

УДК 504.75

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКОВ НА ГАЗОПРОВОДАХ

© *Ю.О. Логвин, Пензенская государственная технологическая академия (г. Пенза, Россия)*

© *К.Р. Таранцева, Пензенская государственная технологическая академия (г. Пенза, Россия)*

© *О.А. Логвина, Пензенская государственная технологическая академия (г. Пенза, Россия)*

© *В.В. Коновалов, Пензенская государственная технологическая академия (г. Пенза, Россия)*

## MODELING SAFETY AND RISK IN GAS PIPELINES

© *Y.O. Logvin, Penza State Technological Academy (Penza, Russia)*

© *K.R. Tarantseva, Penza State Technological Academy (Penza, Russia)*

© *O.A. Logvina, Penza State Technological Academy (Penza, Russia)*

© *V.V. Konovalov, Penza State Technological Academy (Penza, Russia)*

Статья посвящена количественному анализу опасностей, определению рисков и вероятности аварий при проектировании и эксплуатации газопроводов. Рассмотрены возможность определения величины среднего риска вне зависимости от деятельности объекта, подвергающегося определенной опасности, и случаи, когда объект может принять меры с целью уменьшения потерь от неблагоприятного события (защитные меры) и при этом сам объект не влияет на возможность его проявления, и когда объект может занять активную позицию по отношению к неблагоприятному событию и сознательно выбирать ситуацию, характеризующуюся другой вероятностью его проявления (выбрать более рискованную ситуацию с большей вероятностью ущерба, рассчитывая получить дополнительные преимущества или может предпринять действия по избежанию риска).

**Ключевые слова:** газопровод, риск, экономический ущерб, питтинг.

This article is devoted to the quantitative analysis of hazards, identification of risks and the possibility of accidents when people do the design and exploit of natural gas pipelines. The possibility of determining the value of average risk, regardless of the activities of the facility, subject to a certain danger, and when the lens can take steps to reduce losses from adverse events (safety measures) and that the object does not affect the possibility of its manifestation, and when the object can take a proactive approach to the adverse event, and consciously choose a situation of a different probability of its occurrence (choose more risky situation is more likely to damage, hoping to get additional benefits or can take action to avoid risk).

**Key words:** pipeline, the risk of economic damage, pitting.

**E-mail:** Olga\_kr@list.ru

Оценка экологического риска последствий решений необходима при строительстве или реконструкции любых объектов промышленности, особенно нефтегазовой. Это обусловлено как повышением требований экологического законодательства, так и вероятностью значительных потерь в будущем, зачастую не только экономических. Количественный анализ опасностей даёт возможность определить вероятности аварий и несчастных случаев, величину риска, величину последствий и желателен как для лиц, принимающих решение в сфере производства, так и для организаций, контролирующих экологическую составляющую их деятельности. Взрывы и неконтрольное горение больших объемов горючих веществ являются серьезными причинами для глубокого нарушения экологического баланса в окружающей среде, не считая того, что они обычно сопровождаются вторичными последствиями в виде массовых пожаров, а также загрязнением атмосферы продуктами горения. Более половины аварий на газопроводах сопровождается взрывообразным расширением и загоранием газа с образованием факелов горения. Таким образом, место прохождения газопровода является зоной повышенной пожароопасности. Природный газ или искусственный газ доставляется к потребителям по системе газопроводов. На газовых промыслах газ, выходящий под давлением из каждой скважины, пройдя систему предварительной очистки от влаги и взвешенных частиц, поступает в газосборную сеть промысла и далее по газовому коллектору на головные сооружения магистрального газопровода. На головных сооружениях производятся окончательная очистка газа от влаги, взвешенных частиц, сероводорода и углекислоты. Далее газ поступает в магистральный газопровод, доходит до конечных точек – газораспределительных станций и с пониженным давлением уходит в распределительные газовые сети городов, населенных пунктов и к отдельным промышленным предприятиям.

Определение размеров зон повышенной пожароопасности при проектировании и эксплуатации конкретных газопроводов является необходимым условием эффективности мер смягчения экологических последствий возможной аварии как для персонала и населения, так и для окружающей природы.

Основными источниками выброса загрязняющих веществ в атмосферу являются свечи стравливания газа из отсеченного участка газопровода перед началом ремонтных работ. Одновременно может осуществляться стравливание газа только с одного участка, отсекаемого соседними линейными кранами, при этом выброс будет осуществляться через ближайшую свечу (одну или две). Перед началом работ газ вырабатывается потребителем до давления 1,5 МПа. Основным загрязняющим веществом, выбрасываемым в атмосферу, является природный газ, состоящий более чем на 98 % из метана.

