосферы (класс устойчивости), распределение рискующих людей по прилегающим территориям.

При необходимости к этим величинам могут быть добавлены и режимы функционирования трубопровода, параметры транспортируемых продуктов, так как каждая из этих величин — функция от времени (изменение режима транспортировки или транспортируемой среды).

Учет краткосрочной нестационарности

Фактически описанные выше подходы к учету долговременных и среднесрочных нестационарностей позволяют учесть влияние нестационарных процессов в природе, функционировании объекта и движения людей на начальные условия аварийной ситуации, т.е. такая модель, вместо того чтобы использовать общее осреднение, позволяет полностью согласовать режим функционирования трубопровода, расположение людей и внешние условия протекания аварийной ситуации.

При рассмотрении трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов также можно выделить краткосрочные нестационарности: предаварийный режим транспортировки (гидроудар), аварийное истечение вещества при разгерметизации (в общем случае с переменной интенсивностью), растекание вышедшего вещества по прилегающей территории, дрейф облаков при испарении вещества, скорость выгорания вещества при его воспламенении и последующем горении (пожаре пролива), перемещение людей (в том числе по транспортным коммуникациям на транспортных средствах) при протекающей аварии. У указанных процессов и явлений есть своя динамика развития, например за счет скорости истечения и скорости роста площади пролива, следовательно, конечные показатели риска будут определяться и сочетанием этих факторов, динамикой их развития.

Однако в существующих подходах эти краткосрочные временные факторы, действующие в ходе аварийной ситуации (развитие зоны поражения и перемещения людей), не учитываются.

Для учета в показателях риска этих факторов необходимо рассмотреть функции времени соответствующих переменных $L(x, y, z, t)$ — размеры зоны поражения заданного уровня, для которого будем считать риски и $n_m(x, y, z)$ — распределение людей: численность и местонахождение каждой m -й группы (в пределе группа состоит из одного человека), а также t_m — доля времени пребывания этих людей на месте возможной аварии. Также необходимо знать пути движения людей для каждой m -й группы и скорость перемещения каждой группы по этим путям. В этом случае для отдельной i -й аварийной ситуации, развивающейся в конкретных условиях, можно ввести понятие нестационарного потенциального риска для точки нахождения человека (точнее, m -й группы людей):

$$\begin{aligned} R_{\text{пот } i}(x, y, z, t) &= R_{\text{пот } i}[x_m(t), y_m(t), z_m(t)] = \\ &= Q_i \min(1, 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x, y)} \{1 - v_{\text{уязв}}^j(x, y) \times \\ &\times P_{\text{пор}}^j[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]\}), \end{aligned} \quad (4)$$

где зависимость от времени возникает через множитель $P_{\text{пор}}^j[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]$ — условную вероятность поражения человека в точках x, y, z , где он находится в момент времени t , перемещаясь по линии $[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]$.

Таким образом, потенциальный риск (для i -й аварии) определяется теперь вдоль линии $x_m(t), y_m(t), z_m(t)$. Эта трактовка отличается от существующего взгляда, однако она не противоречит ему, а лишь вводит дополнительное измерение риска.

Можно выделить два варианта негативного воздействия на человека: продолжительное (поле те-

плового излучения от горящих факелов, пожаров проливов) и практически мгновенное (действие ударной волны при взрыве ТВС).

В первом случае негативное влияние накапливается и его действие на человека определяется по накопленному эффекту (например, тепловой дозе). При этом $P_{\text{пор } i}(t)$ также определяется по накопленному эффекту (обычно для этого используются пробит-функции), но не в одной точке, как это рассматривается в стандартных подходах, а вдоль линии движения за время движения.

Во втором случае негативное влияние оказывает практически мгновенное действие на человека, $P_{\text{пор } i}$ определяется по параметрам этого действия.

Введенный выше способ определения $R_{\text{пот } i}(t)$ для перемещающейся точки позволяет рассчитать и другие риски: индивидуальные, коллективные, социальные.

