

УДК 622.692.48[533+536.6]

Методические подходы к расчету показателей риска эксплуатации трубопроводов, перекачивающих широкую фракцию легких углеводородов

В.С. Сафонов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1
E-mail: V_Safonov@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова: трубопроводы сжиженных углеводородных газов, расчет показателей риска аварий, территориальное распределение потенциального риска, влияние технико-технологических и природно-климатических факторов.

Тезисы. Построение и анализ территориального распределения риска, учитывающего как технико-технологическую специфику опасных производственных объектов, так и региональные инфраструктурные, топографические и метеорологические особенности, является одним из важнейших этапов в общей процедуре анализа риска аварий. В то же время объективные сложности решения этой задачи приводят на практике к использованию многочисленных и не всегда обоснованных упрощений, которые зачастую существенно искажают реальный уровень опасности производственного объекта. Поэтому в статье в развитие ранее предложенных автором положений рассматривается общий методический подход к построению территориального распределения потенциального риска, а также к расчету показателей индивидуального риска для линейных источников взрывопожароопасности. В качестве характерного примера принят трубопровод для транспортировки термодинамически нестабильных сжиженных углеводородных газов, на котором при аварийной разгерметизации формируются протяженные паровые облака, представляющие угрозу взрывного сгорания.

В последнее время среди профильных научных организаций и на площадках различных органов государственной власти активно обсуждается проблема обоснования показателей надежности и безопасности трубопроводов, перекачивающих термодинамически нестабильные сжиженные углеводородные газы и их смеси, в том числе широкую фракцию легких углеводородов (ШФЛУ). Основным фактором потенциальной опасности для подобных трубопроводов является испарение части или всего объема жидкости при аварийных выбросах. Пары сжиженных углеводородов, будучи значительно тяжелее воздуха и представляя угрозу взрывного сгорания, могут переноситься под действием ветра в приземном слое атмосферы на значительные расстояния, тем самым существенно расширяя зону потенциальной опасности относительно места аварии.

В рамках решения рассматриваемой проблемы ранее были представлены результаты комплексных исследований влияния технико-технологических и природно-климатических факторов на специфику развития и возможные последствия аварий на трубопроводах ШФЛУ [1–4]. В качестве объекта исследования был выбран трубопровод из цельнотянутых труб диаметром 426 мм, рассчитанных на рабочее давление $p_{\text{раб}} = 6,4$ МПа, для перекачки ШФЛУ с компонентным составом по ТУ 38-101524-93 в мольных долях: этан – 0,0251; пропан – 0,4953; н-бутан – 0,2341; изобутан – 0,087; н-пентан – 0,0895; изопентан – 0,0368; гексан – 0,0322. Проект этого трубопровода по трассе Сургут – Урало-Поволжье рассматривался акционерным обществом «Газпром» в конце 1990-х гг.

Отличительной особенностью предложенного [1–4] методического подхода является рассмотрение всех аварийных нестационарных гидравлических и тепломассообменных процессов в рамках единого логического сценария, когда итоговые параметры предшествующего процесса служат входными данными для последующего. Исходными событиями считаются при этом различные варианты разгерметизации трубопровода, т.е. динамика и объемы аварийных выбросов ШФЛУ. На основании

этих исследований для последующего анализа были приняты следующие положения:

1) наиболее характерным вариантом разгерметизации трубопровода в процессе его эксплуатации является образование продольных усталостных трещин, линейный размер которых носит случайный характер, но может быть описан различного рода статистическими распределениями, в том числе распределением Вейбулла. Разрыв «гильотинного» типа (когда прекращается однонаправленное движение жидкости и происходит независимое ее истечение уже из двух концов трубопровода) в результате экстремальных внешних динамических воздействий рассматривается при этом как гипотетический;

2) в силу высокой сжимаемости ШФЛУ (модуль упругости – 240 МПа, плотность – 560 кг/м³, для труб типоразмера 426×8 мм скорость звука в однофазном потоке ≈ 600 м/с) формирование гидравлического отклика на насосной станции вверх по потоку от места аварийной разгерметизации (снижение давления на $\Delta p = 2$ бар), по которому оператором идентифицируется авария и прекращается перекачка, объективно происходит в течение значительного времени (десять, двадцать и более минут), что предопределяет доминантное влияние интенсивности аварийного выброса на формирование зон потенциальной опасности;

3) в месте аварийной разгерметизации вследствие падения давления происходит частичное разгазирование сжиженного газа. Истечение двухфазного потока в окружающую среду происходит при этом в течение определенного времени с постоянным расходом в критическом режиме (эффект запираания) с интенсивностью, значительно меньшей, чем для однофазного потока. В консервативном приближении принято, что этот критический расход сохраняется неизменным до момента остановки перекачки;

4) парообразование ШФЛУ при аварийных выбросах из трубопровода происходит как за счет «одномоментного» изохэнтальпийного разгазирования при сбросе давления с рабочего до атмосферного, так и за счет последующего нестационарного растекания ШФЛУ по земной поверхности и частичного испарения (в основном пропан-бутановых фракций) вследствие теплопритока от грунта и атмосферы. В силу указанных факторов в месте разрыва формируется источник генерации «тяжелых» паров выражено переменной мощности;

5) в свободном неограниченном пространстве при поджигании облака по передней кромке фронта движения его сгорание происходит против ветра в узкой полосе с относительно низкой скоростью, примерно в 2,0...2,5 раза превышающей скорость ветра, т.е. со скоростью 10...25 м/с без сколь-нибудь значительных внешних термобарических эффектов. При сгорании облака в сильно загроможденном пространстве (мелколесье, густой кустарник) скорость сгорания может возрасти до 150...250 м/с, но в любом случае режим сгорания будет дефлаграционным. Амплитуда воздушной волны сжатия возрастает при этом с 3...5 кПа (свободное пространство) до 20...30 кПа, что может уже вызвать разрушение средней степени расположенных вблизи немонолитных малоэтажных зданий с вероятностью гибели находящихся там людей $\sim 5\%$. Тем не менее для получения верхней оценки показателей риска в качестве общей площади абсолютного (100 %) термобарического поражения людей, находящихся как на открытом пространстве, так и в помещениях, причем и при медленном, и при быстротечном сгорании облака паров ШФЛУ, принята площадь облака с граничной концентрацией не 1,0 НКПВ¹, а 0,5 НКПВ, что позволяет гарантированно учесть эффекты внешнего термобарического воздействия за пределами облака с концентрацией 1,0 НКПВ.

Перейдем к обоснованию основных методических положений анализа риска аварий для трубопроводов ШФЛУ как линейных источников взрывопожароопасности. При этом для формирования целостной картины здесь необходимо привести некоторые положения соответствующей методики для точечных источников опасности [1, 2, 5].

Общее количество Ω подлежащих расчету и анализу вариантов зон потенциального ущерба зависит от сочетания:

- числа анализируемых сезонов H_γ ($\gamma = 1, \dots, n$; обычно $2 \leq \gamma \leq 4$);
- параметров аварийного выброса (динамики, общих объемов, времени года и т.п.), в конечном итоге – числа значений интенсивности парообразования G_v ($v = 1, \dots, L$) на интервале $G_{\min} \dots G_{\max}$;
- числа значений скорости ветра U_η ($\eta = 1, \dots, W$) с учетом штиля на интервале $0 \dots U_{\max}$;

¹ НКПВ – нижний концентрационный предел воспламенения. Для пропана это $\sim 1\%$ об.

• числа анализируемых классов устойчивости атмосферы K_χ ($\chi = 1, \dots, M$) (как правило, шесть, по Паскуиллу).

Таким образом, $\Omega = nLWM$. Влияние направления ветра, т.е. соответствующих условных вероятностей (или частот повторяемости в разрезе года) P конкретных географических направлений ветра, на итоговую вероятность попадания некоторой точки пространства в зону потенциальной газовой опасности целесообразно учитывать отдельно.

