

УДК 331.461

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2018

Оценка риска аварийного истечения газа из газопровода при аномальных метеоусловиях Севера

М.И. Захарова,

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Аннотация

Низкие температуры и аномальные метеоусловия Севера оказывают существенное влияние как на частоту аварий, так и на развитие аварий. Аномальные метеорологические условия Севера характеризуются мощными температурными инверсиями, возникающими при антициклоне за счет излучения вечномерзлого грунта при экстремально низких температурах окружающего воздуха, и условиями застоя воздуха. Эти аномальные условия влияют на процесс рассеивания газа в атмосфере, способствуя его замедлению и образованию взрывоопасных концентраций газа у поверхности земли. В результате возрастает опасность аварий газопроводов, происходящих по сценарию — истечение газа без последующего воспламенения. Образовавшееся скопление взрывоопасных концентраций газа у земли в дальнейшем может привести к взрыву и пожару.

В статье представлен методический подход к оценке риска аварийного истечения газа из газопровода при аномальных метеоусловиях Севера. Разработано «дерево событий» истечения газа из газопровода при низких температурах окружающей среды с учетом аномальных метеоусловий. Оценены частоты реализации аварийных сценариев при истечении газа из газопровода, предназначенные для количественной оценки риска аварий газопроводов при низких температурах окружающей среды. Обосновано влияние температурной инверсии на величину избыточного давления ударной волны при взрыве облака газозвушной смеси метана и увеличение дальности действия поражающих факторов при аварии газопровода.

Ключевые слова: анализ риска, истечение газа, температурная инверсия, рассеивание, частота аварийных сценариев, ударные волны.

Содержание

Введение

1. Основные причины аварий газопроводов с истечением газа. Образование взрывоопасного облака газозвушной смеси метана при аномальных метеоусловиях Севера
2. Опасные метеорологические условия и их влияние на скопление газа у поверхности земли
3. Оценка вероятностей появления опасных метеорологических условий и вероятности образования облака ГВС метана в открытой местности
4. Оценка риска аварийного истечения газа из газопровода при низких температурах окружающей среды
5. Влияние температурной инверсии на величину избыточного давления ударной волны при взрыве облака ГВС метана в открытой местности

Заключение

Литература

Введение

В настоящее время безопасность в природно-техногенной сфере является важнейшей проблемой во всем мире. Магистральные газопроводы являются источником повышенной опасности из-за большого количества сварных и фланцевых соединений, запорной и регулирующей арматуры, жестких условий работы с высоким уровнем внутренних напряжений, испытываемых постоянно в течение все-

го срока службы, и значительных объемов веществ, перемещаемых по ним. Поэтому даже относительно незначительное отклонение фактических условий эксплуатации от принятых в проектных расчетах могут привести к разрушению газопровода и выбросу значительного количества опасных веществ.

Распространение выбросов опасных веществ в атмосфере и их воздействие на людей и окружающую среду — важные факторы, определяющие тяжесть последствий аварий на магистральных газопроводах. Следовательно, решение задач, связанных с предупреждением возможных аварийных ситуаций и минимизацией технологических и экологических рисков, при широкомасштабном строительстве и модернизации объектов трубопроводного транспорта и дальнейшем транспортном освоении труднодоступных районов Крайнего Севера, Арктических зон России приобретает все большее значение.

Анализ риска — новое научное направление, представляет собой один из существенных компонентов обеспечения безопасности и проводится для выявления отдельных источников опасности и оценки их потенциального влияния на возможные ущербы, которые могут быть причинены населению, окружающей среде и хозяйственным объектам. Неконтролируемое развитие аварийных ситуаций на магистральных газопроводах, эксплуатирующихся в экстремальных природно-климатических и метеорологических условиях Севера, значительно осложняющих эксплуатацию объектов со взрыво- и пожароопасными веществами, может привести к значительным разрушениям и к гибели людей, а также к необратимым последствиям в окружающей природной среде.

Определенный интерес представляет оценка риска аварийного истечения газа из газопровода при аномальных метеоусловиях Севера.

Низкие температуры и аномальные метеоусловия Севера оказывают существенное влияние как на частоту аварий, так и на процессы развития аварий.

