

И.М. Тетерин

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

В статье представлен научно-методический аппарат для оценки ожидаемого прямого ущерба окружающей природной среды и здоровью людей на прилегающей территории при разрушении магистрального газопровода на полное сечение (гильотинное разрушение) от воздействия основных опасных факторов, характерных для данного типа аварии:

- барических нагрузок на грунт при физическом разрушении газопровода, как сосуда под давлением;
- термических воздействий от факела пламени.

Ожидаемые показатели ущерба определяются вероятностными моделями, описывающие процессы периодизации аварий на годовом интервале и образование условий реализации аварийных сценариев – источников опасных факторов учетом внешних факторов, влияющих как на возникновение аварии, так и на вероятности развития поставарийных сценариев.

The problems of men health and environment injury evaluation because of gas transportation communications distraction are regarded. Probability models are used. Two types of external factors are taken in consideration – factors, which influence on probability of incident occasion and on probability of scenarios of incident development.

Введение

Аварии на магистральных газопроводах сопровождаются ущербами населению и окружающей среде в районе трассы газопровода вследствие действий опасных факторов, прежде всего, термическим – от пожара факела пламени и барическим вследствие разрушения газопровода под давлением. В статьях [1, 2] отмечалась важность прогнозирования параметров опасных зон от данного типа аварий, на основе которых, используя инструментарий научно-методического аппарата (НМА), осуществляется выбор комплекса мероприятий по защите населения и территорий. Возможными критериями для выбора наиболее эффективного комплекса защитных мероприятий может выступать либо ущерб окружающей природной среде, либо ущерб здоровью людей, расположенных на прилегающей территории. Таким образом, необходимо разработать методический и алгоритмический аппарат, который лег бы в основу программного комплекса для оценки ожидаемого прямого ущерба окружающей природной среде и здоровью людей на прилегающей территории при разрушении магистрального газопровода на полное сечение (гильотинное разрушение) от воздействия основных опасных факторов. Именно эта задача и рассматривается в настоящей статье.

Описание критериев и опасных факторов, учитываемых в модели

Согласно [3], различают прямой, косвенный, полный и общий ущерб. Прямой ущерб складывается из невозвратных потерь основных фондов всех структур народного хозяйства, попавших в зону действия поражающих факторов аварии, и оцененных природных ресурсов. Полный ущерб, в свою очередь, является суммой прямого и косвенного ущербов, а также затрат на ликвидацию последствий аварии.

Опыт ликвидации аварий этого типа за многолетнюю эксплуатацию показывает, что около 10 % аварий привели к значительным ущербам, оценка которых на сегодняшний день производится только по факту аварии с использованием уже имеющихся методик. Как отдельная задача рассматривается оценка ожидаемого ущерба жизни и здоровью людей на прилегающей территории.

Ряд факторов, существенно влияющих на величину ущерба, в традиционных методиках не учитывается. В частности, как правило, не учитывается неоднородность территории по факторам, определяющим как вероятность возникновения аварии, так и развитие поставарийных сценариев. Вследствие этого авторами предлагается методика комплексной оценки ущербов (МКОУ) от аварий на магистральных газопроводах, учитывающая две основные группы факторов, первая из которых влияет на вероятность возникновения аварии с гильотинным разрушением, а вторая – на развитие поставарийных сценариев.

В результате такого разрушения принята следующая картина развития аварийных сценариев, являющихся источниками опасных факторов - теплового потока и барического воздействия. Опасные факторы, образуемые при разрушении газопровода на полное сечение (гильотинный разрыв), могут реализоваться в виде четырех основных сценариев:

1. Образование воздушных волн сжатия за счёт расширения в атмосфере природного газа, выброшенного под высоким давлением из объема разрушившейся части газопровода с воздействием избыточного давления и импульса, действием от разлета фрагментов трубы и обломков грунта, описываемые моделью так называемого "физического взрыва".