Примем для примера, что одна из возможных зон потенциальной опасности (с характерной граничной концентрацией $C^* \leq 1,0$ НКПВ), в пределах которой существует ненулевая вероятность возникновения какого-либо ущерба, имеет вид ξ_i (рис. 1. см. а). Зоны ξ_i будут менять свое географическое направление, т.е. находиться в пределах определенного географического сектора (румба), строго по тому же вероятностному закону, что и соответствующая градация скорости ветра.

Некоторая точка с полярными координатами $M(\rho, \varphi)$ (см. рис. 1а) на территории вокруг точечного источника газовой опасности будет иметь ненулевую вероятность «захвата» облаком, только если окажется на дуге AB зоны ξ_i , т.е. при изменении случайного направления ветра в пределах сектора $[\varphi - \Delta\varphi(\rho); \varphi + \Delta\varphi(\rho)]$ (при $\Delta\varphi \geq \Delta\alpha$ точка M «выпадает» из зоны «захвата»). Тогда вероятность этого события выражается как

$$P_M(\xi_i) = \int_{\varphi - \Delta\varphi}^{\varphi + \Delta\varphi} \Psi_{U_\eta} \partial\varphi \text{ при } \varphi \leq \varphi_{\max}(U_\eta, K_\chi, G_v), \quad (1)$$

где $\Psi_{U_\eta}(\varphi)$ – функция плотности распределения случайной величины $0 < \varphi < 2\pi$, характеризующей географическое направление данной скорости ветра U_η .

Определим вероятность возникновения ущерба для некоторого реципиента, находящегося в точке $M(\rho_M; \varphi_M)$. Реализация этого сложного события является в общем случае итогом трех независимых событий: 1) попадания точки M в зону «захвата» углеводородного облака ξ_i ; 2) попадания одновременно с точкой M в «активную часть» зоны ξ_i (между верхним и нижним концентрационными пределами воспламенения) по крайней мере одного источника зажигания (ИЗ), принадлежащего к области взаимодействия; 3) «срабатывания» ИЗ (наличия отличной от нуля вероятности зажигания облака).

В качестве примера будем рассматривать взаимодействие точки M с двумя источниками зажигания $ИЗ_1(\rho_1; \varphi_1)$ и $ИЗ_2(\rho_2; \varphi_2)$ (см. рис. 1а). Пусть при этом выполняются условия: $\beta_2 < \varphi_M < \beta_1$; $\beta_1 < \beta_2$; $\beta_1 + \Delta\beta_1 > \beta_2 + \Delta\beta_2$; $\varphi_M + \Delta\varphi > \beta_2 + \Delta\beta_2$; $\beta_1 + \Delta\beta_1 > \varphi_M + \Delta\varphi$. Тогда (угловая) вероятность одновременного попадания всех трех точек (M , $ИЗ_1$ и $ИЗ_2$) в зону потенциального ущерба $\xi_i(U_\eta, K_\chi, G_v)$

$$P_{M;ИЗ_1;ИЗ_2} = \int_{\beta_1 - \Delta\beta_1}^{\beta_2 + \Delta\beta_2} \Psi_{U_\eta} \partial\varphi. \quad (2)$$

Сектор совместного влияния $ИЗ_1$ и $ИЗ_2$ на точку M показан на рис. 1б двойной штриховкой. Обратим внимание на то, что площадь двойной штриховки много меньше угловой площади исходного захвата точки M зоной ξ_i . Очевидно, что с каждым ИЗ в отдельности точка M будет иметь свои вероятности взаимодействия, пропорциональные соответствующим центральным углам, образованным пересечением лучей угла $2\Delta\varphi$ с лучами углов $2\Delta\beta_2$ или $2\Delta\beta_1$. Необходимым дополнительным условием возникновения ущерба является срабатывание какого-либо из ИЗ с априорными вероятностями P_j^* (реализация принципа «ИЛИ»). В приложении к случаю, представленному на рис. 1, если считать, кроме того, что в точке M координатно совмещены и субъект воздействия, и дополнительный источник зажигания $ИЗ_3(\rho_M; \varphi_M)$, получим сумму всех возможных комбинаций вероятностей зажигания отдельных ИЗ.

$$P_{ИЗ_1;ИЗ_2;ИЗ_3} = P_{ИЗ_1}^* (1 - P_{ИЗ_2}^*) (1 - P_{ИЗ_3}^*) + P_{ИЗ_2}^* (1 - P_{ИЗ_1}^*) (1 - P_{ИЗ_3}^*) + P_{ИЗ_3}^* (1 - P_{ИЗ_2}^*) (1 - P_{ИЗ_1}^*) + P_{ИЗ_1}^* P_{ИЗ_2}^* (1 - P_{ИЗ_3}^*) + P_{ИЗ_1}^* P_{ИЗ_3}^* (1 - P_{ИЗ_2}^*) + P_{ИЗ_2}^* P_{ИЗ_3}^* (1 - P_{ИЗ_1}^*) + P_{ИЗ_1}^* P_{ИЗ_2}^* P_{ИЗ_3}^*. \quad (3)$$

При этом вероятность возникновения ущерба в заданной точке M при воспламенении облака с конфигурацией ξ (конкретное сочетание характеристик источника генерации паров и метеорологических параметров) определяется для принятой комбинации расположений точки M и ИЗ как

$$P_{ИЗ_1;ИЗ_2;ИЗ_3=M} = \int_{\beta_1 + \Delta\beta_1}^{\beta_2 + \Delta\beta_2} \Psi_{U_\eta} \partial\varphi. \quad (4)$$

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что однотипные объекты со сжиженными углеводородными газами, на которых в результате аварийных выбросов возможно формирование облаков «тяжелого» газа, причем даже с одинаковым исходным аварийным потенциалом (интенсивность и общая масса выброса) и при одинаковых метеорологических характеристиках, но с отличными друг от друга распределениями по территории ИЗ, представляют различную опасность для имущественного комплекса, персонала и населения.

Специфика анализа риска линейных источников опасности во многом отличается от анализа риска точечных источников. Здесь мы имеем при прочих равных условиях уже две случайные

величины: географическое направление ветра и координату точки на трубопроводе, в которой могут произойти разгерметизация и выброс опасного продукта. Первая характеризуется плотностью распределения $\Psi(\varphi)$ ветров определенной силы U_{η} по различным географическим направлениям, а вторая – общей интенсивностью аварийных отказов λ (на единицу длины в единицу времени) и долевым распределением утечек различного масштаба при возникновении этого отказа. Поскольку точка M может попасть в зону потенциального поражения ξ_i из любой точки на некотором характерном (для ξ_i) участке трубопровода, вероятность этого события будет зависеть также и от ориентации этого участка по отношению к сторонам света.