Аномальные метеорологические условия Севера характеризуются мощными температурными инверсиями, возникающими при антициклоне за счет излучения вечномерзлого грунта при экстремально низких температурах окружающего воздуха, и условиями застоя воздуха. Мощные температурные инверсии в сочетании с условиями застоя воздуха влияют на процесс рассеивания газа в атмосфере, способствуя его замедлению и образованию взры-

воопасных концентраций газа у поверхности земли, что приводит к возрастанию опасности от аварий газопроводов в условиях Севера.

1. Основные причины аварий газопроводов с истечением газа. Образование взрывоопасного облака газозвушной смеси метана при аномальных метеоусловиях Севера

На долю магистральных газопроводов (МГ) приходится подавляющее число крупных аварий и отказов во всей газовой промышленности. Линейная часть трубопроводов является потенциально опасным объектом и обладает огромным энергетическим потенциалом, способным оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду (до нескольких сот метров). Причиной взрыва газопровода в основном является разрыв газопровода. Поражающими (опасными) факторами аварийного разрушения магистрального газопровода являются тепловой поток и барическое воздействие.

По результатам анализа аварий газопроводов при низких температурах [1] установлены их основные причины и вероятности P возникновения: трещина в газопроводе — $P = 0,09$, коррозия — $0,27$, износ трубы — $0,18$, деформации трубы в результате усталости металла и перепада температур — $0,09$, отказ задвижки — $0,14$, повреждение трубы — $0,14$.

Начальная стадия аварий на МГ характеризуется истечением больших объемов сжатого природного газа из разрушенного участка трубы в атмосферу.

Для инженерной оценки массового расхода газа при разрыве трубопровода используем методический подход, базирующийся на системе уравнений Белла [2, 3]:

$$\begin{cases} G(r, d_{eqv}) = \frac{F \cdot G_0(d_{eqv})}{1 + \eta} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\eta^2 \cdot \varepsilon}\right) + \eta \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon}\right) \\ G_0(d_{eqv}) = \frac{\pi \cdot d_{eqv}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_0^2}{R \cdot Z_{cr} \cdot T_0}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}; \eta = \frac{M_g}{\varepsilon \cdot F \cdot G_0(d_{eqv})} \\ M_g = \frac{L_y \cdot S_p \cdot P_0}{R \cdot Z_0 \cdot T_0}; \varepsilon = \frac{2}{3} \cdot \frac{L_y}{a_0} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot f_{fr} \cdot L_y}{D_{in}}}; a_0 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot Z_0 \cdot T_0} \end{cases} \quad (1)$$

где G , G_0 — соответственно текущий и начальный массовый расход газа (в момент разрыва), кг/с; τ — текущее время истечения газа, с; F — фактор инерционной задержки; η — коэффициент сохранения

массы; ε — постоянная времени, с; p_0 — давление газа в трубопроводе до разрыва, Па; d_{eqv} — эквивалентный диаметр отверстия, м; R — газовая постоянная, Дж/кг·К; T_0 — температура газа в трубопроводе до разрыва, К; Z_{cr} — коэффициент сжимаемости газа по условиям на срезе аварийного разрыва при p_{cr} и T_{cr} ; γ — показатель адиабаты; M_g — общая масса газа, способная вытечь из отсеченного аварийного участка трубопровода, кг; L_y — длина отсеченного участка трубопровода, м; a_0 — скорость звука в газе до разрыва, м/с; f_{fr} — коэффициент трения газа о стенки трубы; D_{in} — внутренний диаметр трубы, м; Z_0 — коэффициент сжимаемости газа до разрыва при p_0 и T_0 ; S_p — площадь поперечного сечения трубы, м².

Начальный массовый расход рассчитывается в предположении, что в месте разрыва характер процесса адиабатический, при этом постоянная времени истечения ε определяется исходя из допущения об изотермическом характере процесса движения газа, имеющем место на большей части длины отсеченной секции трубопровода.

Если в момент разгерметизации магистрального газопровода газ не воспламеняется, возникает необходимость анализа процессов его рассеивания в атмосфере для определения зоны загазованности.

Исходя из физических представлений и анализа специфики истечения газа под давлением из разрушенного газопровода, а также основываясь на данных о рассеивании в атмосфере аварийных выбросов из трубопровода [4], можно утверждать, что в ближайшей области выбрасываемый газ рассеивается по законам струйного смешения. При этом область рассеивания представляет собой расходящийся конус. На определенном расстоянии от аварийного разрыва трубы (150—300 м) начинается диффузионный механизм рассеивания газовой смеси.