Для расчета индивидуального риска $R_{\text{инд } i}[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]$ группы людей, находившихся изначально при i -й аварийной ситуации в точке $[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]$, $R_{\text{пот } i}[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]$ надо умножить на t_m , а для расчета коллективного риска $R_{\text{колл } i}[x_m(t), y_m(t), z_m(t)]$ — на $t_m n_m$. Общий коллективный риск находится путем суммирования по всем аварийным ситуациям.

Рассчитанный таким образом коллективный риск является функцией времени, что, например, позволяет оценить те временные рамки, в пределах которых ликвидация (локализация) чрезвычайной (аварийной) ситуации может снизить риски поражения. Например, пусть существуют две схемы функционирования и соответствующие им схемы ликвидации и локализации аварийных ситуаций. Обозначим эти схемы 1 и 2, они могут отличаться размещением людей, алгоритмом выхода людей при i -й аварии, соответственно, рассчитав для каждой схемы коллективные риски как функции времени $R_{1\text{колл}}(t)$ и $R_{2\text{колл}}(t)$ (расчет может включать и разбивку общего коллективного риска по отдельным m -м группам), можно увидеть не только величины коллективного риска, но и те временные интервалы, в рамках которых «набирается» коллективный риск. Соответственно можно оценить: насколько результативными по времени реагирования будут варианты 1 и 2.

Таким образом, зависимость коллективного риска от времени позволяет оценивать с позиций риск-анализа эффективность разрабатываемых мер по локализации и ликвидации чрезвычайной (аварийной) ситуации, вырабатывать рекомендации.

Применение предложенного подхода

Разработанные и описанные ранее в статье подходы применены для решения прикладных задач. Ниже приводятся результаты в сравнении с классическим подходом, используемым в количественной оценке риска.

На участке трубопровода протяженностью 74,48 км происходит разгерметизация на отметке

42,4 км. По трубопроводу транспортируется нефть (плотность 850 кг/м^3 , вязкость $0,0213 \text{ Па}\cdot\text{с}$). Внутренний диаметр трубопровода равен $0,996 \text{ м}$. На входе продукт закачивается при давлении $4,02 \text{ МПа}$, а на выходе забирается при давлении $0,25 \text{ МПа}$. Расход нефти — 1700 кг/с . Площадь отверстия разрушения составляет $0,001 \text{ м}^2$, оно расположено между двумя задвижками, которые закрываются в течение 300 с . Задвижки находятся за 7420 м до места разгерметизации и на 7312 м после. Они начинают закрываться через 300 с после начала разгерметизации. Высотный профиль представлен на рис. 2.

Результаты моделирования

Решение принималось с использованием математической модели [10–12], реализованной в виде программного средства ТОХИ+Гидроудар [13].

За первые 300 с из трубопровода выбрасывается $10,47 \text{ т}$ продукта. На момент окончания закрытия задвижек (600 с) из трубопровода было выброшено $23,99 \text{ т}$ продукта. Далее в самотечном режиме происходит постепенное опорожнение локализованного задвижками участка до полного прекращения истечения продукта. На момент полного опорожнения участка трубопровода суммарная масса утечки составила $46,185 \text{ т}$ — эта масса и будет использоваться далее в примере.

