

# НОВЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ АВАРИЙ БЕЗ ВОЗГОРАНИЯ ГАЗА НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

УДК 621.72:621.532.656.08

Ю.В. Гамера, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, РФ), Y\_Gamera@vniigaz.gazprom.ru

С.В. Овчаров, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Ю.Ю. Петрова, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

**Важным аспектом анализа риска аварий на объектах газотранспортной системы является определение зон поражения реципиентов осколками, избыточным давлением первичной и вторичной волн, напорным воздействием струи и тепловым излучением пожара. Из перечисленных поражающих факторов особая роль в силу своей специфики (неотвратимость и быстротечность) отводится осколочному и газодинамическому (ударно-волновому от первичной волны и струйному от высокоскоростной струи газа) воздействию. Указанные воздействия, которые реализуются на начальной стадии любой аварии, выступают в качестве основных поражающих факторов при авариях без возгорания. В статье отражены основные положения вновь разработанных методологических подходов к оценке вероятности осколочного и газодинамического поражения человека и объектов инфраструктуры при авариях на опасных производственных объектах магистрального транспорта газа. Представлены аналитические расчетные соотношения для определения размеров зон поражения. Показано, что при разгерметизации трубопроводов размеры зон смертельного поражения человека от импульсного воздействия струи существенно больше размера таковых от ударно-волнового воздействия.**

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ, АВАРИЯ БЕЗ ВОЗГОРАНИЯ ГАЗА, МАГИСТРАЛЬНЫЙ ГАЗОПРОВОД.

Как правило, при проведении анализа риска аварий на опасных производственных объектах (ОПО) магистральных газопроводов (МГ) основное внимание аналитики уделяют рассмотрению аварийных сценариев с возгоранием истекающего газа как наиболее опасных по своим негативным последствиям для людей, имущественных объектов и компонентов природной среды. Этим объясняется и тот трудно оспоримый факт, что в действующих нормативно-методических документах по анализу техногенного риска методическое обеспечение расчетного моделирования аварий на ОПО МГ сфокусировано по большей части именно на

«пожарных» сценариях, а степень полноты охвата, проработанности и верифицированности методов расчетов иных, «непожарных», вариантов реализации аварий значительно меньше. Между тем немалую долю аварий на ОПО МГ составляют аварии, развивающиеся по сценариям без возгорания газа. Указанные аварии характеризуются такими поражающими факторами (ПФ), как разлет осколков разрушенных труб, технологического оборудования, фрагментов грунта, напорное воздействие высокоскоростной струи истекающего газа и ударная воздушная волна, которые также могут приводить к немалым разрушительным последствиям

как на территории аварийного ОПО, так и за его пределами.

Настоящую работу можно рассматривать как своего рода заявку на усовершенствование основных методических положений действующих корпоративных стандартов [1, 2] по анализу техногенного риска аварий на ОПО газовой промышленности в части моделирования аварийных процессов, характеризующихся указанными выше ПФ. Фокусирование внимания авторов именно на данных ПФ обусловлено в немалой степени и особой их спецификой, проявляющейся в неотвратимости и быстротечности реализации осколочного и газодинамического (ударно-вол-

**Gamera Yu.V.**, Gazprom VNIIGAZ LLC (Moscow, RF), Y\_Gamera@vniigaz.gazprom.ru

**Ovcharov S.V.**, Gazprom VNIIGAZ LLC

**Petrova Yu.Yu.**, Gazprom VNIIGAZ LLC

### New methodological approaches to the assessment of effects of adverse factors of accidents without gas inflammation at hazardous industrial facilities of main gas pipelines

An important aspect of the analysis of accident risks at gas transport system facilities is the determination of damage areas where recipients are injured by shatters, excessive pressure of the first and second waves, pressure blast effect and fire radiation. From the above-mentioned adverse factors a special role, by virtue of its specific nature (inevitability and transiency), is assigned to a fragmentation and gasdynamic (a shock wave one from the first wave and a blast one from the high-speed gas jet) effect. The above-mentioned effects, which are realized at the initial stage of any accident, act as the main adverse factors in accidents without inflammation. The article presents the main provisions of newly developed methodological approaches to the assessment of possibilities of fragmentation and gasdynamic effects in accidents at hazardous production facilities of gas main pipelines. Analytical design ratios are presented to establish the sizes of damage areas. It is shown that when pipelines are depressurized, the sizes of human lethal areas (from an impulse action of the jet) are significantly larger than the ones from a shock wave effect.

**KEY WORDS:** EFFECT OF ADVERSE FACTORS, ACCIDENT WITHOUT GAS INFLAMMATION, GAS MAIN PIPELINE.

нового от первичной волны и струйного от вынужденно-конвективной струи) воздействий в момент разрушения той или иной технологической составляющей ОПО МГ, содержащей газ под давлением. Данная работа имела своей целью вывести аналитические расчетные соотношения для определения размеров зон потенциального поражения (ЗПП) и вероятности смертельного поражения человека от указанных ПФ.