Необходимо отметить, что в зарубежных исследованиях процесса формирования неорганизованных облаков газовоздушной смеси (ГВС) природного газа — метана на открытой местности, взрывных явлений в атмосфере не отмечалось [5], не зарегистрированы они и в отечественной нефтехимической промышленности. Это обусловлено свойствами метана — низкой плотностью газа (0,72 кг/м³), достаточной химической стабильностью и низкой скоростью химического взаимодействия с кислородом воздуха. Результаты исследований дают основания полагать, что в отличие от тяжелых углеводородов

газообразный метан представляет меньшую опасность взрыва больших масс газовоздушных облаков. Однако такая опасность существует при аномальных условиях Севера. При отсутствии источника воспламенения формируется газовоздушное облако. Зона загазованности по направлению истечения струи газа может возрасти до 500—600 м [3].

Образование взрывоопасного облака ГВС метана в приземном слое атмосферы возможно только при аномальных метеоусловиях Севера — приземная температурная инверсия в сочетании со штилем при низких температурах окружающего воздуха.

2. Опасные метеорологические условия и их влияние на скопление газа у поверхности земли

Инверсия в метеорологии означает аномальный характер изменения какого-либо параметра в атмосфере с увеличением высоты. Наиболее часто это относится к температурной инверсии, то есть к увеличению температуры с высотой в некотором слое атмосферы вместо обычного понижения.

В работе [6] проведен анализ содержания примесей в воздухе при нарушении условий застоя. В результате выявлено, что усиление ветра до 1—2 м/с вызывает меньшее снижение содержания примесей в атмосфере, чем ликвидация приземной инверсии при сохранении штиля. Ослабление ветра до штиля оказывает двоякое воздействие на содержание примесей в воздухе. С одной стороны, концентрация примесей в приземном слое атмосферы должна сильно возрастать. В то же время неограниченно возрастает подъем перегретых выбросов, которые при отсутствии ветра переносятся в более высокие слои атмосферы и рассеиваются. Однако если штиль сопровождается инверсией, то для поднимающихся выбросов создается потолок, препятствующий их дальнейшему подъему. В результате концентрация примесей у земли сильно возрастает. Таким образом, наличие штиля или слабого ветра само по себе не может рассматриваться в качестве неблагоприятной ситуации, опасным оказывается сочетание штиля с инверсией [6, 7].

В холодное время года всю территорию Восточной Сибири охватывает мощный сибирский антициклон, в котором происходит формирование континентального воздуха, в нижних слоях более холодного, чем арктический. Формирование континентального воздуха в зимнее время при ясной тихой погоде, способствующей большой потере тепла

земной поверхностью в результате излучения, приводит к сильному охлаждению воздуха снизу и образованию мощных температурных инверсий, т.е. к возрастанию температуры с высотой.

Зимние инверсии в Восточной Сибири имеют сложный характер, они представляют сочетание антициклонических и радиационных инверсий. В зимних условиях над континентами, особенно при наличии снежного покрова, возникают два процесса: радиационное охлаждение и нисходящее антициклоническое движение воздуха, которые друг друга взаимно усиливают. Вследствие этого радиационные нижние инверсии переходят на высоте в радиационно-антициклонические. Вертикальная протяженность таких комбинированных инверсий может достигать 1—2 км и более [8].

В конце зимы, когда приход солнечной радиации заметно увеличивается и радиационный баланс в дневное время становится положительным, при разрушении приземной инверсии возникает приподнятая инверсия.

Также приподнятые инверсии могут возникать в антициклонах (так называемые инверсии сжатия) при прохождении атмосферных фронтов.

Исходя из данных работы [6] повторяемость неблагоприятных условий (штиль и приземная инверсия) в зимнее время составляет 0,8 в Алма-Ате, 0,78 в Красноярске, 0,79 в Иркутске.

Вертикальная протяженность штилей весьма велика (несколько сотен метров и выше) в областях с резко континентальным климатом (Сибирь, Средняя Азия и др.).