2. Горение облака газовоздушной смеси гомогенного состава, способного сформироваться в процессе истечения не ранее, чем через 600 секунд после разрушения, с образованием воздушных волн сжатия за счет дефлаграционного процесса распространения фронта пламени в открытом пространстве, описываемые моделью так называемого "химического взрыва".

3. Образование огневого шара, возникающего на начальной стадии истечения газа из разрушенного трубопровода и появления источника возгорания гетерогенной газовоздушной смеси за время, не превышающее

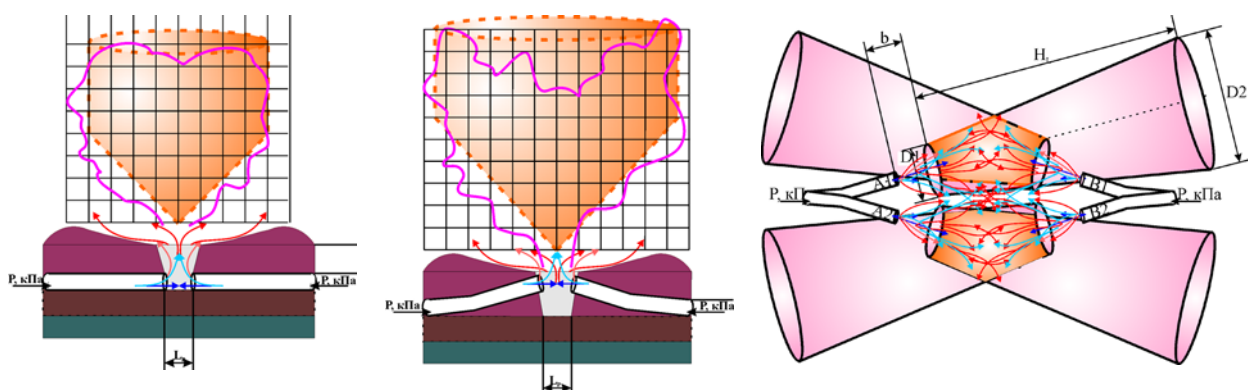
горения гетерогенной газовой смеси за время, не превышающее 1 минуты после разрушения, с воздействием теплового поля, описываемые так называемой моделью "огневого шар" с образованием эффекта "BLEVE".

4. Горение факела с воздействием теплового поля от пламени, образованного горением высокоскоростных струй газа, истекающих из разрушенной части трубопровода, описываемые моделью "тепловой факел":

- при выбросе грунта в форме котлована (котлованный факел) (рис. 1, А);

- при симметричном расположении осей разрушенных участков трубы и взаимовлиянии высокоскоростных струй истекающего газа из труб, приподнятых над поверхностью земли без образования воронки выброса (симметричный факел) (рис. 1, Б);

- при асимметричном расположении разрушенных труб относительно оси залегания трубопровода (асимметричный факел) (рис. 1, В).



А – котлованный факел

Б – симметричный факел

В – асимметричный факел

Рис. 1. Вероятные формы факельного горения

Вероятности поставочных сценариев предлагается оценивать по дереву событий с промежуточной оценкой ветвей исходов, полученных на основе статистических данных опыта ликвидации ЧС (рис. 2).