Определение полей потенциального поражения при аварии без возгорания газа основывается на соотношении для определения вероятности несовместимых событий:

$$P_{\text{чел}}^{\text{об}}(x, y) = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_{\text{чел}}^i(x, y)), \quad (1)$$

где  $P_{\text{чел}}^{\text{об}}(x, y)$  – условная вероятность поражения человека в точке с координатами  $(x, y)$  при воздействии всех ПФ;  $P_{\text{чел}}^i(x, y)$  – условная вероятность поражения человека  $i$ -м ПФ (в порядке возрастания индекса  $i$ : осколочным, барическим, напорным воздействием нерасчетной струи газа).

Изолинии условных вероятностей осколочного и барического воздействия ( $i = 1, 2$ ) являются окружностями, поскольку распространение соответствующих ПФ происходит центрально-сим-

метрично относительно места разгерметизации. Напорное воздействие обладает осевой симметрией относительно оси струи и зависит от вида струи (настильная или свободно распространяющаяся). Данный факт отражен в уравнении (2), описывающем вычисление условной вероятности поражения напорным воздействием:

$$P_{\text{чел}}^s(x, y) = P_s \left[ P_{s-n} \int_{-\pi}^{\pi} p(\alpha) P_{\text{чел}}^{\text{н.с.}}(x, y, \alpha) d\alpha + (1 - P_{s-n}) \int_{-\pi}^{\pi} p(\alpha) P_{\text{чел}}^{\text{с.с.}}(x, y, \alpha) d\alpha \right], \quad (2)$$

где  $P_s$  – условная вероятность образования сверхзвуковой струи газа при аварии;  $P_{s-n}$  – условная вероятность того, что образовавшаяся струя будет настильной;  $P_{\text{чел}}^{\text{н.с.}}(x, y, \alpha)$  и  $P_{\text{чел}}^{\text{с.с.}}(x, y, \alpha)$  – условные вероятности поражения человека, соответственно, настильной или свободно распространяющейся под углом  $\alpha$  к оси газопровода сверхзвуковой струей газа;  $p(\alpha)$  – плотность вероятности отклонения оси струи от оси газопровода на угол  $\alpha$  в горизонтальной плоскости.

Для вычисления каждой составляющей  $P_{\text{чел}}^i(x, y)$ , а в случае напорного воздействия – также и для вероятностей  $P_{\text{чел}}^{\text{н.с.}}(x, y, \alpha)$ ,  $P_{\text{чел}}^{\text{с.с.}}(x, y, \alpha)$ , применяется отдельная методика.

### ОСКОЛОЧНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Методика для вычисления полей поражения от осколочного воздействия [3] базируется на исследовании закономерностей разлета осколков. Такие закономерности вытекают из системы уравнений, описывающей движение осколка с учетом сопротивления воздуха:

$$\begin{aligned} \frac{dV_1(t)}{dt} &= AV_1(t) \sqrt{V_1^2(t) + V_2^2(t)}, \quad (3) \\ \frac{dV_2(t)}{dt} &= AV_2(t) \sqrt{V_1^2(t) + V_2^2(t)} - g, \\ A &= \frac{C_x S_{\text{ср}} \rho_a}{2m}, \end{aligned}$$

где  $V_1(t)$  и  $V_2(t)$  – проекции скорости осколка на горизонтальную и вертикальную оси;  $m$ ,  $S_{\text{ср}}$ ,  $C_x$  – масса, площадь миделя и коэффициент сопротивления осколка;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Возможность вращения осколков в приведенной системе учитывается только использованием в уравнениях средней площади осколков и эффективного значения коэффициента сопротивления. При этом принято, что  $S_{\text{ср}}$  вычисляется как среднегеометрическое по сечениям осколков в трех плоскостях, а коэффициент сопротивления равен 2 (соответствует приведенным в литературных источниках коэффициентам сопротивления плохо обтекаемых

тел). Приведенная система уравнений во всех известных авторам исследования решалась путем численного интегрирования методом Рунге – Кутты, что существенно затрудняло получение определяющих зависимостей. Найденный для системы (3) инвариант движения [3] позволил аналитически описать закономерности разлета осколков и, как следствие, определить вероятность осколочного поражения человека при разлете  $n$  осколков –  $P_{\text{чел}}^{1,(n)}(R)$  как функцию расстояния от аварийного источника:

$$P_{\text{чел}}^{1,(n)}(R) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{чел}}^1(R, W_i)P(W_i)) \approx \sum_{i=1}^n P_{\text{чел}}^1(R, W_i)P(W_i); \quad (4)$$

$$P_{1,\text{чел}}^1(R, W) = P_{1,\text{чел}}^1(R, W) + P_{2,\text{чел}}^1(R, W) - P_{1,\text{чел}}^1(R, W)P_{2,\text{чел}}^1(R, W); R \leq R_{\text{max}}(W),$$

$$P_{1,\text{чел}}^1(R, W) = \frac{2B(R/R_{\text{max}})}{\pi R/R_{\text{max}}} \left( \frac{r}{R_{\text{max}}} + G(W) \right) \times \left( \frac{l}{2R_{\text{max}}} + G(W) \right);$$