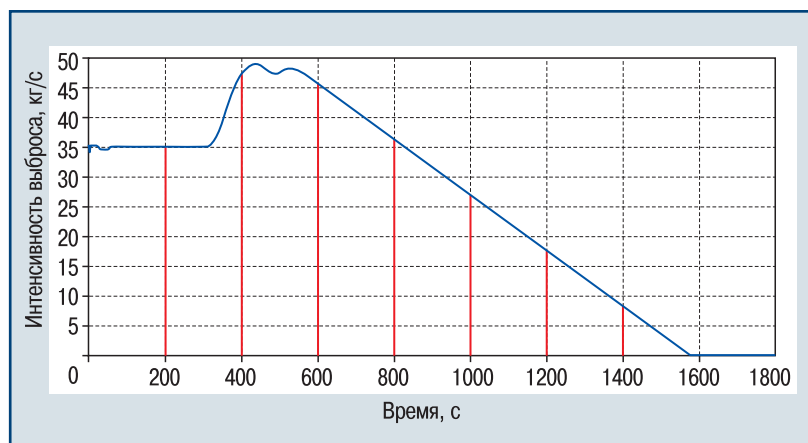
Зависимость интенсивности выброса нефти от времени представлена на рис. 3. На этом же рисунке приведены восемь отдельных временных интервалов по 200 с каждый ($0\text{--}200$, $200\text{--}400$, ..., $1400\text{--}1600 \text{ с}$). Именно восемь интервалов взяты в качестве примера, число разбиений может быть и другим. Такое разбиение позволяет рассмотреть несколько временных моментов (восемь) в целях учета нестационарности процесса истечения и распространения выброса в окружающую среду.

Рядом с указанным трубопроводом расположена производственная территория, на которой находятся 24 чел. (рис. 4). Контур этой территории выделен красным цветом. Трасса трубопровода показана синим цветом.

Исходные данные для расчетов индивидуального риска, а также результирующие значения сведены в таблице. Важно отметить, что постулируется тот факт, что возгорание пролива произойдет, как только площадь пятна составит 500 м^2 . Допущение исполь-



▲ Рис. 2. Высотный профиль трубопровода
▲ Fig. 2. The elevation profile of the pipeline



▲ Рис. 3. Зависимость интенсивности выброса нефти из трубопровода от времени
▲ Fig. 3. Dependence of the intensity of the oil discharge from the pipeline on time



▲ Рис. 4. Ситуационный план местности
▲ Fig. 4. Situational plan of the area

зовано для упрощения демонстрации подхода на данном примере с применением (2).

При консервативном подходе принимается, что вся масса, которая может вытечь из трубопровода, попадает в пролив. Оценка количественных показателей риска аварии проводилась с использованием программного комплекса ТОХИ+Risk 5 [14].

Анализ результатов моделирования

Результаты позволяют сделать вывод, что предложенный подход дает возможность снизить кон-

Интервал времени, с	Масса утечки за интервал, кг	Объем, м ³	Площадь пролива при $h = 0,05$ м, м ²	Массовая скорость выгорания, кг/(м ² ·с)	Объем, сгорающий за интервал, м ³	Общая масса утечки, кг	Индивидуальный риск, год ⁻¹
Классический (консервативный) подход							
0–1600	46 185	—	—	—	—	—	1,08E-06
Предлагаемый подход							
0–200	6980	8,211	164,229	—	—	6979,710	—
200–400	7495	17,029	340,587	—	—	14 474,940	—
400–600	9519	28,229	564,571	0,0938	12,454	23 994,260	8,55E-07
600–800	8159	25,374	507,484	0,0938	11,194	21 568,070	1,89E-09
800–1000	6296	21,586	431,728	0,0938	9,523	18 348,440	4,21E-09
1000–1200	4434	17,280	345,594	0,0938	7,623	14 687,760	5,20E-11
1200–1400	2574	12,685	253,697	0,0938	5,596	10 782,130	3,33E-11
1400–1600	727	7,944	158,882	0,0938	3,505	6752,491	2,79E-11

серватизм оценок, поставляемых традиционными методами. Причем результаты содержат еще определенный запас консервативности полученных величин, который может и дальше сниматься в рамках разработанного подхода. Этот запас консерватизма обусловлен неучетом передвижения персонала во время проведения эвакуации, т.е. перемещения (удаления) людей в безопасное место. В реальности данный подход может позволить обоснованно уменьшить показатели риска в несколько раз, иногда на порядки.