Природный газ обычно рассматривается как безвредный газ. Газ бесцветен, не имеет запаха, не токсичен. Действие его идентично действию предельных углеводородов. Главная опасность связана с асфиксией из-за недостатка

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКОВ НА ГАЗОПРОВОДАХ

кислорода (удушающее воздействие на организм человека проявляется при содержании его в воздухе более 20 %); при концентрации его в воздухе до 20 % не дает токсического эффекта. Природный газ легче воздуха и при выбросах стремится занять более высокие слои атмосферы. Вероятность скопления в низких точках местности и внизу помещений практически исключена.

Наиболее ответственным участком газопровода является его линейная часть, или собственно газопровод, представляющий собой сооружение из стальных труб, соединенных сваркой в одну линию. Газопровод имеет ярко выраженную линейную направленность, значительную протяженность (до сотен и тысяч километров) и работает под высоким давлением.

Срок службы и частота отказов (аварий) на конкретном участке трубопровода зависит от множества факторов: химического состава материала трубопровода, условий его эксплуатации, транспортируемой жидкости или газа и ряда других факторов, одни из которых остаются постоянными (химический состав материала трубопровода, транспортируемой жидкости или газа), другие меняются в пределах диапазонов их возможных значений.

При решении ряда задач, например определении частоты и масштаба аварий на конкретном участке трубопровода за относительно небольшой (по сравнению со сроком службы трубопровода) промежуток времени, отказы можно считать ординарным потоком случайных событий и использовать для определения их характеристик основные положения теории риска, понимая под понятием “риск” опасность негативного воздействия совокупности факторов на рассматриваемый объект, вызывающего ухудшение его состояния и определенный уровень потерь его качеств вплоть до полного выхода из строя.

При ограничении времени исследования поведения объекта (1-3 года, т.е. порядка 0,1 срока службы трубопровода) с достаточной точностью функцию отклика  $y$  можно считать линейной функцией от совокупности действующих на неё факторов и, в конечном счёте, функцией одного аргумента – времени  $t$ . В качестве численной меры риска принимают вероятность  $P$  наступления неблагоприятного события или размер наносимого объекту ущерба  $R$ . При этом наносимый объекту ущерб определяется зависимостью

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x) dx, \quad (1)$$

где  $P(x)$  – непрерывная функция зависимости вероятности ущерба от величины наносимого ущерба.

В более общем случае, когда наносимый ущерб является результатом совокупного воздействия различных независимых друг от друга факторов, средний риск можно оценить зависимостью

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} x_i, \quad (2)$$

где  $P_{ij}$  – вероятность получения ущерба  $X_i$  при наступлении события  $j$ -го типа.

Она определяется по формуле произведения вероятностей зависимых событий, т.е.

$$P_{ij} = P_{ji} = P_j P_i(j), \quad (3)$$

где  $P_j$  – вероятность наступления неблагоприятного события  $j$ -го типа,  $P_i(j)$  – вероятность получения ущерба  $X_i$  при наступлении события  $j$ -го типа.

Если ущербы от различных событий измеряются в одинаковых единицах, например в рублях, в тоннах или  $\text{м}^3$  потерянного транспортируемого продукта, то формулу для определения ущерба  $R$  можно записать в виде

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_j P_i(j) X_i, \quad (4)$$

где  $P_j$  выражает закон распределения вероятностей наступления неблагоприятных событий, а  $P_i(j)$  – законы распределения ущербов при наступлении каждого из таких событий.

Заметим, что приведенные выше формулы определяют величину среднего риска вне зависимости от деятельности объекта, подвергающегося определенной опасности. В общем случае можно выделить два вида такой деятельности.

1. Объект может принять меры с целью уменьшения потерь от неблагоприятного события (имеются в виду защитные меры). При этом сам объект не влияет на возможность его проявления. В научной литературе риски таких событий получили название “Чистые риски”. Как правило, указанные меры связываются с определенными затратами. В таком случае в формуле среднего риска необходимо увязать вероятность ущерба  $P_i(\mathbf{1})$  с произведенными затратами на его предотвращение (уменьшение). В этом случае последнее выражение примет следующий вид:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i P_j(j, z_j) X_i, \quad (5)$$

где  $P_i(j, z_j)$  – условная вероятность возникновения ущерба  $X_i$  при наступлении неблагоприятного события  $j$ -го типа и осуществлении защитных мероприятий от него с затратами  $z_j$ .