$$P_{2,\text{чел}}^1(R, W) = \frac{1}{\pi} \left( \frac{0,15}{R_{\text{max}}} + G(W) \right) \frac{R_{\text{max}}}{R} \times \left( \frac{\bar{L}}{\sqrt{\bar{L}^2 + (R/R_{\text{max}})^2}} \right) \left( 1 - \frac{R}{R_{\text{max}}\sqrt{\bar{L}(1-\bar{L})}} \right);$$

$$R_{\text{max}}(W) = \frac{[cM_{\text{оск}}]^2}{g} \cdot \frac{3W^{0,87}}{3W^{0,87} + 2};$$

$$\bar{L} = \frac{l}{R_{\text{max}}} + \frac{1}{2}G(W);$$

$$G(W) = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{об}}} \left[ W + \frac{2}{3}W^{0,13} \right] = \frac{\sqrt{S_{\text{сп}}}}{R_{\text{max}}};$$

$$W = \frac{2mg}{C_x S_{\text{сп}} \rho_a c^2} \{M_{\text{оск}}\}^{-2};$$

$$B(x) = \frac{\Gamma(2,1)}{\Gamma(1,5) \cdot \Gamma(0,6)} \cdot \sqrt{x} (1-x)^{-0,4},$$

где  $W$  – параметр осколка;  $R$  – расстояние от аварийного элемента, м;  $R_{\text{max}}(W)$  – максимальная дальность полета осколка с параметром  $W$ , м;  $l$  и  $r$  – высота и радиус цилиндра, моделирующего человека, м;  $c$  – скорость звука в воздухе, м/с;  $\rho_a$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{об}}$  – плотность осколка, кг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{оск}}$  – число Маха осколка (определяется по моделям [1, 4, 5]);  $\Gamma(x)$  – гамма-функция;  $P_{\text{чел}}^1(R, W)$  – условная вероятность поражения человека, находящегося на

расстоянии  $R$ ,  $i$ -м осколком с параметром  $W_i$ ;  $P(W_i)$  – условная вероятность того, что при разрушении аварийного элемента будет образован осколок с параметром  $W_i$ ;  $P_{1,\text{чел}}^1(R, W)$  и  $P_{2,\text{чел}}^1(R, W)$  – условные вероятности поражения человека, находящегося на расстоянии  $R$  от аварийного элемента, единичным осколком с параметром  $W$ , соответственно, на излете (прямое попадание) и при приземлении по навесной траектории («минометное» попадание).

На рис. 1 приведен пример расчета распределения условной вероятности поражения человека типичным осколком ( $W = 10$ ) при разрыве подземного трубопровода. Из рисунка видно, что в зоне поражения по навесной траектории (правее точки  $S$ ) условная вероятность поражения остается приблизительно одинаковой, имеющей весьма малое значение – примерно  $2,3 \cdot 10^{-5}$ , совпадающее со значением в точке  $S$ . В области прямого попадания (на рисунке практически совпадающие красная и черная линия левее точки  $S$ ) вероятность резко возрастает. Данное обстоятельство позво-

ляет предложить использование  $R_S$  в качестве безопасного, с точки зрения осколочного поражения, удаления. Соответственно, критерием для определения  $R_S$  будет служить соотношение (5):

$$P_{1,\text{чел}}^1(R_S, W) = P_{2,\text{чел}}^1(R_S, W). \quad (5)$$

В приведенном примере  $R_{\text{max}} = 234$  м, а  $R_S = 21$  м. Таким образом, ЗПП для человека от осколочного воздействия на порядок меньше ожидаемого максимального радиуса разлета осколков.

### БАРИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

В основе расчета ЗПП от барического воздействия воздушной ударной волны (ВУВ) физического взрыва (при физическом взрыве ВУВ формируется за счет высвобождения потенциальной энергии сжатого газа) лежат хорошо известные экспериментальные соотношения для параметров ВУВ [6], приведенные ниже:

$$\Delta p(R) = 10^3 \left( \frac{154}{R_0^{4/3}} + \frac{94}{R_0^2} + \frac{34}{R_0^3} \right);$$

$$l(R) = \frac{103m_{\text{ТНТ}}^{1/3}}{R_0^{0,915}}; R_0 = \frac{R}{m_{\text{ТНТ}}^{1/3}}, \quad (6)$$

где  $\Delta p$  – избыточное давление во фронте ВУВ, Па;  $l$  – импульс ВУВ, Па·с;  $m_{\text{ТНТ}}$  – тротильный эквива-