Районом исключительно мощных и продолжительных инверсий является Якутия. Для холодного времени года, особенно с декабря по февраль, для большей части территории характерны слабые ветры и штили, которые обуславливают слабое перемешивание воздуха, а следовательно — слабый вертикальный теплообмен, поэтому здесь возникают мощные приземные инверсии, которые усиливаются в горных районах [9].

Глубокие инверсии устанавливаются в течение зимы в долинах рек Колымы, Яны, Индигирки. Радиационные инверсии здесь также усиливаются под влиянием орографии: в результате застоя на дне долин стекающего со склонов холодного воздуха. Как интенсивность, так и вертикальная протяженность приземных инверсий в Якутии достигают существенных значений. Средняя мощность инверсий

в период с ноября по март превышает 1000 м и достигает в декабре и январе 1150—1250 м [38]. Столь большую мощность следует объяснить совместным действием нескольких факторов: выхолаживанием подстилающей поверхности за счет радиационного излучения, особенностями местоположения и антициклоническим сжатием [38].

В Якутии уже в сентябре продолжительность непрерывных инверсий составляет 5—7 дней, а к октябрю возрастает до 10 дней и более. В течение трех зимних месяцев сохраняется непрерывное инверсионное распределение температуры воздуха. В марте здесь еще отмечаются длительные инверсии с высокими значениями градиентов. В апреле число дней с инверсиями составляет 15—17, причем в 8—10 из них инверсия сохраняется непрерывно [4].

Таким образом, в зимний период на всей территории Восточной Сибири устанавливаются мощные, круглосуточные инверсии с перепадами температур в зоне инверсий 7—16 °С. В марте под влиянием солнечной радиации и турбулентного перемешивания в большинстве районов они начинают разрушаться.

В летние месяцы в основном преобладают ночные инверсии со сравнительно невысокими значениями градиентов и небольшой вертикальной протяженностью.

Инверсионное распределение, связанное с ростом температуры с высотой, определяется как устойчивая стратификация. При наличии приземной инверсии температуры с ослаблением скорости ветра до штиля затухает турбулентный обмен в атмосфере. В этом случае рассеяние газа в атмосфере практически происходит в соответствии с известными закономерностями молекулярной диффузии [7]. Рассеивание газа, осуществляемое за счет молекулярной диффузии, незначительно и приводит к образованию опасной загазованности с концентрациями, превышающими предельно допустимые значения или нижний концентрационный предел распространения пламени.

3. Оценка вероятностей появления опасных метеорологических условий и вероятности образования облака ГВС метана в открытой местности

Рассмотрим вероятность образования облака взрывоопасной газовоздушной смеси (ГВС) метана на открытой местности. Наиболее значительное скопление взрывоопасной ГВС метана в окружающей среде имеет место, когда появляются неблагоприятные для ее

рассеивания метеорологические условия. К опасным метеорологическим условиям относятся застои воздуха, характеризующиеся очень слабыми ветрами 0 — 1 м/с (штиль), и температурные инверсии [6, 7].

Вероятность (частота) образования облака взрывоопасной ГВС метана оцениваем как произведение следующих параметров: вероятности (частоты) истечения газа из газопровода без воспламенения на вероятность опасных метеорологических условий:

$$P_{gam} = P_d \cdot P_{dwc} \quad (2)$$

где P_d — вероятность (частота) истечения газа из газопровода без последующего воспламенения; P_{dwc} — вероятность опасных метеорологических условий.

По результатам анализа и систематизации статистических метеоданных с 1997 по 2016 г. получены вероятности появления опасных метеоусловий по месяцам в зимнее и летнее время в п. Оймякон (рис. 1, 2).

Из рис. 1 видно, что в зимний период наибольшая вероятность появления опасных метеорологических условий наблюдается в декабре месяце. Наиболее опасными периодами являются ноябрь, декабрь, январь — месяцы, где вероятность образования инверсии со штилем в среднем составляет 0,95.

Сравнение вероятности образования инверсии со штилем при отрицательных и положительных температурах показывает, что вероятность появления опасных метеоусловий в зимний период увеличивается от 5 до 14 раз по сравнению с летним периодом. Следовательно, увеличивается и вероятность образования облака взрывоопасной ГВС метана.