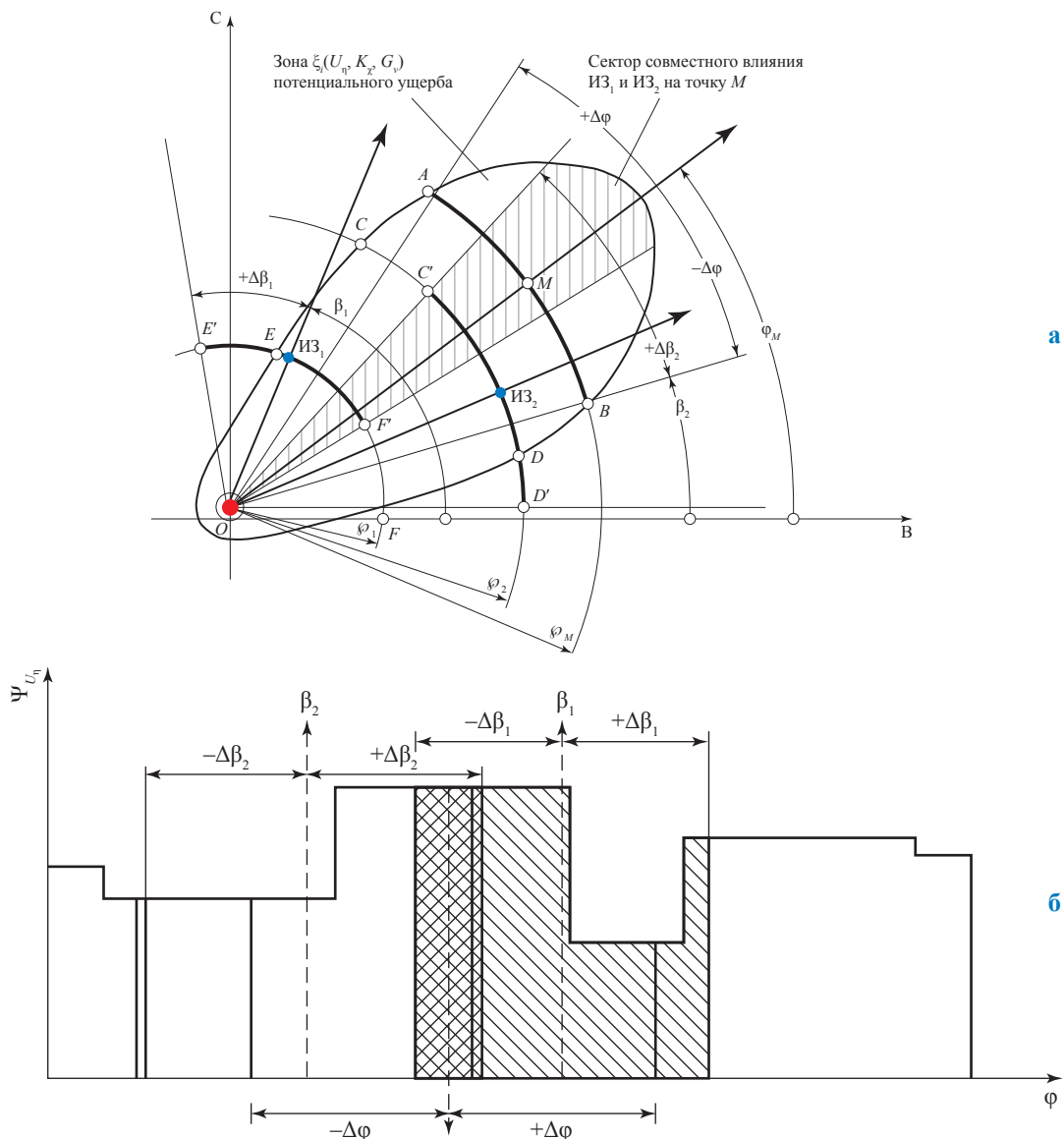


Рис. 1. К расчету вероятности «взаимодействия» точки M с ИЗ

Для каждой из точек $x \in [-x_i; +x_i]$ существует, кроме того, свой сектор влияния ветра с углом $2\Delta\varphi_M(x)$, определяемым шириной зоны потенциального поражения в точке M :

$$\Delta\varphi_M(x) = \arcsin\left(\frac{b}{\sqrt{y_M^2 + x^2}}\right).$$

Граничные значения углов общей «зоны захвата» точки M (область $D_i^{(M)}$):

$$\varphi_i^{M,1} = \varphi_M(+x_i) - \Delta\varphi_M(+x_i);$$

$$\varphi_i^{M,2} = \varphi_M(+x_i) + \Delta\varphi_M(+x_i).$$

Таким образом, область $D_i^{(M)}$ ограничена следующими изменениями величин x и φ :

$$D_i^{(M)} \equiv \begin{cases} -x_i \leq x \leq +x_i; \\ \varphi_i^{M,1}(x) \leq \varphi \leq \varphi_i^{M,2}(x). \end{cases}$$

С учетом отмеченных положений вероятность «захвата» облаком (конкретная конфигурация ξ_j) точки M (событие « M ») для одного из возможных значений λ_L

$$P_i^{(M)} = \lambda_L \int_{-x_i}^{+x_i} \int_{\varphi_i^{M,1}(x)}^{\varphi_i^{M,2}(x)} \Psi_i(\varphi) d\varphi dx. \tag{6}$$

Определение полной вероятности события « M » предполагает суммирование расчетов по всем принятым к рассмотрению значениям λ_{L_j} и отдельно по комбинациям влияющих метеорологических факторов так, что полный набор частот последних должен удовлетворять условию

$$\sum_{\eta=1}^W \sum_{\chi=1}^M \sum_{j=1}^n P_{\eta,\chi,j} = 1.$$

Если выбранный участок трубопровода составляет угол α с восточным направлением, то граничные значения углов корректируются как $\varphi_i^{M,1}(x) + \alpha$ и $\varphi_i^{M,2}(x) + \alpha$.

Рассмотрим далее случай, когда точка M находится территориально во внутреннем угле поворота анализируемого трубопровода, который делит ее на два участка I и II с различными в общем случае значениями интенсивностей отказов (разгерметизации трубопровода) λ_I и λ_{II} , причем участок II образует с восточным направлением угол $\alpha^{(II)}$, а участок I – угол $\alpha^{(I)}$. В зависимости от величины угла α и расстояний $y_M^{(I)}$ и $y_M^{(II)}$ на каждом из участков будет иметь место своя характеристическая длина $l_i^{(I)}$ или $l_i^{(II)}$, в общем случае несимметричная (за счет поворота) относительно точек пересечения соответствующих перпендикуляров из точки M с трассой.

Общая вероятность попадания точки M в зону потенциального поражения (в предположении невозможности одновременного возникновения аварий на обоих участках) рассматривается как сумма вероятностей по отдельным участкам, т.е.:

$$P_{I+II}^M = \sum_{i=1}^{6W} \left[\lambda_I \int_{-x_i^I}^{+x_i^I} \int_{\varphi_i^{(I,1)}(x)+\alpha^I}^{\varphi_i^{(I,2)}(x)+\alpha^I} \Psi_i(\varphi) d\varphi dx + \lambda_{II} \int_{-x_i^{II}}^{+x_i^{II}} \int_{\varphi_i^{(II,1)}(x)+\alpha^{II}}^{\varphi_i^{(II,2)}(x)+\alpha^{II}} \Psi_i(\varphi) d\varphi dx \right]. \tag{7}$$

Как и выше, полная вероятность «захвата» точки M зонами потенциального поражения ξ_j определяется суммированием всех принятых к рассмотрению сценариев с учетом их долевого влияния.

Если рассматриваемая точка M является одновременно и ИЗ с вероятностью срабатывания R_M^* , то вероятность поражения субъекта, т.е. его индивидуальный риск в точке M , определяется как $R_M = P^{(M)}R_M^*$. Когда точка M и точечный источник зажигания имеют различные координаты, то для каждой конкретной зоны ξ_j должна отыскиваться вероятностная область значений характеристических длин трубопровода и географических направлений ветров, обеспечивающих одновременное попадание и точки M , и ИЗ в зону потенциального поражения.

Назовем попадание ИЗ в облако (с характерными линейными размерами $[2b, h_i(G_v)]$), т.е. в зону потенциального поражения, событием «И». Это событие, как и событие « M », будет определяться своей областью $D_i^{(II)}$ изменения независимых случайных величин x и φ . Совмещение событий « M » и «И» означает пересечение множеств $D_i^{(M)}$ и $D_i^{(II)}$ и существование нового множества $D_i^{(M,II)}$.

Область изменения x и φ для точки И ($x_{И}, y_{И}$) определяется как

$$\left. \begin{aligned} \varphi(x) &= \arctg\left(\frac{y_{И}}{x_{И} - x}\right), x_{И}^{(1)} < x < x_{И}; \\ \varphi(x) &= \frac{\pi}{2}, x = x_{И}; \\ \varphi(x) &= \pi - \arctg\left(\frac{y_{И}}{x_{И} - x}\right), x_{И} < x < x_{И}^{(2)}; \\ x_{И}^{(1)} &= x_{И} - \sqrt{h_i^2 - y_{И}^2}; x_{И}^{(2)} = x_{И} + \sqrt{h_i^2 - y_{И}^2}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\Delta\varphi(x) = \arcsin\left[\frac{y_{И}}{\sqrt{b^2 + (x - x^2)^2}}\right]; D_i^{(И)} \equiv \begin{cases} -x_{И}^{(1)} \leq x \leq x_{И}^{(2)}; \\ \varphi_i^{(И_1)} \leq \varphi \leq \varphi_i^{(И_2)}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\varphi_i^{(И_1)} = \varphi(x) - \Delta\varphi(x);$$

$$\varphi_i^{(И_2)} = \varphi(x) + \Delta\varphi(x).$$

На плоскости (x, φ) пересечение областей $D_i^{(M)}$ и $D_i^{(И)}$ для случая, изображенного на рис. 2, можно представить так, как показано на рис. 3.