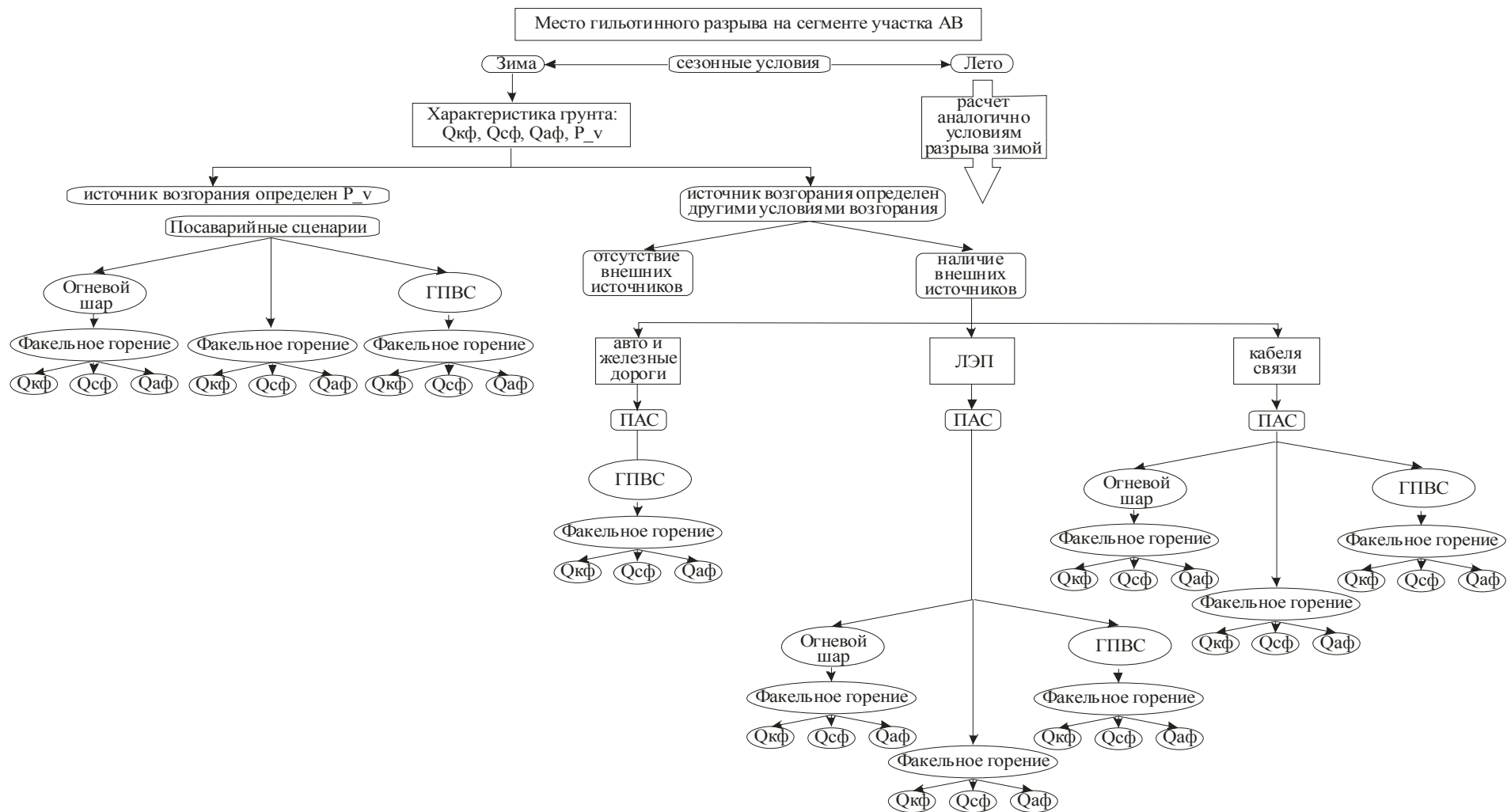


Рис. 2. Дерево событий с промежуточной оценкой ветвей исходов

Описание факторов, учитываемых в модели

Перейдем теперь к описанию конкретных факторов, влияющих на вероятность возникновения и сценарийность аварий и учитываемых в данной модели.

В первой группе факторов МКОУ (влияющих на вероятность возникновения аварии) рассматриваются следующие: наличие речных переходов, термокастовые и эрозийные процессы в грунтах повышенной сжимаемости, влияние редких опасных природных явлений (землетрясений, наводнений и т.п.), наличие запорной арматуры, пересечение с транспортными коммуникациями (автодорогами, железными дорогами, другими трубопроводами).

Во второй группе факторов (влияющих на вероятности поставарийных сценариев) рассматриваются следующие: характеристики грунтов залегания газопровода, пересечение с транспортными коммуникациями (авто и железными дорогами), с линиями электропередач (ЛЭП) и кабелями связи. Реализация поставарийных сценариев носит случайный характер и в МКОУ определяется сочетанием различных факторов: время года, вид грунта и наличие внешних источников возгорания, являющихся элементами инфраструктуры, рис. 2.