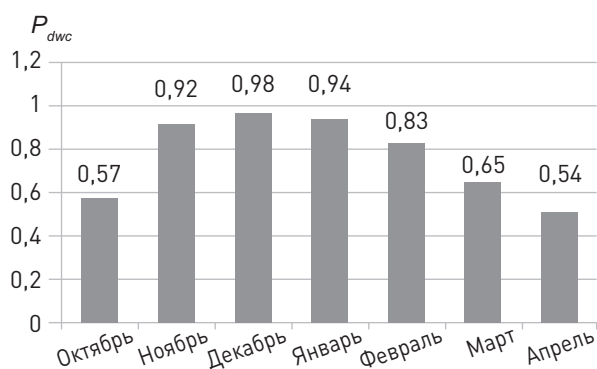


Рис. 1. Вероятности появления опасных метеорологических условий по месяцам в зимнее время в п. Оймякон

4. Оценка риска аварийного истечения газа из газопровода при низких температурах окружающей среды

По результатам анализа известных аварий газопроводов, произошедших при низких температурах, разработано «дерево событий» истечения газа из газопровода с оценкой частот реализации аварийных сценариев, предназначенных для количественной оценки риска (рис. 3).

Частоту истечения газа из газопровода при низкой температуре оценим по статистике аварий, произошедших на действующей части магистрального газопровода «Мастах — Берге — Якутск». Магистральный газопровод «Мастах — Берге — Якутск» диаметром 530 мм общей протяженностью 936 км эксплуатируется с 1967 г. За период с 1967 по 2016 г. при отрицательных температурах произошло 12 аварий с истечением газа [1].

По результатам оценки, частота истечения газа из газопровода при отрицательных температурах составит $3,2 \cdot 10^{-4}$ 1/(км·год).

Рассмотрим наиболее опасный сценарий 1 (см. рис. 3) — истечение газа из газопровода с последующим воспламенением, поражением соседних объектов и людей. Условная вероятность этого сценария определяется как произведение условных вероятностей следующих событий: истечение газа из газопровода с вероятностью P_1 → воспламенение газа с вероятностью P_2 → поражение соседних объектов с вероятностью P_3 → поражение людей с вероятностью P_4 .

Частота возникновения наиболее опасного сценария 1 $H(C_1)$ составит $2,32 \cdot 10^{-5}$ 1/(км·год).

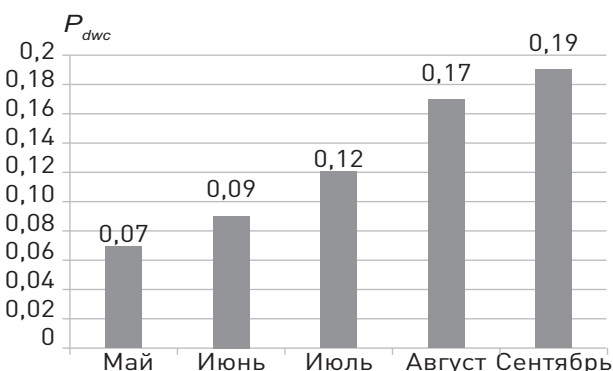


Рис. 2. Вероятности появления опасных метеорологических условий по месяцам в летнее время в п. Оймякон

Аналогично оценены частоты других сценариев реализации аварии при истечении газа из газопровода (см. рис. 3).

По разработанному «дереву событий» истечения газа из газопровода оценивается экологический риск R_e от загрязнения атмосферы метаном при реализации сценария 6 как произведение величины удельного ущерба Y_e на массу аварийного выброса M_g и на частоту возникновения сценария 6 $H_i(C_6)$:

$$R_e = Y_e \cdot M_g \cdot H_i(C_6). \quad (3)$$

Аналогично определяется материальный риск от потерь газа R_g и от проведения ремонтно-восстановительных работ R_r :

$$R_g = Y_g \cdot M_g \cdot H_i(C_6); \quad (4)$$

$$R_r = Y_r \cdot H_i(C_6), \quad (5)$$

где Y_g — удельный материальный ущерб от потери газа, руб/кг; Y_r — затраты на ремонтно-восстановительные работы; $i = 1, 2, 3, 4$.

В условиях Севера сценарий 5 может привести к катастрофическим последствиям при дальнейшем развитии.

Сценарий 5 аварии в обобщенном виде кратко описывается следующим образом: разгерметизация трубопровода с выбросом (истечением) природного газа в окружающую среду → образование облака ГВС метана → при наличии источника зажигания возможен взрыв → воздействие поражающих факторов на реципиенты.