Таким образом, совмещение событий «М» и «И» (т.е. попадание точек $M(0, y_M)$ и $ИЗ_k(x_{И}, y_{И})$ одновременно в зону потенциального поражения ξ_i с характерными размерами h_i и $2b$) может произойти при нарушении герметичности трубопровода на участке $x_i^{MM} \leq x \leq +x_i$ и при изменениях направлений ветра в диапазоне $\varphi_i^{(M_1)} \leq \varphi \leq \varphi_i^{(M_2)}$.

Вероятность совмещений этих событий для одного из возможных вариантов λ_L :

$$P^{(MI)} = \lambda_L \sum_{i=1}^{6W} \iint_{D_i^{(MI)}} \Psi_i(\varphi) d\varphi dx. \quad (10)$$

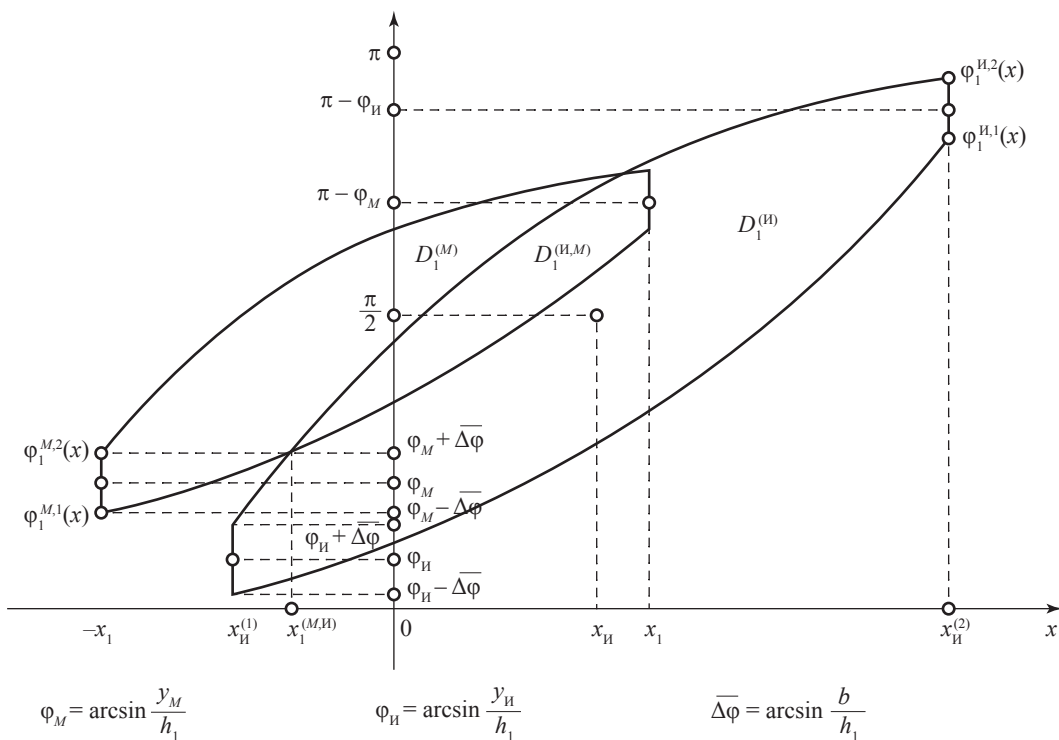


Рис. 3. К расчету вероятности одновременного попадания точки $M(x, y)$ и $ИЗ_k(x_{И}, y_{И})$ в зону поражения ξ_i

Если принять также, что и точка $M(0, y_M)$, и точка $ИЗ_k(x_{И}, y_{И})$ являются источниками зажигания с вероятностями срабатывания соответственно P_M^* и $P_{И}^*$, то вероятность поражения реципиента, постоянно находящегося в точке M (индивидуальный риск), будет определяться как

$$P_{И_k}^{(M)} = P_M^* P^{(M)} + P_{И}^* [1 - P_{И}^*] P^{(MI)}$$

Для общности картины определим также вероятность воспламенения образующегося при аварии на трубопроводе облака не от точечных, а от «линейных» ИЗ, каковыми можно рассматривать, например, дороги, т.е. линейный отрезок на ситуационном плане (на территории промышленной зоны), по которому с определенной частотой может перемещаться ИЗ (например, автомобиль). Поместим начало координат в место разгерметизации трубопровода, ось которого ориентирована вдоль оси абсцисс (условно на восток) (рис. 4).

В принятой системе координат пересекающий под некоторым углом трассу трубопровода прямолинейный участок дороги будет описываться уравнением $y = ax + c$. Задача заключается в выявлении опасного участка дороги, который может вызвать зажигание облака. Как и ранее, будем считать, что при фиксированной интенсивности выброса G_v (из принятого к рассмотрению спектра) зоны потенциальной опасности ξ_i имеют характерную протяженность h_i (сочетание U_η при $\eta = 1, 2, \dots, W$ и K_χ при $\chi = 1, 2, \dots, 6$) и осредненную ширину $2b_v$. Обозначим минимальное расстояние от места аварийной утечки на трубопроводе до дороги через OD . Очевидно, что опасность возникнет только для тех сочетаний $i(G_v; U_\eta; K_\chi)$, при которых $h_i \geq OD$. Можно показать, что координаты совокупности точек $[D_1^{(i)}(x_1, y_1)$ и $D_2^{(i)}(x_2, y_2)]$ на дороге, между которыми заключен опасный участок для зоны ξ_i , будут при этом равны:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{c}{a_{1,1} - a}; y_1 = \frac{a_{1,1}c}{a_{1,1} - a}; \\ x_2 &= \frac{c}{a_{1,2} - a}; y_2 = \frac{a_{1,2}c}{a_{1,2} - a}; \\ a_{1,1} &= \frac{ah_i^2 + \sqrt{h_i^2 c^2 (1+a^2) - c^4}}{h_i^2 - c^2}; \\ a_{1,2} &= \frac{ah_i^2 - \sqrt{h_i^2 c^2 (1+a^2) - c^4}}{h_i^2 - c^2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Вероятность попадания в зону потенциального поражения любой из точек $D(x, y)$ в пределах изменения $x_1 < x < x_2$ и $y_1 < y < y_2$ будет определяться, как и выше, интегралом функции $\Psi_i(\varphi)$:

$$P_{D(x,y)}^{(i)} = \int_{\varphi_1^{(i)}(x)}^{\varphi_2^{(i)}(x)} \Psi_i(\varphi) d\varphi, \quad (12)$$

где

$$\varphi_1^{(i)} = \arctg\left(a + \frac{c}{x}\right) - \arcsin\left(\frac{b}{\sqrt{x^2 + (ax + c)^2}}\right);$$

$$\varphi_2^{(i)} = \arctg\left(a + \frac{c}{x}\right) + \arcsin\left(\frac{b}{\sqrt{x^2 + (ax + c)^2}}\right).$$

Поражение реципиентов на дороге будет иметь ненулевую вероятность в том случае, если в пределах участка дороги длиной $L_d(\varphi) = 2bk(\varphi)$, захваченного облаком с конфигурацией ξ_i (где $k(\varphi)$ – коэффициент, зависящий от угла пересечения осей зоны поражения и дороги; для кратчайшего расстояния между местом разрыва на трубопроводе и дорогой $k = 1$), имеются (для рассматриваемого интервала времени) ИЗ с $P_d^*(\varphi) = \lambda_d L_d(\varphi)$, где λ_d – частота появления на этом участке дороги ИЗ (автомобилей).