Построение точечной модели

Ранее авторами была сформулирована общая постановка задачи, опирающаяся на непрерывную модель, реализуемую через вычисление кратных интегралов. Однако аналитическое выражение функций, используемых в модели, а также их аналитическое интегрирование являются весьма затруднительными. Поэтому вопрос о практической реализации вышеприведенной модели является весьма актуальным. Основной идеей перехода от общей модели к нижеописанному алгоритму ее реализации является аппроксимация функциональных зависимостей кусочно-постоянными функциями. Как следствие этого, модель из непрерывной превращается в дискретную (точечную) с весьма близкими свойствами.

Основные этапы алгоритма МКОУ включают:

- выявление однородных сегментов по факторам группы I и группы II;
- вычисление вероятностных параметров для выделенных сегментов на основе факторов группы I и группы II;
- определение дополнительных узлов, исходя из особенностей прилегающей территории;

- вычисление вероятности возникновения аварии (конечная характеристика группы факторов I) на выделенных сегментах с учетом вычисления дополнительной вероятности на сегментах повышенного риска по конечным характеристикам возникновения поставарийных сценариев (группа II);

- определение вероятных характеристик причинения ущербов населению и элементам окружающей среды при оценке показателей индивидуального риска и ущербов окружающей среде и предприятию в окрестностях выделенных узлов, которые рассматриваются источниками опасных факторов гильотинного разрушения газопровода.

Фрагмент участка магистрального газопровода с выделенными узлами приведён на рис. 3.

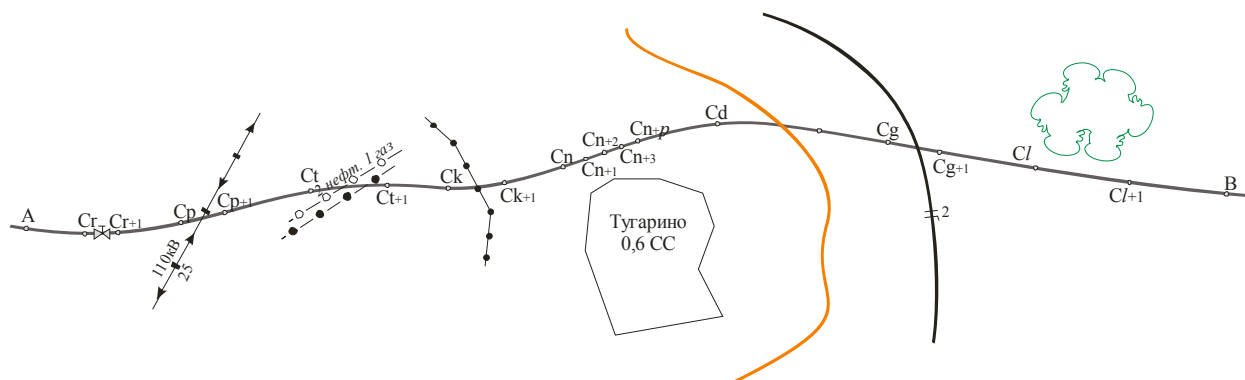


Рис. 3. Пример выявления однородных сегментов по факторам группы I и группы II на фрагменте газопровода для выделения узлов

Таким образом, целевой функцией МКОУ является определение фактических и ожидаемых параметров прямого ущерба и ущерба жизни и здоровью населения прилегающих территорий, интегрально получаемое через показатель индивидуального риска.

Первый этап алгоритма, как уже было сказано, состоит в переходе от непрерывной задачи на участке АВ к сеточной задаче на множество узлов $C_1 \dots C_N, C_i \in [AB]$. Идея такого перехода заключается в том, чтобы вместо оценки ущербов от возникновения ЧС на $[C_i C_{i+1}]$ оценить возможность ущерба от возникновения ЧС в узле C_i , приписав этому событию вероятность, равную вероятности возникновения ЧС на $[C_i C_{i+1}]$. Для того чтобы такой переход был оправдан, множество узлов должно строиться по определенным правилам, которые приводятся ниже.