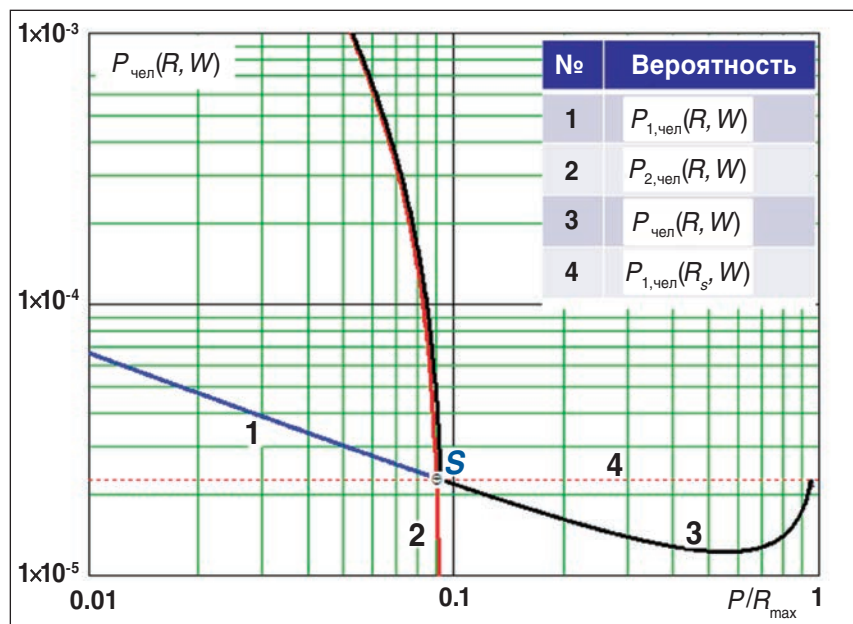


Рис. 1. Условная вероятность и ее составные части для поражения человека осколком массой 500 кг и начальной скоростью 50 м/с

лент физического взрыва, кг ТНТ;  $R$  – удаление от места аварии, м.

Предварительным этапом расчетов по (6) является вычисление тротиловых эквивалентов физического взрыва  $m_{\text{ТНТ}}$  при гильотинном разрыве трубопровода и полном разрушении сосуда со сжатым газом. Соотношения для вычисления  $m_{\text{ТНТ}}$  получены в [7] и имеют вид:

- для гильотинного разрыва трубопровода

$$m_{\text{ТНТ}} = 6,05 \cdot 10^{-2} \left[ d_0 \sqrt{k_0 \frac{\rho_{g0}}{\rho_0}} \right]^3, \text{ кг ТНТ};$$

$$k_0 = \min \left( 0,5 \left( 8,2 \frac{\bar{L}}{d_0} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{g0}}} + 1 \right), 1 \right), \quad (7)$$

- для полного разрушения сосуда

$$m_{\text{ТНТ}} = 1,19 \cdot 10^{-1} \cdot V_0 \frac{\rho_{g0}}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{g0}}{\rho_0} \right)^{-2,7} \right], \quad (8)$$

где  $d_0$  – диаметр трубопровода, м;  $\rho_{g0}$  – давление сжатого газа, Па;  $\rho_0$  – атмосферное давление, Па;  $V_0$  – объем сосуда, м<sup>3</sup>;  $\bar{L}$  – расстояние от места аварии до места локального завершения газопровода, м (рас-

положения кранового узла, другого аппарата, поворота на 90°).

Соотношения (6)–(8) позволяют вычислить размеры ЗПП с использованием детерминированного подхода Руководства по безопасности (РБ) [8]. В соответствии с указанным подходом безопасным считается расстояние  $R_Б$ , на котором избыточное давление на фронте ВУВ составляет  $\Delta p (R_Б) = 5$  кПа, а зоной гибели с внешним радиусом  $R_Г$  считается зона, в которой  $\Delta p (R) \geq \Delta p (R_Г) = 120$  кПа. Тогда по (6):

$$R_Б = 14,112 m_{\text{ТНТ}}^{1/3}, R_Г = 1,659 m_{\text{ТНТ}}^{1/3}. \quad (9)$$

Совместно с (7) и (8) соотношение (9) позволяет найти  $R_Б$  и  $R_Г$  в каждом конкретном случае.

Для определения зон поражения человека ударно-волновым воздействием помимо детерминированного подхода применяется и вероятностный подход, изложенный в Федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности (ФНП) [9].

Суть указанного подхода состоит в том, что вероятность поражения человека вычисляется по пробит-функции:

$$P_{\text{чел}}(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (10)$$

где Pr – значение пробит-функции.

В нормативно-методической литературе по промышленной безопасности используется целый набор пробит-функций для описания вероятности реализации той или иной степени поражения человека, попавшего в зону действия ВУВ. Так, в ФНП [9] в качестве степеней поражения рассмотрены потеря управляемости у людей, разрыв барабанных перепонок и смертельное поражение за счет удара тела о землю или преграду при отбросе. В дополнение к перечисленным здесь видам поражений в монографии [10] рассмотрено и смертельное поражение человека в результате разрыва легких.

На рис. 2 представлены результаты расчета по пробит-функциям [9, 10] круговых зон барического поражения человека в случае аварии с полной разгерметизацией технологического оборудования или трубопроводов в зависимости от кубического корня из тротилового эквивалента физического взрыва. Из рисунка видно, что при тротиловом эквиваленте до 0,5 т ТНТ зона барического поражения не превышает 38 м. Гильотинному разрыву трубопровода с рабочим давлением 7,5 МПа и внутренним диаметром 1 м соответствует тротиловый эквивалент 39,3 кг ТНТ (на рис. 2 – вертикальная линия  $T_x$ ). При таком тротиловом эквиваленте радиус зоны барического поражения человека не превышает 17 м, а смертельного – 6 м. Нанесенная на рисунок линия, соответствующая 5 кПа (сплошная линия без точек), показывает, что с точки зрения возможности гибели человека от барического воздействия критерий РБ [8] в 5 кПа приемлем 1,1.