Таким образом, вероятность воспламенения облака за счет какого-либо из источников зажигания в пределах опасного участка дороги для всего спектра скоростей ветра U_η ($\eta = 1, w$) и шести классов устойчивости атмосферы с учетом имеющихся региональных статистических корреляций между ними (при $G_v = \text{const}$)

$$\bar{P}_{D(x,y)}^v = \sum_{i=1}^{6W} \int_{\varphi_1^{(i)}(x)}^{\varphi_2^{(i)}(x)} P_d^*(\varphi) \Psi(\varphi) d\varphi. \quad (13)$$

Поскольку автомобиль на дороге является не только потенциальным ИЗ облака, но и субъектом воздействия для водителей и пассажиров автотранспорта, величина $\bar{P}_{D(x,y)}^v$ может отождествляться для них формально с индивидуальным (групповым) риском.

В тех случаях, когда рассматриваемая точка $M(x, y)$ расположена вне дороги, необходимо, как и выше, найти общий сектор направлений ветра, обеспечивающих попадание этой точки в зону поражения ξ_i одновременно с соответствующим участком дороги. Сектор направлений ветра для точки M (при $x_1 \leq x \leq x_2; y_1 \leq y \leq y_2$):

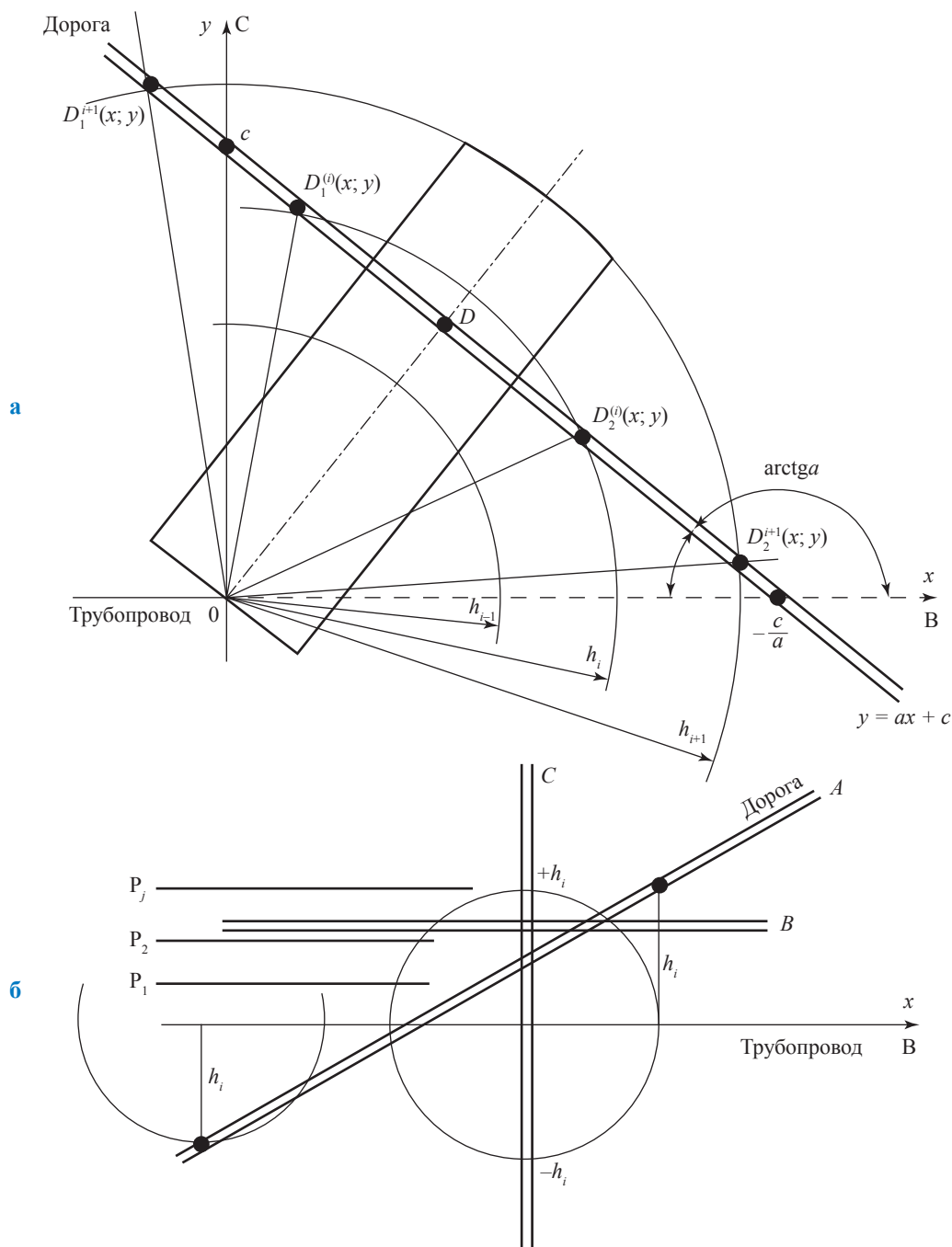


Рис. 4. К расчету вероятности воздействия на транспортные коммуникации от линейного источника опасности

$$[\varphi_M^{(i)} - \Delta\varphi_M^{(i)}; \varphi_M^{(i)} + \Delta\varphi_M^{(i)}];$$

$$\varphi_M^{(i)} = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_M}{x_M} \right);$$

$$\varphi_M^{(i)} = \arcsin \left(\frac{b}{\sqrt{y_M^2 + x_M^2}} \right).$$

Аналогично для участка дороги $[D_1^{(i)}; D_2^{(i)}]$:

$$\min[\varphi_1^{(i)}(x)] \leq \varphi \leq \max[\varphi_2^{(i)}(x)].$$

Общая часть (пересечение) этих секторов определяет искомый сектор направлений ветра для точки M и участка дороги:

$$[\varphi_{1_{M,D}}^{(i)}; \varphi_{2_{M,D}}^{(i)}] \equiv [\min \varphi_1^{(i)}(x); \max \varphi_2^{(i)}(x)] \cap [\varphi_M^{(i)} - \Delta\varphi_M^{(i)}; \varphi_M^{(i)} + \Delta\varphi_M^{(i)}].$$

Если точка M одновременно является и ИЗ с вероятностью срабатывания P_M^* , то вероятность поражения субъекта в точке M для принятых к рассмотрению вариаций скорости ветра и классов устойчивости атмосферы (при $G_v = \text{const}$)

$$P_{M(x,y)}^v = \sum_{i=1}^{6W} \left\{ P_M^* \int_{\varphi_M^{(i)} - \Delta\varphi_M^{(i)}}^{\varphi_M^{(i)} + \Delta\varphi_M^{(i)}} \Psi_i(\varphi) d\varphi + (1 - P_M^*) \int_{\varphi_{1_{M,D}}^{(i)}}^{\varphi_{2_{M,D}}^{(i)}} P_D^*(\varphi) \Psi_i(\varphi) d\varphi \right\}. \quad (14)$$

Рассмотренные методические положения полностью применимы и к более общему случаю, когда вероятность поражения на опасном участке транспортной коммуникации определяется возможностью разрыва трубы в любой произвольной точке трассы в пределах некоторой характеристической длины. Для варианта расположения дороги, представленного на рис. 4, характеристическая длина ($x_1^i; x_2^i$) определяется из условия $h_i \geq |ax + c|$, т.е. будет определяться сочетанием метеопараметров $(U_n; K_\chi)_{G_c}$. Для всех точек дороги с координатами $|y| \leq h_i; x_1^i \leq x \leq x_2^i$ вероятность поражения рассчитывается таким же образом, что и для случая поражения точки $M(x, y)$ от линейного участка трубопровода L_{h_i} (см. выше), с заменой фиксированных координат этой точки $(0; y_M)$ на координаты текущей точки дороги $(x; ax + c)$, а вероятности P_M^* срабатывания точки $M(x, y)$ как ИЗ – с заменой на соответствующую величину $P_D^*(x, y)$. Характерными частными случаями являются параллельное и перпендикулярное расположения дороги относительно оси трубопровода.