Исходным предположением относительно вероятности возникновения ЧС на определенном участке МГ является предположение, что годовое количество аварий на участке длины L является стационарным потоком

однородных событий.

Напомним, что свойство стационарности характеризуется тем, что вероятность возникновения ЧС в количестве K на любом участке МГ зависит только от числа K и от протяженности участка L .

Кроме этого предполагается, что возникновения ЧС на одном участке не сказывается на вероятности возникновения ЧС на других участках. То есть, другими словами, мы исходим из взаимной независимости того или иного ЧС на непересекающихся участках МГ.

Мы исходим также из того, что вероятность появления более одного события пренебрежительно мала по сравнению с вероятностью появления только одного события (ЧС) на некотором участке МГ.

Вышеперечисленные предположения позволяют нам описать вероятность появления ЧС на участках МГ с помощью распределения Пуассона.

Согласно этому закону, вероятность появления K аварий на участке длиной L определяется формулой

$$P_L(K) = (\lambda L)^K \cdot e^{-\lambda L} / K!$$

Параметр распределения λ называется интенсивностью потока и определяет среднее число аварий, которые происходят за год на участке МГ единичной длины.

Вероятность появления хотя бы одной аварий за год на участке L определяется как

$$P_L(K \geq 1) = 1 - e^{-\lambda L}.$$

Однако, следует оговориться, что хотя мы пришли к выводу о возможности использования распределения Пуассона для описания числа аварий на участке МГ, это относится к участкам с одинаковой интенсивностью потока (λ). Закон, вообще говоря, не применим ко всему участку. В силу этого обстоятельства цель этапа 1 – разбить участки на такие сегменты, на которых интенсивность потока аварий можно считать постоянной, и, следовательно, применять соответствующие распределение Пуассона для данных сегментов.

Факторы, влияющие на интенсивность потока, отнесены нами к первой группе и перечислены выше.

Выделим на [AB] некоторое количество узлов R_i таким образом, чтобы локализовать участки с повышенной интенсивностью потока (рис. 3).

Конкретные влияния факторов группы I определяется согласно вероятности коэффициентов приращения (K_ϕ) к некоторой средней региональной интенсивности $\lambda_{\text{рег}}$.

Таким образом, интенсивности потока аварий для сегмента с присутствием некоторого фактора группы I выражается так:

$$\lambda_c = K_\phi \cdot \lambda_{\text{рег}}.$$

Таким образом, для каждого выделенного сегмента можно вычислить вероятность возникновения аварий в течение года как

$$1 - e^{-\lambda_c L_i},$$

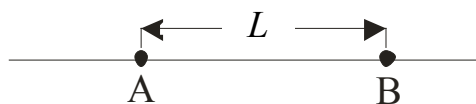
где $L_i = |C_k C_{kH}|$ – протяженность сегмента.

Далее рассмотрим более детально факторы, учитываемые в модели.

1. Грунты

Смена грунтов влияет как на вероятность возникновения аварии, так и на вероятности поставарийных сценариев.

Граница смены грунтов, как правило, не очень четкая. Можно было бы выделить некоторый участок длины L (длина переходной зоны) и приписать ему повышенное значение λ : $\lambda = \lambda_{\text{пер}} K$.



В этом случае точки A и B необходимо включить в сетку.

Коэффициент K определяется по результатам анализа опытных данных по ЧС для участка.

Влияние границы грунтов на сценарии факельного горения определяется разграничением в доленом отношении от полной группы событий ($P_{\text{фг}} = 1$)

$$P_{\text{фг}} = P_{\text{кф}} + P_{\text{сф}} + P_{\text{аф}}, \quad P_{\text{фг}}^{\alpha} = P.$$

Данное деление пока до конца не исследовано, но предварительные оценки представлены для 80 видов грунта в специальной БД.