2. Объект может занять активную позицию по отношению к неблагоприятному событию и сознательно выбирать ситуацию, характеризующуюся другой вероятностью его проявления. Во-первых, он может выбрать более рискованную ситуацию с большей вероятностью ущерба, рассчитывая получить дополнительные преимущества, вкладывая капитал в более рискованные, но и более прибыльные проекты и т.п. Во-вторых, он может предпринять действия по избежанию риска, например, применяя более дорогие, но и более стойкие к коррозии материалы, применяя антикоррозионные покрытия и др.

Выбор ситуации обычно рассматривается как субъективное решение, зависящее от отношения объекта к риску, ожидаемому выигрышу при наступлении неблагоприятного события и других факторов. При этом подобного рода риски получили название “спекулятивные риски”. С учетом возможности такого выбора величину риска можно определить на основании следующего выражения:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{\psi}(V) P_j P_i(j, z_j) X_i, \quad (6)$$

где  $g_{\psi}(V)$  – вероятность выбора объектом ситуации, характеризующейся вероятностью наступления неблагоприятного события  $P_j$  и законом распределения ущерба  $P_i(j, z_j)$ , в свою очередь зависящим от принятых мер по защите  $Z_j$ .

Принципиальных различий между видами деятельности объекта по снижению величины среднего риска не наблюдается, хотя в одном случае это снижение обеспечивается за счет уменьшения ущерба от проявления неблагоприятного события, а в другом – уменьшение вероятности его проявления за счет выбора менее рискованной ситуации. Однако и в том и в другом случае снижение риска обеспечивается за счет перехода к ситуации с другим законом распределения вероятностей ущерба. Вследствие этого выражение (6) может рассматриваться в качестве общей формулы оценки величины среднего риска, учитывающей все возможные определяющие факторы и условия.

Для каждого конкретного объекта с учетом видов его деятельности и соответствующих им наборов ситуаций, неблагоприятных событий и возможных ущербов формула (1) может быть уточнена и конкретизирована. Для этого в первую очередь необходимо сформировать общие принципы и подходы к определению характеристик объекта и разработать методы их количественной оценки. Оценку экологического риска следует считать составной частью процесса управления природопользованием.

Можно провести аналогию между понятием «экологический риск» и хорошо известным понятием «экономический риск». В обоих случаях мы имеем

дело с неопределенностью, которую можно рассчитать как математически, так и статистически. Однако уровень неопределенности и тяжесть возможных последствий при сопоставлении обоих видов риска различны. В экономике человек рискует собственным капиталом или капиталом акционеров. В экологии лицо, принимающее решение, перекладывает риск на третьих лиц, то есть население экологически опасных зон. Экономический риск обычно определяется через расчет и анализ статистики, что связано с его одномерностью, так как итог может быть выражен в монетарной форме. Экологический риск всегда неопределенен, так как его следствия многомерны, и каждое из последствий ведет к следующим, проследить которые трудно и часто невозможно. К тому же, неблагоприятные последствия экономического риска проявляются обычно сразу или через непродолжительный период, а последствия экологического риска обычно отдалены и могут проявиться самым неожиданным способом. Таким образом, сопоставлять экологический и экономический риск можно лишь условно, хотя на практике часто имеет место автоматический перенос разработанных подходов с одного на другой. Экологический риск является более широким понятием, охватывающим не только монетарную, но и гуманитарную сферу. Его последствия могут быть настолько тяжелы, что могут привести к устойчивым отрицательным изменениям окружающей среды, угрожающим здоровью населения, состоянию естественных экосистем, генофондам растений и животных.

Вред природной среде при различных антропогенных и стихийных воздействиях неизбежен, однако он должен быть сведен до минимума и быть экономически оправданным. Любые хозяйственные или иные решения должны приниматься с таким расчетом, чтобы не превышать пределы вредного воздействия на природную среду. Установить эти пределы очень трудно, поскольку пороги воздействия многих антропогенных и природных факторов неизвестны. Поэтому расчеты экологического риска должны быть вероятностными и многовариантными.

По существующим правилам эксплуатации, секции труб заменяют после обнаружения утечки, т.е. поражение труб коррозией происходит раньше его обнаружения. Используя рассчитанные характеристики логарифмически нормального распределения, можно определить вероятности фактического выхода из строя трубопровода за представляющие наибольший интерес промежутки времени.