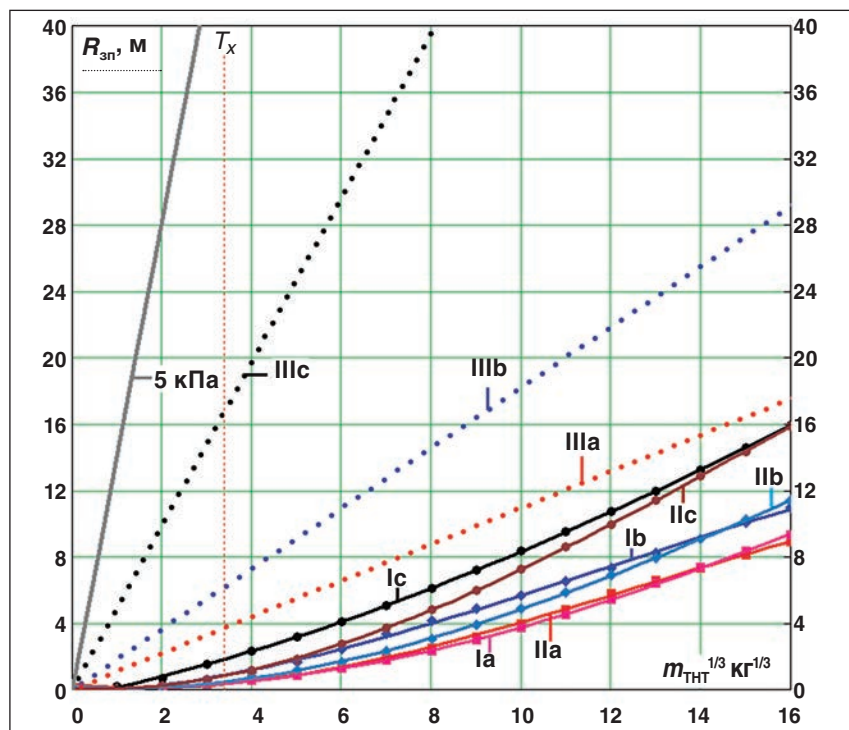


Рис. 2. Зависимость радиуса круговой зоны барического поражения человека ВУВ –  $R_{зп}$  физического взрыва от кубического корня из величины тротилового эквивалента  $m_{\text{ТНТ}}^{1/3}$ .

I – смертельное поражение человека при отбросе; II – смертельное поражение человека в результате разрыва легких; III – разрыв барабанных перепонок. Вероятность поражения: а – 90 %; б – 50 %; с – 1 %

### НАПОРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СТРУИ ГАЗА

Методика расчета напорного (динамического) воздействия высокоскоростной струи газа на человека основывается на закономерностях гидродинамического течения первоначально сильно сжатого газа. Возникающая при таком течении струя изначально является сверхзвуковой. Ее структура существенно отличается от таковой для дозвуковых струй тем, что помимо дозвукового переходного и основного участка включает (рис. 3) звуковой участок со звуковым ядром, дозвуковым пограничным слоем и сверхзвуковым переходным участком.

В случае если струя не подвержена искусственным турбулизирующим воздействиям, наличием дозвукового переходного участка можно пренебречь, считая, что за звуковым сечением вниз по потоку поперечные профили скорости являются автомодельными и удовлетворительно описываются уравнением Шлихтинга, границы струи являются линейными, а полный импульс струи постоянен для любого сечения. При таких предположениях на основном участке распределения импульса вдоль и поперек оси струи всецело определяются значением полного импульса, а динамическое воздействие на человека сходно с воздействием ветровых нагрузок. Критерием поражения при этом будет отрыв человека от поверхности с последующим разгоном и возможностью смертельного поражения за счет удара тела о землю или преграду при отбросе. Аналитические зависимости для определения возможности смертельного поражения человека напорным воздействием струи были получены в [11] и сводятся к вычислению вероятности по формуле (10) с использованием пробит-функции, приведенной в [10]:

$$Pr = -2,14 + 2,54 \ln(U_{\max}), \quad (11)$$

где максимальная скорость разгона оторванного от поверхности земли тела человека  $U_{\max}$  (м/с) в зависимости от его удаленности по оси от места разрыва  $L_0$  (м) вычисляется по формулам:

$$U_{\max} = c [1,5 \sqrt{b} (Ab(L_0 - L_{зв}) + 1)]^{4/3} \geq \bar{U}_{\max 0} = 4,81 [Ab]^{-1/3};$$

$$A = \frac{C_x \rho_a F}{m_{чел}}; \quad b = \frac{5,67 C}{A D_{зв}}; \quad (12)$$

$$L_{зв} = 9,5 \Omega d_0 \left( J - \frac{1,05}{J^{2,7}} \right);$$

$$D_{зв} = 2,72 d_0 \sqrt{\frac{J^2 + n - 1}{k}};$$

$$J = \sqrt{kn}; \quad n = \frac{\rho_{g0}}{\rho_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2k}{k-1}},$$