Как было отмечено выше, при отсутствии выраженного преобладания ветров определенных географических направлений, т.е. в случае конфигурации поля потенциального поражения, близкой к окружности (или же при проведении соответствующего эквивалентирования по площади) (см. рис. 2б), линии равной вероятности достижения различных точек территории зонами поражения будут параллельны (эквидистантны) и располагаться на одинаковых расстояниях слева и справа от оси прямолинейного участка трубопровода. Тогда вероятность поражения субъектов будет одинакова для всех точек параллельно трубопроводу расположенного участка дороги. При выраженной розе ветров линии равных вероятностей поражения от трубопровода также эквидистантны его оси, однако их удаления от оси (условно слева и справа по направлению движения) будут уже различными. Если транспортная магистраль пересекает трубопровод под прямым углом, то опасный участок дороги для характерной зоны ξ_i будет иметь длину $L_{h_i} = 2h_i$ (см. рис. 4б). Расчет вероятности поражения в каждой из точек опасного участка ведется аналогично представленному выше расчету для точки M при $x = 0$ и $-h_i \leq y \leq +h_i$ с заменой P_M^* на $P_M^* = \lambda_D 2b$.

Проиллюстрируем далее особенности использования представленных выше методических подходов к обоснованию показателей риска для населенного пункта общей площадью 32 га с числом жителей, например, 500 чел., расположенного в полосе прохождения трассы двухниточного трубопровода ШФЛУ (диаметр 426 мм, $p_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа). Населенный пункт удален от трубопровода по перпендикуляру на расстояние $L = 500$ м. По существующим нормативам расстояние до трубопровода отсчитывается при этом от ближайшего дома. При сохранении общей площади поселка примем два варианта его расположения относительно трубопровода – параллельное и перпендикулярное.

В последующих расчетах принято, что при аварийной разгерметизации трубопровода будет выдерживаться долевое соотношение различных интенсивностей истечения ШФЛУ, кг/с: 25 в 30 % случаев; 50 в 25 %; 100 в 20 % (продольные трещины) и 300 в 15 % (из одного конца трубопровода при разрывах «гильотинного» типа). Ожидаемая частота аварийной разгерметизации «жидкостных» трубопроводов в целом $\lambda = 0,3$ на тысячу километров в год (цифра принята только в качестве примера, поскольку должна определяться для конкретных условий на базе балльно-факторного анализа). Соответственно, для двухниточного трубопровода $\lambda = 0,6$ на тысячу километров в год.

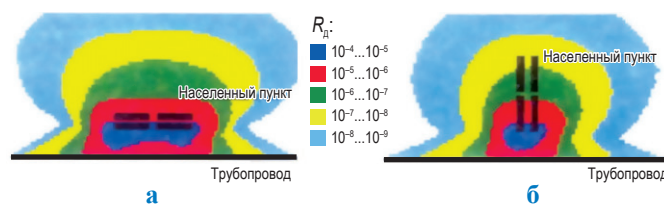


Рис. 5. Поле потенциального риска аварий на трубопроводе ШФЛУ для населенных пунктов, расположенных параллельно (а) или перпендикулярно (б) трубопроводу

На рис. 5 показано поле потенциального риска² R_d от двухниточного трубопровода ШФЛУ диаметром 426 мм для метеорологических условий Тюменской области с учетом всех возможных в разрезе года комбинаций скоростей ветра, классов устойчивости атмосферы, «шероховатости» и температуры земной поверхности, а также указанных соотношений ожидаемых интенсивностей аварийных выбросов.

Обратим внимание на то, что при построении поля потенциального риска мы используем только один характерный размер облака – его протяженность. Поле потенциального риска, отражающее технологическую специфику объекта и региональную специфику атмосферного переноса, следует рассматривать как максимальный (гипотетический) потенциал опасности, поскольку этот потенциал не зависит от существования и распределения по территории ИЗ облака и реципиентов воздействия, а также не учитывает возможности реального (адекватного) поведения человека при возникновении аварии, наличия «барьеров защиты» и т.п.

На рис. 6 показана плотность населения в расчете на элементарное сечение поселка в функции расстояния от трассы L . При этом принималось, что потенциальные ИЗ облака на территории поселка стационарны и связаны непосредственно с хозяйственно-бытовой деятельностью людей, а их число пропорционально числу людей N на соответствующей площади территории. При общей площади поселка 32 га на его единичной площадке (элемент сетки 50,8×50,8 м) вероятность загорания облака принята равной 0,136. Для рассмотренного сценария на рис. 7 представлена также гистограмма распределения людей по уровням риска с учетом реального времени нахождения определенных групп населения в населенном пункте. Видно, что интегральные показатели

риска для случая параллельного трассе расположения поселка оказались в 3,3 раза больше, чем для случая его перпендикулярного расположения.

Заметим также, что вероятность возникновения ущерба от быстротечного сгорания облака оказалась более чем в 2 раза ниже, чем вероятность достижения облаком соответствующих точек населенного пункта.

Потенциальными ИЗ облака при аварии на трубопроводе ШФЛУ являются не только объекты проживания и хозяйственной деятельности человека, но и автомобильные или железные дороги. При этом специфическому риску подвергаются прежде всего водители и пассажиры транспортных средств. Вопросы имущественного риска в данном случае не рассматриваются.

Согласно СНиП 2.05.02-85 все автомобильные дороги подразделяются на категории в соответствии с интенсивностью движения (таблица).

Для иллюстрации пересечения с дорогой трубопровода ШФЛУ приняты³: метеорологические условия Тюменской области, доленое соотношение утечек различного масштаба, кг/с: 600 в 5 % случаев; 300 в 15 %; 100 в 20 %; 50 в 25 %; 20 в 35 %. Установлено, что дороги III категории с точки зрения возникновения ущерба почти в 2 раза менее опасны, чем дороги I категории, а IV категории – почти в 2 раза менее опасны, чем дороги III категории. При параллельном расположении линейного ИЗ паров и линейного источника опасности (источника генерации паров ШФЛУ) их взаимовлияние определяется уже не только

² Алгоритм построения полей потенциального риска на картографической основе разработан А.А. Швыряевым (МГУ им. М.В. Ломоносова).

³ При разрыве трубопровода «гильотинного» типа участок трубопровода вниз по потоку работает в режиме отбора жидкости с двух концов и сохраняет свою сплошность и расход в 300 кг/с лишь в течение 1,5...2,0 мин. Далее расход резко падает до 50...70 кг/с задолго до момента прекращения перекачки. Поэтому расход $2 \cdot 300 = 600$ кг/с рассмотрен только для учета верхней границы возможного диапазона рисков. Кроме того, в данном случае рассмотрена функция относительного риска (R/λ), что позволяет исключить из анализа высокую числовую неопределенность λ .

интенсивностью движения транспорта по дороге и вероятностью достижения облаком самой дороги, но и, что важно, шириной этого облака. В качестве иллюстрации при интенсивности аварийного истечения ШФЛУ из трубопровода $G_v = 300$ кг/с на рис. 8 приведены показатели относительного риска (R/λ) при параллельном трассе прохождении дорог различной категории. При этом в качестве базовой величины (верхняя кривая) дана вероятность достижения облаком полотна дороги $P_{\text{дост}}$.

Согласно рис. 8 для дорог I категории относительный риск составляет $\sim 37...41$ %

от вероятности достижения облаком дороги, II категории – 30...35 %, III категории – 23...28 %, IV категории – 13...15 %. Для дорог IV категории зависимость относительного риска от интенсивности аварийных утечек ШФЛУ приведена на рис. 9. Аналогично рассмотрены остальные сценарии развития аварий.