2. Запорная арматура (ЗА)

Элементы запорной арматуры являются местами повышенной вероятности возникновения разрывов на МГ, что подтверждается статистическими данными аварий.

ЗА можно считать точечным объектом относительно протяженности рассматриваемых участков МГ.

По-видимому, правильней было бы говорить о вероятностях возникновения аварий в ЗА, исходя из статистических данных.

В этом случае ЗА нужно выбирать в качестве узла сетки с предписанной вероятностью.

$$\frac{P_{\text{за}}}{\text{ЗА}}$$

Деление сценарийности фаз горения определяется характеристиками грунта.

3. Пересечение с другим газопроводом

Пересечение с другими газопроводами увеличивает вероятность возникновения разрыва на основном МГ в силу того, что разрыв на определенном участке пересекающего МГ может повлечь за собой разрыв на определенном участке основного МГ. Естественно, что наличие пересекающего МГ в непосредственной близости от основного увеличит и величину ожидаемого ущерба для участка, прилегающего к месту пересечения. Будем использовать следующие обозначения:

d_1 – диаметр основного МГ,

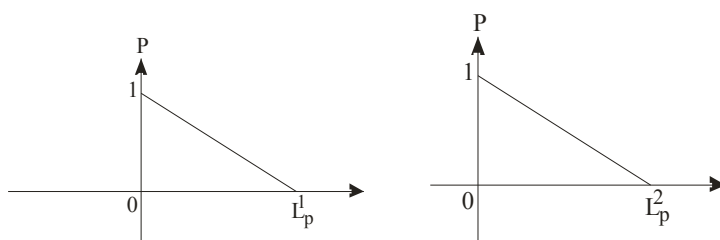
d_2 – диаметр пересекающего МГ,

α – угол пересечения (острый),

L_p^2 – предельное расстояние, на котором разрыв на пересекающем МГ влияет (может повлиять) на разрыв на основном МГ,

L_p^1 – предельное расстояние, на котором разрыв на основном МГ может повлиять на разрыв на пересекающем МГ, L_p^1 – функция от d_1 .

Вероятности влияний можно представить графически



Случай 1 характеризуется геометрически условиями $[MN] \subset [CD]$ и отражен на рис. 4, где $[AB]$ – участок пересекающего МГ, разрыв на котором может оказать влияние на основной МГ, $[CD]$ – участок основного МГ, разрыв на котором может оказать влияния на пересекающий МГ, $[MN]$ – участок основного МГ, на который может оказать влияние разрыв на пересекающем МГ.

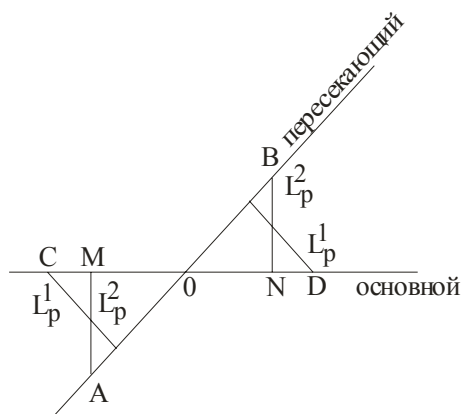


Рис. 4. Случай 1 пересечения МГ

Если $|om| = |on| = \frac{L_p^2}{tg\alpha}$ и $|oc| = |od| = \frac{L_p^1}{\sin\alpha}$, то данный случай реализуется при условии $|oc| > |om|$,

$$\frac{L_p^1}{\sin\alpha} > \frac{L_p^2}{tg\alpha} \text{ или } L_p^1 > L_p^2 \cos\alpha.$$

В качестве узлов сетки можно взять точки С, М, N, и D, а расчеты проводить в серединах отрезков [CM], [MN], [ND]: А, О, В (рис. 5).

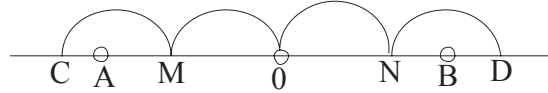


Рис. 5. Выбор сетки на участках пересечения МГ

Таким образом, точке О необходимо приписать вероятность возникновения аварий на отрезке [MN] основного газопровода + вероятность разрыва основного на отрезке [MN] в результате аварий на отрезке [AB] пересекающегося.