Заключение

Предложен новый подход к количественной оценке показателей риска аварий, учитывающий нестационарные процессы, происходящие во время аварийной ситуации на опасных производственных объектах магистральных нефте- и продуктопроводов. Данный подход позволяет снизить консервативность оценки количественных показателей риска аварий, а также оценить показатели риска аварий на более качественном уровне (в более высоком разрешении).

Полученные результаты показывают важность учета изменений, происходящих при аварийной ситуации на магистральных нефте- и продуктопроводах, включая переменную скорость истечения за счет изменения скорости движения жидкости в трубопроводе, циркуляции волн сжатия (разрежения), изменений работы насосного оборудования и запорной арматуры.

Список литературы

- Лисанов М.В., Сумской С.И., Швыряев А.А. Неопределенности количественной оценки риска аварий на нефтегазовых объектах// Вести газовой науки. — 2018. — № 2 (34). — С. 125–134.
- Колесников Е.Ю. Количественная оценка аварийного риска: анализ неопределенности// Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 2. — С. 64–70.
- Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта/ М.В. Лисанов, А.В. Савина, Д.В. Дегтярев, Е.А. Самусева// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 7. — С. 16–22.
- Spouge J. A guide to quantitative risk assessment for offshore installations. — CMPT, 1999. — 750 p.
- Daycock J.H., Rew P.J. Development of a Method for the Determination of On-Site Ignition Probabilities. URL: <https://www.hse.gov.uk/research/rpdf/r226.pdf> (дата обращения: 12.08.2020).
- A framework for ignition probability of flammable gas clouds/ P.J. Rew, H. Spenser, W. Atkins, A. Franks. URL: <https://www.icheme.org/media/12096/xiii-paper-14.pdf> (дата обращения: 12.08.2020).
- Eckhoff R.K., Thomassen O. Possible sources of ignition of potential explosive gas atmospheres on offshore process installations// Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 1994. — Vol. 7. — Iss. 4. — P. 281–294.
- Investigation of hot surface ignition of a flammable mixture/ S.K. Menon, P.A. Boettcher, B. Ventura et al. URL: <https://sites01.lsu.edu/faculty/smenon/wp-content/uploads/sites/133/2017/02/WSSCI12v1.pdf> (дата обращения: 12.08.2020).
- Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. — Сер. 27. — Вып. 16. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 56 с.
- Sumskoi S.I., Sverchkov A.M. Modeling of Non-equilibrium Processes in Oil Trunk Pipeline Using Godunov Type Method// Physics Procedia. — 2015. — Vol. 72. — P. 347–350.
- Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах/ С.И. Сумской, А.А. Агапов, А.С. Софьин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 9. — С. 50–53.
- Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems/ S.I. Sumskoi, A.M. Sverchkov, M.V. Lisanov, A.F. Egorov// Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 751. — № 1. — P. 12–22.
- Программное средство ТОХИ+Гидроудар. Программные средства по промышленной безопасности ТОХИ+. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnoe-sredstvo-toxidroudard> (дата обращения: 12.08.2020).
- Использование программного комплекса ТОХИ+Risk для оценки пожарного риска/ А.А. Агапов, И.О. Лазукина, А.Л. Марухленко и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 1. — С. 46–52.

sverchkov@safety.ru

Материал поступил в редакцию 10 декабря 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2021, № 2, pp. 89–96.
DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-89-96

Consideration of Non-stationarity in the Development of Emergency Situations for the Quantitative Risk Assessment of Accidents at Hazardous Production Facilities of Oil and Product Pipelines

A.M. Sverchkov, Research Associate, sverchkov@safety.ru
STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

Abstract

It is proposed to use the new approach to assessing quantitative risk indicators. This approach allows to consider the temporal non-stationarity of the number of processes, including the development of an accident and the spatial movements of people. The greatest uncertainty in the risk analysis with an explosive and fire hazard component is not the frequency of initiating events used, but, for example, data on the probability of ignition. The range of variation of this probability is about two orders of magnitude (relatively speaking, from 1 % to 100 %), and the criteria and factors that determine the choice of this value are not always clearly defined. The paper proposes an approach that considers the probability of ignition as a dependence on the time that passed after the start of emergency depressurization. Knowing this dependence, it is possible to consider several scenarios with different ignition time after the start of the release and assign certain consequences and probabilities to each scenario. Moreover, it is possible for each single scenario on a specific piece of equipment (pipeline section) to obtain non-stationary, namely time-varying potential risk fields. The example of an accident on the oil pipeline is considered, the risk indicators of such an accident are calculated, it is shown that the risks can change over time, namely they are non-stationary characteristics.