где  $C_x$ ,  $F$ ,  $m_{чел}$  – аэродинамический коэффициент сопротивления, максимальная площадь сечения (м<sup>2</sup>) и масса (кг) тела человека;  $C = 0,0635$  – коэффициент турбулентности потока;  $L_{зв}$  – длина звукового участка, м;  $D_{зв}$  – диаметр звукового участка, м;  $\Omega$  – коэффициент струи (для

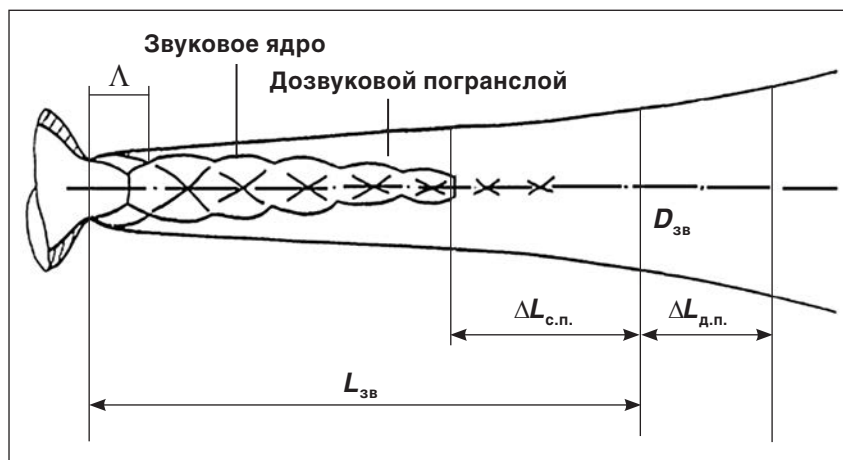


Рис. 3. Структура сверхзвуковой струи:  $L_{зв}$  и  $D_{зв}$  – длина и диаметр звукового участка;  $\Delta L_{с.п.}$  – длина сверхзвукового переходного участка;  $\Delta L_{д.п.}$  – длина дозвукового переходного участка;  $\Lambda$  – ударно-волновые бочки

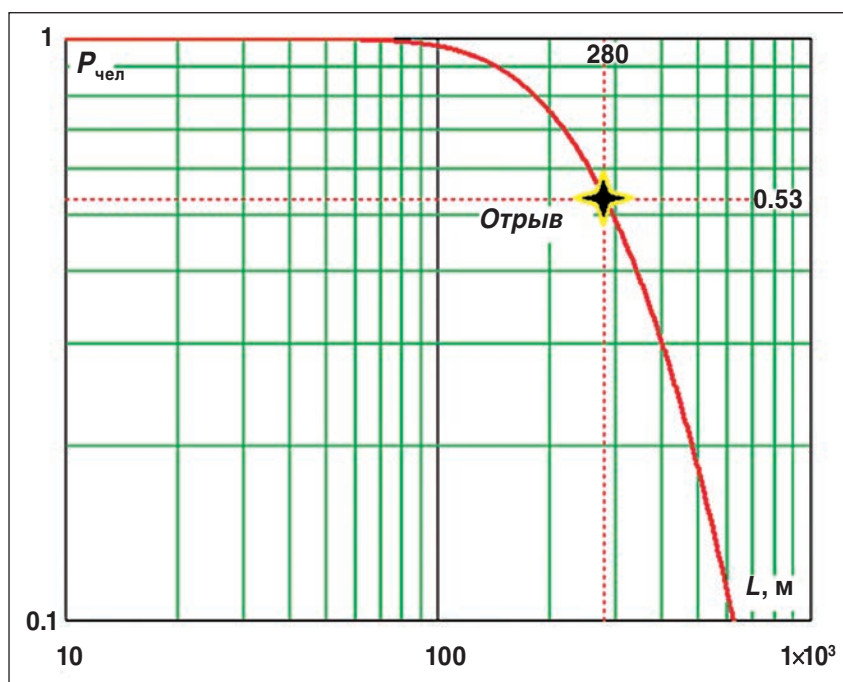


Рис. 4. Зависимость вероятности гибели человека  $P_{чел}$  от удаленности от места разрыва

Таблица 1. Размеры зон разрушения промышленных зданий от барического и напорного воздействия

Степень повреждения	Тип оборудования	Размер зон разрушения	
		от воздействия ВУВ физического взрыва, м	от напорного воздействия струи газа, м
Слабое повреждение	Газопровод	$1,23 \cdot 10^{-1} \cdot F_1(\rho_0, d_0)$	$50,17 \cdot F_3(\rho_0, d_0)$
	Сосуд	$1,97 \cdot 10^{-1} \cdot F_2(\rho_0, V_0)$	
Среднее повреждение	Газопровод	$4,39 \cdot 10^{-2} \cdot F_1(\rho_0, d_0)$	$37,84 \cdot F_3(\rho_0, d_0)$
	Сосуд	$7,04 \cdot 10^{-2} \cdot F_2(\rho_0, V_0)$	
Сильное повреждение	Газопровод	$2,51 \cdot 10^{-2} \cdot F_1(\rho_0, d_0)$	$28,02 \cdot F_3(\rho_0, d_0)$
	Сосуд	$4,03 \cdot 10^{-2} \cdot F_2(\rho_0, V_0)$	