Далее покажем, как вычислить дополнительно вероятность разрыва основного МГ в результате разрыва на пересекающемся МГ.

$$\begin{aligned} P_o &= P_{|MN+AB|} = \alpha \cdot |MN| + \alpha \cdot \frac{L_p^1}{\sin\alpha} = \frac{2\alpha \cdot L_p^2}{tg\alpha} + \alpha \frac{L_p^1}{\sin\alpha} = \alpha L_p^2 \left(\frac{2\cos\alpha}{\sin\alpha} + \frac{1}{\sin\alpha} \right) = \\ &= \alpha L_p^2 \left(\frac{1+2\cos\alpha}{\sin\alpha} \right) \end{aligned}$$

Необходимо учесть тот факт, что, рассчитывая ущерб для узла О, мы полагаем с вероятностью 1 ущерб пересекающему газопроводу. Однако, так как точка О отражает ущерб на всем отрезке [MN], то можно использовать следующий приближенный способ для расчета математического ожидания ущерба на [MN]:

P_o (Общий ущерб от разрыва в точке О) + $\frac{1}{2}P_o$ (Ущерб от разрыва пересекающегося газопровода).

Вероятности в точках А и В рассчитываются обычным способом:

$$P_A = P_B = \lambda \cdot \left(\frac{L_p^1}{\sin\alpha} - L_p^1 \cdot ctg\alpha \right).$$

Случай 2 характеризуется геометрическим условием $[MN] \subset [CD]$. Этот случай реализуется при соотношении параметров $L_p^1 \langle L_p^2 \cdot \cos \alpha$.

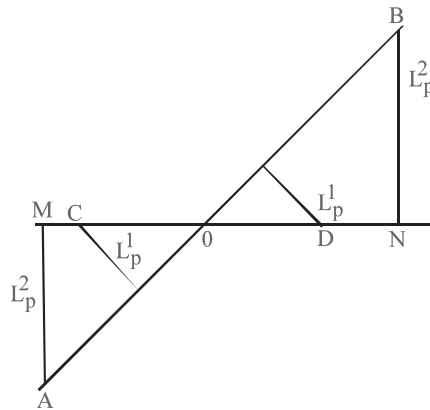


Рис. 6. Случай 2 пересечения МГ

Смысл отрезков $[AB]$, $[CD]$ и $[MN]$ совпадает с описанием в случае 1. В качестве узлов сетки можно взять точки М и N, а расчет произвести для точки О. При этом математическое ожидание ущерба на $[MN]$ можно приближенно вычислить как:

$$P_o \text{ (Общий ущерб от разрыва в точке О)} + \frac{1}{2} \frac{|CD|}{|MN|} \cdot P_o \text{ (Ущерб от разрыва пересекающегося газопровода)},$$
 где P_o , $|CD|$ и $|MN|$ совпадают со случаем 1.

4. Пересечение с ЛЭП

Разрыв МГ в непосредственной близости от опор ЛЭП может привести к их падению и разрыву линий электропередач.

Наличие обрыва в месте разрыва МГ, а значит и скопление газа может приводить к взрыву газа за счет внешнего фактора – искра ЛЭП в месте разрыва. Это обстоятельство в свою очередь влечет изменение стандартных среднестатистических вероятностей сценариев развития аварий. Естественно, что, как и в случае с пересечением с другим газопроводом, увеличивается и величина ожидаемого ущерба.

L_p – предельные расстояние, на котором разрыв на МГ вызывает падение опоры, обрыв ЛЭП и взрыв газовоздушного облака (ГО). Таким образом, как отмечалось выше, меняются вероятности сценариев. Имеет смысл рассматривать только две ближайшее опоры (слева и справа) М и N. Возможны 2 случая.

В качестве узлов сетки можно брать A_2 и B_1 , в качестве расчётной точки – середину $[A_2 B_1]$, а в качестве вероятности расчетного узла –

$\alpha [A_2 B_1]$.