Параметры питтинговой коррозии (потенциал образования питтингов, скорость роста их глубины и др.) являются функциями многих параметров, которые при исследовании “фильтруют”, выбирая для дальнейших исследований наиболее существенно влияющие. Но пассивный эксперимент длится годами и десятилетиями, и те факторы, которыми при активном эксперименте вполне справедливо и необходимо пренебрегают, за длительное время оказывают влияние, которое не является пренебрежимо малым. Трубы, по которым транспортируется рабочая среда, ввиду их огромной протяженности подвержены влиянию разнообразных по составу и мощности воздействия факторов: неоднородности химического состава металла

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКОВ НА ГАЗОПРОВОДАХ

трубы и транспортируемых жидкостей и газов; температур окружающей среды; различной влажности грунта и др. Вследствие этого питтинги зарождаются и развиваются неодинаково на различных участках.

Составляя и исследуя регрессионную модель для функции отклика какого-либо параметра питтинговой коррозии, мы получаем зависимость для среднего значения исследуемого параметра (фактически для его математического ожидания) и рассчитываем дисперсию этой функции отклика.

Предположим, что в качестве функции отклика мы рассматриваем глубину питтинга или скорость ее роста. Используя выражение для функции отклика, интегрируя его, найдем и время развития глубины питтинга на всю толщину стенки трубы и другие параметры протекания этого процесса. С момента образования питтингов одни из них растут, другие погибают. Общее количество питтингов  $n$ , которые в итоге их развития проникают на всю глубину стенки трубы, образуя сквозные отверстия, можно рассчитать по формуле

$$n = \sum_{t=0}^t n(t) P(t), \quad (7)$$

где  $n(t)$  – число питтингов, существующих в момент времени  $t$ ;  $P(t)$  – вероятность того, что существующий в момент времени  $t$  питтинг проникнет на всю глубину стенки трубы.

Зная количество питтингов на исследуемом участке трубы и их средний диаметр, можно рассчитать, сколько за заданный промежуток времени вытечет через эти питтинги рабочей среды, и прогнозировать размер ущерба.

Приведённые рассуждения позволяют сделать вывод, что аварии на трубопроводе можно рассматривать как ординарный поток независимых случайных событий. Этот поток в течение времени, не превышающего 0,1 срока службы трубопровода, т.е. 2-3 лет, как показывает публикуемая в различных изданиях информация, является статистически равномерным. При этом функцию отклика системы можно с определенной точностью считать линейно зависимой от возмущающих факторов и, следовательно, линейно зависимой от времени. С течением времени стационарность потока отказов нарушается вследствие почти лавинообразного образования дефектов трубопровода, вызываемых коррозией металла (питтинговой, щелевой, поверхностной) и износом оборудования трубопровода. Аварии становятся более частыми и тяжелыми по их последствиям. Уменьшать степень риска аварий на трубопроводе можно двумя способами: принять защитные меры с целью уменьшения потерь от неблагоприятного события, не вмешиваясь в качество и структуру самого объекта, или изменить качество и режим эксплуатации самого объекта (применением более стойких к коррозии материалов, применением антикоррозийных покрытий и т.п.).

В условиях интенсивной антропогенной деятельности, иногда базирующейся на недостаточно высоком уровне научной и технической оснащенности и связанной с серьезными ошибками в технической и экологи-

ческой политике, проблема экологической безопасности окружающей природной среды представляется одной из наиболее актуальных. Реализация крупных проектов, помимо достижения планируемых положительных моментов, сопровождается возникновением негативных природно-антропогенных процессов, в результате которых всё общество несет громадные потери. Наиболее объективной оценкой уровня экологической безопасности антропогенной деятельности, объединяющей различные ее аспекты: технический, экономический, экологический и социальный, является оценка риска, которая позволяет для широкого класса явлений и процессов дать количественное описание экологических опасностей.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бубнова Н.Я., Логвина О.А., Таранцева К.Р. Экологическая безопасность и техногенный риск // *Пищевая промышленность и агропромышленный комплекс: достижения, проблемы, перспективы* : Международная научно-практическая конференция. – Пенза : МНИЦ, 2007. – С. 49–53.
2. Логвина О.А., Казаков В.А. Анализ рисков при обеспечении безопасности газопроводов // *Труды XXIII Международного симпозиума. – Маскат (Оман)* : РГУИиП, 2008. – С. 56.
3. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
4. Shibata T. Statistical and stochastic approaches to localized corrosion // *Corrosion (USA)*. – 1996. – V. 52, N. 1. – P. 813–830.