$F_1(\rho_0, d_0) = (d_0 \sqrt{\rho_0})^{2,093}$ ;  $F_2(\rho_0, V_0) = \{V_0 \rho_0 [1 - \rho_0^{-\frac{2}{7}}]\}^{0,698}$ ;  $F_3(\rho_0, V_0) = d_0 \sqrt{\rho_0}$ ;  $\rho_0 = \frac{\rho_{g0}}{\rho_0}$

Таблица 2. Определение границ зон потенциального поражения человека на открытой площадке

№	Тип воздействия	Критерий безопасного расстояния	Расчетная формула
1	Осколочное	Превалирование прямого попадания осколка	$P_{1,чел}(\Delta R, W) = P_{2,чел}(\Delta R, W)$
2	Ударно-волновое от физического взрыва сосуда	Давление во фронте ВУВ 5 кПа	$4,87 \sqrt[3]{V_0 \rho_0 [1 - \rho_0^{-\frac{2}{7}}]}$
3	Ударно-волновое от физического взрыва на трубопроводе	Давление во фронте ВУВ 5 кПа	$5,54 d_0 \sqrt{\rho_0}$
4	Напорное от свободно распространяющейся струи газа	Отрыв человека напорным воздействием	$37,2 d_0 \sqrt{\rho_0}$
5	Напорное от настильной струи газа	Отрыв человека напорным воздействием	$44,6 d_0 \sqrt{\rho_0}$
6	Термическое от излучения струевого пламени	Вероятность гибели человека 1 % (без спецодежды)	$5,54 d_0 \sqrt{\rho_0}$
7	Термическое от пожара в котловане	Вероятность гибели человека 1 % (без спецодежды)	$57,58 (d_0 \sqrt{\rho_0})^{1,01}$

настильной  $\Omega = 1,2$ , для свободной  $\Omega = 1$ );  $k \approx 1,4$  – показатель адиабаты.

В (12) условие  $U_{max} \geq \bar{U}_{max0}$  описывает отрыв тела человека от поверхности. Очевидно, что при записи в виде равенства указанное условие является критерием безопасного удаления.

В качестве иллюстрации применения схемы (10)–(12) на рис. 4 приведены результаты расчетов условной вероятности гибели

человека, находящегося на оси свободной струи при разрыве трубопровода с условным диаметром DN1000, с рабочим давлением 7,5 МПа. Из рисунка видно, что безопасное удаление в описанном случае составляет 280 м. При этом вероятность гибели человека, находящегося на данном расстоянии от места разрыва трубопровода, равна 0,53.

Все вышеизложенное относилось к людям, пребывающим на

открытой площадке. Для людей в помещении вероятность гибели определяется вероятностью разрушения здания. В табл. 1 приведены рассчитанные по [11, 12] степени повреждения промышленных зданий от газодинамических течений в зависимости от параметров аварийного элемента. Условно можно считать, что при сильном повреждении здания человек гибнет с вероятностью 0,7.

И в заключение хотелось бы представить сводную табл. 2 из формул (3-й столбец) для расчета безопасных расстояний при различных видах воздействий (2-й столбец), полученную в результате исследований на основе представленных моделей (строки 1–5) и имеющихся данных по термическому поражению (строки 6–7).

Анализируя табл. 2, необходимо заметить, что, хотя по абсолютным значениям размеры зоны поражения от термического излучения (строка 6) и превышают размеры зоны поражения от напорного воздействия настильной струи (строка 5), вероятность поражения в первом случае соответствует 0,01 для людей без спецодежды, а во втором случае на линии отрыва человека от земли напорным воздействием струи вероятность гибели может составлять 0,5 и более. То есть в определенных ситуациях напорное воз-

действие настильной струи может являться самым опасным ПФ.

Таким образом, в работе представлены аналитические модели для расчета поражения человека осколочным, барическим (от физического взрыва) и напорным (от высокоскоростной струи газа) воздействиями при авариях

на объектах трубопроводного транспорта газа. Показано, что при авариях без возгорания на технологических газопроводах доминирующим поражающим фактором является напорное (динамическое) воздействие высокоскоростной струи газа, в связи с чем для выполнения тре-

бований взрывобезопасности, изложенных в подп. 10.4 ФНП [9], расчет устойчивости зданий с постоянным пребыванием людей нужно проводить не только по избыточному давлению физического взрыва, но и по динамическому давлению струи газа. ■