Further, this fact is transformed into the development of theoretical foundations for quantitative risk assessment, considering the non-stationarity of various processes occurring during emergency situations arising during the operation of equipment, individual behavior of people and changes in external conditions.

The results obtained show the importance of considering the changes that occur during an emergency on the main oil and product pipelines. It is concluded that the proposed approach allows to reduce the conservatism of assessments provided by traditional methods. In real practice this approach can reasonably reduce the risk indicators by several times, sometimes by orders of magnitude.

Key words: risk of accidents, hazardous production facility, fluid hammer, pipeline transport, pipeline depressurization, accident, emergency, TOXI+Fluid hammer.

References

1. Lisanov M.V., Sumskey S.I., Shvyryaev A.A. Uncertainties of the Quantitative Emergency Risk Assessment at Oil-Gas

Facilities. *Vesti gazovoy nauki = News of Gas Science*. 2018. № 2 (34). pp. 125–134. (In Russ.).

2. Kolesnikov E.Yu. Quantitative Assessment of Emergency Risk: Analysis of Uncertainty. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 2. pp. 64–70. (In Russ.).

3. Lisanov M.V., Savina A.V., Degtyarev D.V., Samuseva E.A. Russian and Western Pipelines Accident Data Analysis. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2010. № 7. pp. 16–22. (In Russ.).

4. Spouge J. A guide to quantitative risk assessment for offshore installations. CMPT, 1999. 750 p.

5. Daycock J.H., Rew P.J. Development of a Method for the Determination of On-Site Ignition Probabilities. Available at: <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr226.pdf> (accessed: August 12, 2020).

6. Rew P.J., Spenser H., Atkins W., Franks A. A framework for ignition probability of flammable gas clouds. Available at: <https://www.icheme.org/media/12096/xiii-paper-14.pdf> (accessed: August 12, 2020).

7. Eckhoff R.K., Thomassen O. Possible sources of ignition of potential explosive gas atmospheres on offshore process installations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1994. Vol. 7. Iss. 4. pp. 281–294.

8. Menon S.K., Boettcher P.A., Ventura B., Blanquart G., Shepherd J.E. Investigation of hot surface ignition of a flammable mixture. Available at: <https://sites01.lsu.edu/faculty/smenon/wp-content/uploads/sites/133/2017/02/WSSCI12v1.pdf> (accessed: August 12, 2020).

9. Methodological bases for the analysis of hazards and risk assessment of accidents at hazardous production facilities: safety guide. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200133801> (accessed: August 12, 2020). (In Russ.).

10. Sumskey S.I., Sverchkov A.M. Modeling of Non-equilibrium Processes in Oil Trunk Pipeline Using Godunov Type Method. *Physics Procedia*. 2015. Vol. 72. pp. 347–350.

11. Sumskey S.I., Agapov A.A., Sofin A.S., Sverchkov A.M., Egorov A.F. Simulation of Abnormal Leakages on Trunk Pipelines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2014. № 9. pp. 50–53. (In Russ.).

12. Sumskey S.I., Sverchkov A.M., Lisanov M.V., Egorov A.F. Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 751. № 1. pp. 12–22.

13. TOXI+Fluid Hammer Software Tool. Software for industrial safety TOXI+. Available at: <https://toxi.ru/produkty/programmnoe-sredstvo-toxigidroudar> (accessed: August 12, 2020). (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.).

Received December 10, 2020