Железные дороги также являются потенциальными ИЗ облака. Как показали расчеты, для характерной интенсивности движения Φ , равной 20 составов в сутки, риск гибели людей на отрезке железнодорожного пути 1 км,

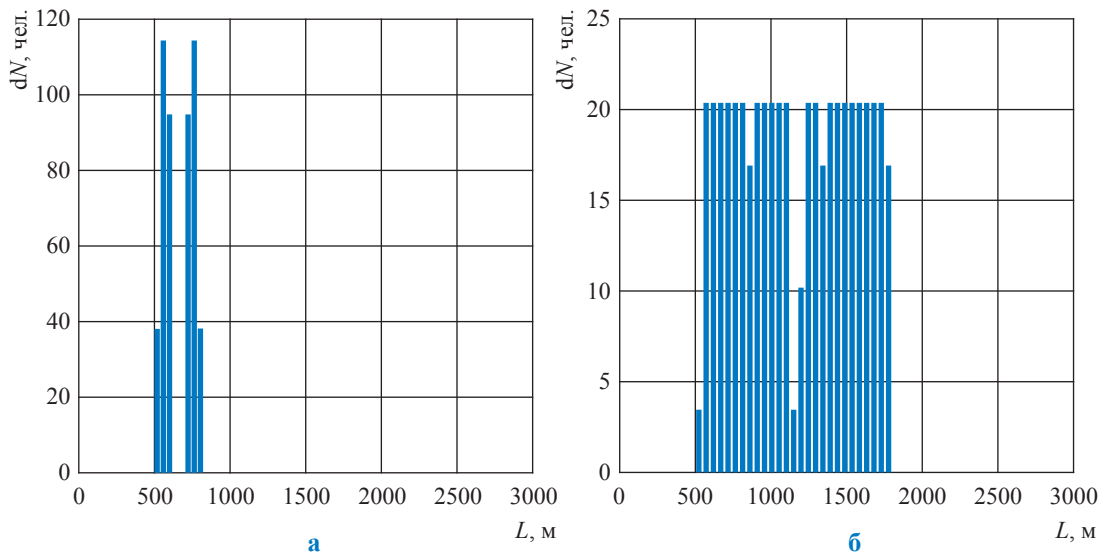


Рис. 6. Распределение плотности населения при удалении от трассы для вариантов расположения поселка параллельно (а) и перпендикулярно (б) трубопроводу (см. рис. 5)

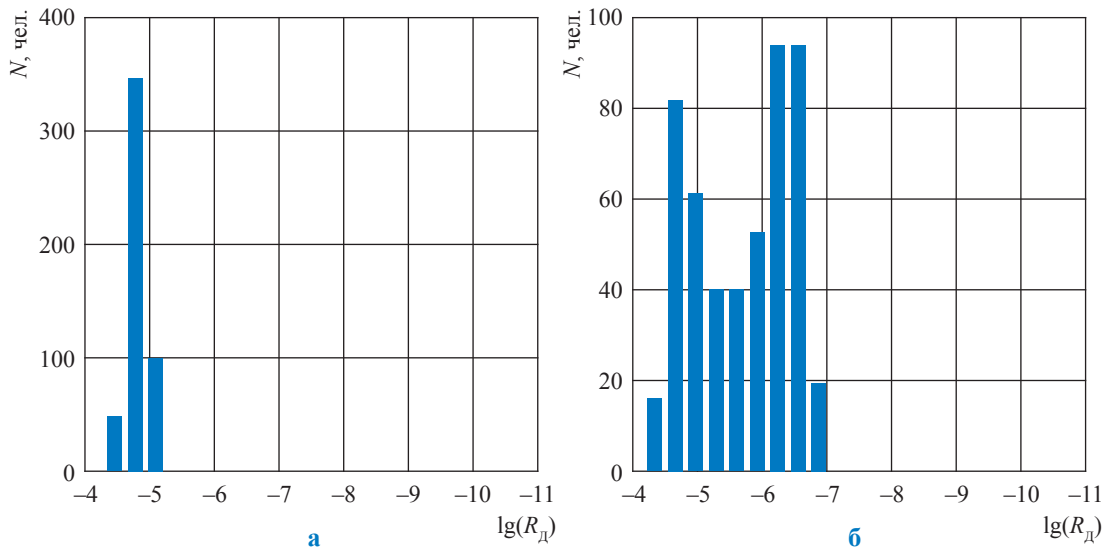


Рис. 7. Распределение населения по уровням риска для вариантов расположения поселка параллельно (а) и перпендикулярно (б) трубопроводу (см. рис. 5)

Категория дороги	I	II	III	IV	V
Интенсивность движения (Φ), автомобилей/сут	> 7000	3000...7000	1000...3000	100...1000	< 100

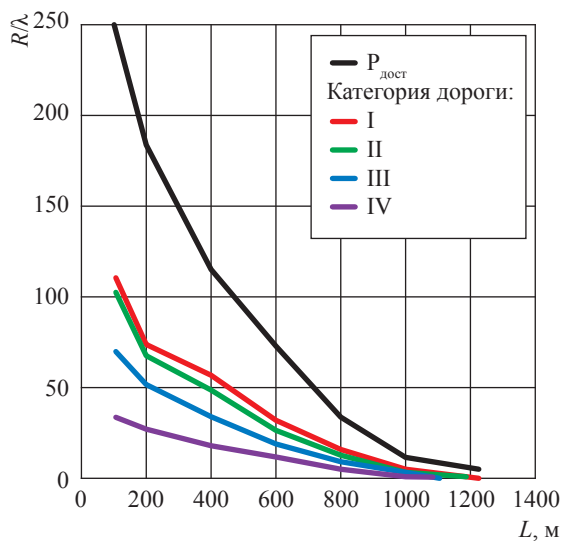


Рис. 8. Зависимость относительного риска для автодорог различных категорий при их параллельном расположении относительно трассы трубопровода ШФЛУ ($D_y = 400$ мм, $p_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа, $G_v = 300$ кг/с)

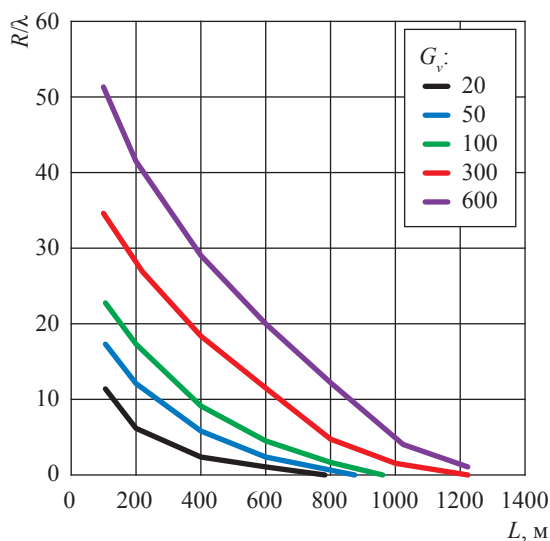


Рис. 9. Зависимость относительного риска для автодороги IV категории при ее параллельном расположении относительно трассы трубопровода ШФЛУ ($D_y = 400$ мм, $p_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа) для различных интенсивностей утечек ШФЛУ

удаленного на 100 м от трубопровода ШФЛУ с $D_y = 400$ мм, составляет $(3...5) \cdot 10^{-5}$ год $^{-1}$.

С учетом полученных результатов рассмотрено также влияние различных вариантов взаимного расположения трубопровода ШФЛУ, автомобильных дорог и населенных пунктов на показатели риска аварий на трубопроводе для людей. Для приведенных выше двух вариантов расположения населенного пункта численностью 500 чел. относительно трубопровода ШФЛУ в инфраструктуру введена дополнительно дорога IV категории, проходящая в различных вариантах: через населенный пункт перпендикулярно трассе трубопровода; перед населенным пунктом параллельно трубопроводу; после населенного пункта (через населенный пункт) параллельно трубопроводу.

Установлено, что наличие дороги, проходящей через населенный пункт, незначительно сказывается на уровне риска для населения. В то же время наличие дороги до населенного пункта несколько уменьшает риск за счет эффекта экранирования дорогой источников зажигания в самом поселке, а в случае

прохождения дороги за поселком по отношению к трассе уровень риска, наоборот, несколько увеличивается.

В качестве дополнительной иллюстрации общего алгоритма анализа на рис. 10 представлен характерный вариант расчета показателей риска аварий на участке прохождения трассы двухниточного трубопровода ШФЛУ (диаметр 426 мм, $p_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа), включающего населенный пункт (400 чел., Татарстан), а также автомобильные и железные дороги (как потенциальные ИЗ парового облака). При этом учитывалось, что часть людей может находиться в поселке лишь в определенное время суток. В данном примере принято: $\lambda = 0,6$ на тысячу километров в год; долевое распределение масштабов утечек аналогично примеру на рис. 5. Общая площадь карты 5×5 км (см. рис. 10). Для рассмотренного населенного пункта индивидуальный риск гибели людей при возможных авариях на двухниточном трубопроводе ШФЛУ составил $3,6 \cdot 10^{-7}$ год $^{-1}$, что может быть признано удовлетворительным и не требует проведения каких-либо компенсационных мероприятий.