## ЛИТЕРАТУРА

1. СТО Газпром 2-2.3-351–2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». М.: Газпром экспо, 2009. 377 с.
2. СТО Газпром 2-2.3-400–2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром». М.: Газпром экспо, 2009. 362 с.
3. Гамера Ю.В., Петрова Ю.Ю. Экспресс-метод оценки осколочного поражения при аварийной разгерметизации оборудования и трубопроводов со сжатым газом // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 4. С. 71–76.
4. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. / Пер. с англ. Я.Б. Зельдовича и Б.Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986.
5. Бирбрадер А.Н., Роleder А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2009. 594 с.
6. Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фортов В.Е. Энергетические характеристики взрыва и параметры ударных волн в воздухе при детонации водородсодержащих облаков в свободной атмосфере. Черногоровка: Изд-во ИХФЧ РАН, 1995. 85 с.
7. Гамера Ю.В., Овчаров С.В. Модель образования и распространения первичной воздушной волны при аварии оборудования, находящегося под высоким давлением // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 12. С. 74–78.
8. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (утв. Приказом Ростехнадзора от 11 апреля 2016 г. № 144).
9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. Сер. 09. Вып. 37. 126 с.
10. Lees' Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Vol. 2, 3rd ed. Ed. by Sam Mannan. Amsterdam, Elsevier Inc., 2005, 1015 p.
11. Гамера Ю.В., Овчаров С.В., Петрова Ю.Ю. Расчетная модель определения зон поражения от динамического воздействия высокоскоростной струи газа // Газовая промышленность. 2014. № 712. (Спецвып. «Промышленная безопасность и противопожарная защита объектов газовой промышленности») С. 39–43.
12. Гамера Ю.В., Овчаров С.В., Рыбаков А.В. К вопросу оценки устойчивости зданий к барическим воздействиям // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 7. С. 73–77.
13. Сафонов В.С., Мельников А.В., Чупин А.И. и др. Экспресс-методика оценки размеров зон потенциального поражения людей при авариях на газопроводах // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 2. С. 66–69.

## REFERENCES

1. Gazprom Company Standard 2-2.3-351–2009. Methodological Instructions on Carrying out an Analysis of Risks at Hazardous Production Facilities of Gas Transport Enterprises of Gazprom OJSC. Moscow, Gazprom Expo, 2009, 377 p. (In Russian)
2. Gazprom Company Standard 2-2.3-400–2009. Method for Analyzing Risks at Hazardous Production Facilities of Gas Transport Enterprises of Gazprom OJSC. Moscow, Gazprom Expo, 2009, 362 p. (In Russian)
3. Gamera Yu.V., Petrova Yu.Yu. Rapid Method for Assessing a Fragmentation Effect in Cases of Emergency Depressurization of Equipment and Pipelines with Pressure Gas. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Labor Safety in the Industry*, 2016, No. 4, P. 71–76. (In Russian)
4. Baker W., Cox P., Westine P., et al. *Explosion Hazards and Evaluation: in 2 Books*. Translated from English by Ya.B. Zeldovich and B.E. Gelfand. Moscow, Mir, 1986. (In Russian)
5. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. *Extreme Effects on Constructions*. Saint Petersburg, Polytechnic University's Publishing House, 2009, 594 p. (In Russian)
6. Adushkin V.V., Gostintsev Yu.A., Fortov V.E. *Energy Characteristics of Explosion and Parameters of Shock Waves in the Air when Detonating Hydrogen-Containing Clouds in the Free Atmosphere*. Chernogolovka, Publishing House of Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 1995, 85 p. (In Russian)
7. Gamera Yu.V., Ovcharov S.V. Model of Formation and Distribution of the First Air Wave in Accidents with High-Voltage Equipment. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Labor Safety in the Industry*, 2012, No. 12, P. 74–78. (In Russian)
8. Safety Guide "Methodological Fundamentals of Carrying out an Analysis of Dangers and Risks of Accidents at Hazardous Production Facilities" (Approved by Decree of Rostekhnadzor as of April 11, 2016 No. 144). (In Russian)
9. Federal Rules and Regulations in Industrial Safety "General Rules of Explosion Safety for Explosive and Flammable Chemical, Petrochemical and Petroleum Refineries". Moscow, Research and Development Center of Industrial Safety Problems Study CJSC, 2013, Series 09, Issue 37, 126 p. (In Russian)
10. Lees' Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Vol. 2, 3rd ed. Ed. by Sam Mannan. Amsterdam, Elsevier Inc., 2005, 1015 p.
11. Gamera Yu.V., Ovcharov S.V., Petrova Yu.Yu. Design Model for Establishing Danger Areas of a Dynamic Effect of the High-Speed Gas Jet. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*, 2014, No. 712, Special Issue "Industrial Safety and Fire Protection of Gas Industry Facilities", P. 39–43. (In Russian)
12. Gamera Yu.V., Ovcharov S.V., Rybakov A.V. The Question of Assessing Buildings' Resistance to Baric Effects. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Labor Safety in the Industry*, 2013, No. 7, P. 73–77. (In Russian)
13. Safonov V.S., Melnikov A.V., Chupin A.I., et al. Rapid Method for Assessing the Sizes of Potential Human Danger Areas in Accidents at Gas Pipelines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Labor Safety in the Industry*, 2009, No. 2, P. 66–69. (In Russian)