Случай 2 – отрезки $[A_1, B_1]$ и $[A_2, B_2]$ не пересекаются.

Точный критерий случая 1:

$$\frac{R_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{R_2}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{R_1 + R_2}{\operatorname{tg} \alpha} \langle \sqrt{L_p^2 - R_2^2} + \sqrt{L_p^1 - R_1^2} \rangle.$$

В качестве узлов сетки можно брать A_2, B_2 и A_1, B_1 , в качестве расчётных точек – середины этих отрезков O_1 и O_2 .

Точный критерий случая 2:

$$\frac{R_1 + R_2}{\operatorname{tg} \alpha} \rangle \sqrt{L_p^2 + R_2^2} + \sqrt{L_p^1 + R_1^2}.$$

В качестве вероятностных отрезков нужно взять:

$$P_{o_1} = P_{|A_1 B_1|} = \lambda \cdot |A_1 B_1|,$$

$$P_{o_2} = P_{|A_2 B_2|} = \lambda \cdot |A_2 B_2|,$$

$$|A_1 B_1| = 2\sqrt{L_p^2 - R_1^2},$$

$$|A_2 B_2| = 2\sqrt{L_p^2 - R_2^2}.$$

5. Пересечение с транспортными магистралями (автомобильными и ж/д)

Пересечение МГ с транспортными коммуникациями влияет как на вероятность возникновения аварий (дополнительные барические нагрузки, вызванные транспортными средствами), так и на вероятности сценариев развития ЧС. Во втором случае предполагается, что результатом взаимодействия газового облака, скопившегося над участком коммуникаций, и проезжающей транспортной единицы будет взрыв (при возникновении искры). Как и в случае с пересечениями с газопроводом и ЛЭП, в данном случае также увеличивается и величина ожидаемого ущерба.

$$Q(x) = T_{zo} - \frac{2x \cdot \sin \alpha}{V} - \text{время существования облака на дороге при аварии в точке } x.$$

$$V = \frac{L_{\max}}{T_{\text{развит}}} \quad T_{\text{развит}} = f(T_{zo}, d, P).$$

В качестве узлов сетки возьмем точки А, М, N, В, а расчёты будем производить в серединах отрезков $[AM], [MN], [NB]$.

$1 - e^{-MQ(x)}$ – вероятность прохождения транспортного средства по трассе за время $Q(x)$ (присутствие ГО на трассе).

На участке MN используем увеличенное значение параметра $\lambda = \lambda_{\text{рез}} + \Delta$, а также увеличенную вероятность взрыва ГО: $P + \Delta p_1$.

В качестве Δp_1 берём среднюю вероятность взрыва ГО от прохождения транспортных средств для аварий на отрезке MN:

$$\Delta p_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(e^{-\mu T_{\text{зо}}} + e^{-\mu \left(T_{\text{зо}} \frac{2r \cdot \sin \alpha}{V} \right)} \right).$$

Для отрезков [AM] и [NB] используем только увеличенную вероятность взрыва ГО: $P + \Delta p_2$:

$$\Delta p_2 = 1 - \frac{1}{2} \left(e^{-\mu \left(T_{\text{зо}} \frac{2 + \sin \alpha}{V} \right)} + e^{-\mu \left(T_{\text{зо}} \frac{2L_{\text{max}}}{V} \right)} \right).$$

Литература

1. Овсяник А.И., Чурбанов О.И., Косоруков О.А. Управление рисками при чрезвычайных ситуациях и повышение эффективности защитных мероприятий оптимизационными методами распределения ресурсов для минимизации ожидаемого ущерба. – Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, № 2, 2002. – С. 86-93.
2. Овсяник А.И., Чурбанов О.И., Косоруков О.А. Методы решения оптимизационных задач защиты объекта от чрезвычайных ситуаций. – Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, №3, 2002. – С. 88-91.
3. Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. – М.: ЗАО ФИД "Деловой экспресс", 2001. – 344 с.