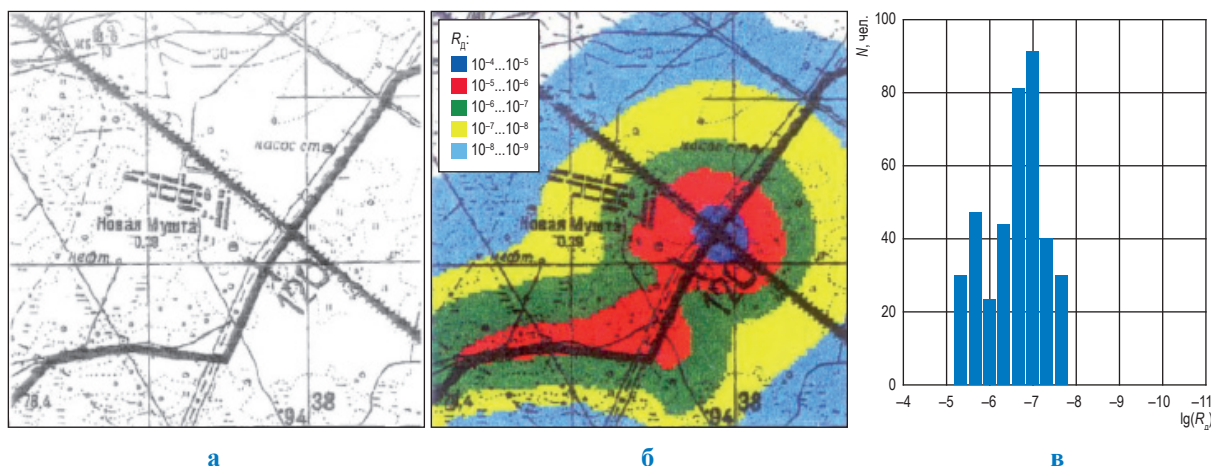


Рис. 10. Этапы расчета показателей риска аварий на трубопроводе ШФЛУ:
а – исходная легенда; б – общее поле потенциального риска;
в – гистограмма распределения людей в населенном пункте по уровням риска

Из полученных данных следует важный вывод о том, что реальные уровни риска для населения будут, при прочих равных условиях, существенно зависеть от ориентации относительно трассы и протяженности населенного пункта (при одинаковой плотности населения), а также от пространственного расположения

потенциальных источников зажигания. А это однозначно указывает на необходимость проведения расчетов и анализа риска только на реальной картографической основе для конкретных региональной инфраструктуры и метеорологических характеристик.

Список литературы

1. Сафонов В.С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В.С. Сафонов, Г.Э. Одишария, А.А. Швыряев. – М.: Минприроды РФ, 1996. – 208 с.
2. Сафонов В.С. Разработка научно-методических основ и практический анализ риска эксплуатации объектов газовой промышленности: дис. д.т.н. / В.С. Сафонов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 1997. – 798 с.
3. Сафонов В.С. Влияние технико-технологических и природно-климатических факторов на специфику развития аварий на трубопроводах, транспортирующих широкую фракцию легких углеводородов. Ч. I: Особенности протекания гидродинамических и тепломассообменных процессов при аварийных разрывах трубопроводов / В.С. Сафонов // Вести газовой науки: науч.-тех. сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2020. – № 1 (42): Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – С. 53–69.
4. Сафонов В.С. Влияние технико-технологических и природно-климатических факторов на специфику развития аварий на трубопроводах, транспортирующих широкую фракцию легких углеводородов. Ч. II: Возможные последствия аварийных выбросов из трубопроводов и методы их снижения / В.С. Сафонов // Вести газовой науки: науч.-тех. сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2020. – № 1 (42): Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – С. 70–83.
5. Сафонов В.С. О необходимости проведения анализа рисков при обосновании типа и конструктивных характеристик изотермических хранилищ для комплексов СПГ различного назначения / В.С. Сафонов // Вести газовой науки: науч.-тех. сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 1 (29): Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. – С. 154–170.

Methodical approaches to calculating risk indexes for operation of pipelines pumping natural gas liquids

V.S. Safonov

Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation
E-mail: V_Safonov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. Scheduling and analysis of the risk areal distribution which incorporates both the engineering specifics of the dangerous industrial facilities and the regional infrastructural, topographic and meteorological peculiarities are among the most important stages of a general emergency risk analysis procedure. At the same time, on practice the objective bottlenecks of this problem make one use numerous and not always reasonable simplifications considerably slanting a real level of danger native to a tested industrial facility. Accordingly, in this article following on from his earlier suggestions, author examines a general approach to plotting of spatial risk distributions and calculation of individual risk indexes for the in-line sources of explosion and fire hazards. It is a typical case of a pipeline used for transportation of the thermodynamically volatile liquefied hydrocarbon gases where with the accidental unsealing the extended vapor clouds generate and constitute a menace of knocking combustion.

Keywords: LNG pipelines, calculation of emergency risk indexes, areal distribution of potential risks, effect of technical-engineering and natural-environmental factors.

References

1. SAFONOV, V.S., G.E. ODISHARIYA, A.A. SHVYRYAYEV. *Theory and practice of risk analysis within the gas industry* [Teoriya i praktika analiza riska v gazovoy promyshlennosti]. Moscow: Minprirody of Russia, 1996. (Russ.).
2. SAFONOV, V.S. *Development of scientific and methodical principles and practical risk analysis for operation of gas industrial facilities* [Razrabotka nauchno-metodicheskikh osnov i prakticheskiy analiz riska ekspluatatsii obyektov gazovoy promyshlennosti]. Dr. Thesis (engineering). Moscow: VNIIGAZ, 1997. (Russ.).
3. SAFONOV, V.S. Impact of engineering and environmental-climatic factors to specifics of failures at pipelines transporting natural gas liquids. Pt. I: Peculiar hydrodynamic and heat-mass-exchange processes in case of a pipeline breakdown [Vliyaniye tekhniko-tekhnologicheskikh i prirodno-klimaticheskikh faktorov na spetsifiku razvitiya avariyn na truboprovodakh, transportiruyushchikh shirokuyu fraktsiyu legkikh uglevodorodov. Ch. I: Osobennosti protekaniya gidrodinamicheskikh i teplomassoobmennyykh protsessov pri avariynnykh razryvakh truboprovodov]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2020, no. 1(42): Improvement of reliability and safety at gas-industry facilities, pp. 53–69. ISSN 2306-8949. (Russ.).
4. SAFONOV, V.S. Impact of engineering and environmental-climatic factors to specifics of failures at the pipelines transporting natural gas liquids. Pt. II: Possible consequences of emergency discharge from pipelines. Ways to decrease probability and effects of an accident [Vliyaniye tekhniko-tekhnologicheskikh i prirodno-klimaticheskikh faktorov na spetsifiku razvitiya avariyn na truboprovodakh, transportiruyushchikh shirokuyu fraktsiyu legkikh uglevodorodov. Ch. II: Vozmozhnyye posledstviya avariynnykh vybrosov iz truboprovodov i metody ikh snizheniya]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2020, no. 1(42): Improvement of reliability and safety at gas-industry facilities, pp. 70–83. ISSN 2306-8949. (Russ.).
5. SAFONOV, V.S. On necessity of risk analysis at substantiation of types and design characteristics of isothermal storages for liquefied natural gas complexes of different destinations [O neobkhodimosti provedeniya analiza riskov pri obosnovanii tipa i konstruktivnykh kharakteristik izometricheskikh khranilishch dlya kompleksov SPG razlichnogo naznacheniya]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2017, no. 1(29): Improvement of reliability and safety at gas-industry facilities, pp. 154–170. ISSN 2306-8949. (Russ.).