5. Влияние температурной инверсии на величину избыточного давления ударной волны при взрыве облака ГВС метана в открытой местности

Возникающая при разрушениях газопроводов воздушная волна сжатия не представляет прямой угрозы для жизни человека, оказавшегося даже в непосредственной близости от центра разрыва, и не способна вызвать какие-либо повреждения зданий и сооружений, расположенных за пределами существующих нормативных разрывов, а вероятность механического поражения различных реципиентов осколками труб значительно ниже вероятностей воздействия других поражающих факторов, таких как тепловое излучение при пожаре газопровода и воздушная волна сжатия при

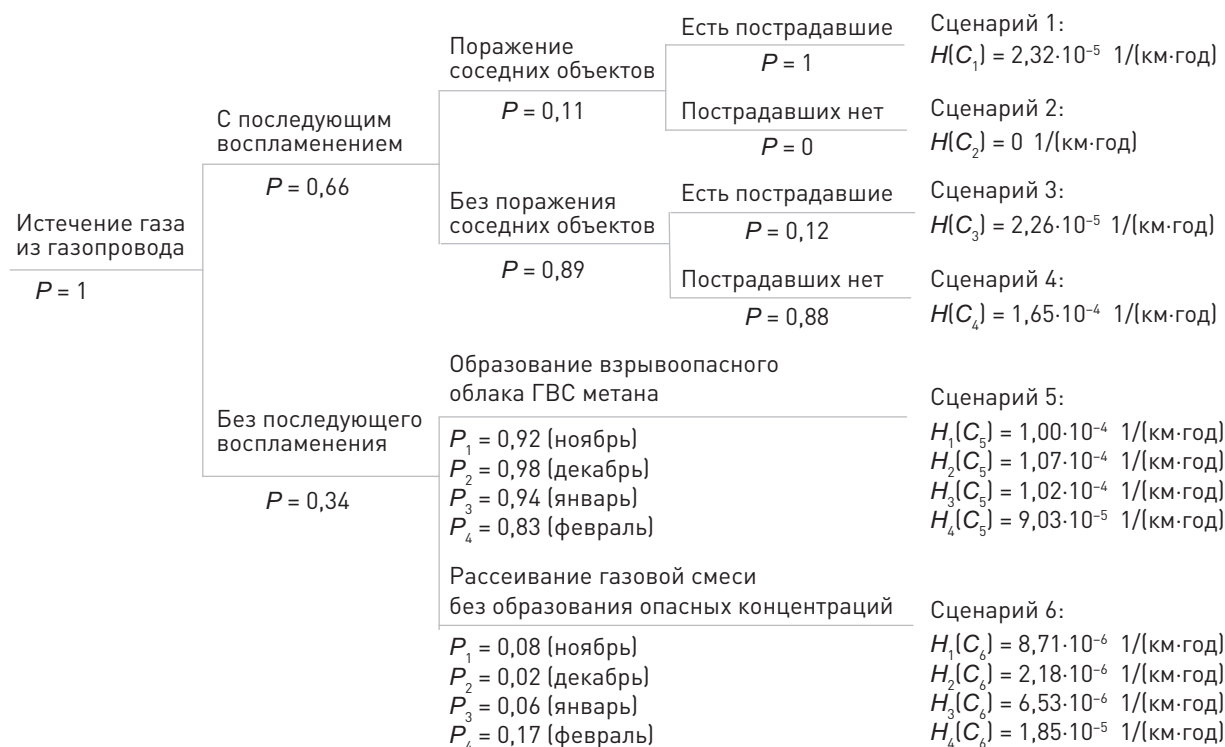


Рис. 3. «Дерево событий» истечения газа из газопровода при низких температурах окружающей среды

Результаты оценки увеличения избыточного давления Δp_f (200 Па) слабой ударной волны в зависимости от характера изменения температуры с высотой при взрыве облака ГВС метана

Таблица

Градиент температуры с высотой	Изменение скорости распространения ударной волны $V_{ув}$ с высотой H	К	Δp_f , кПа	Степень поражения	
				С	П
Слабый положительный градиент около поверхности с сильно положительным градиентом вверх (инверсия)		25	5	Расстекление зданий	Возможны осколочные травмы
Отрицательный градиент у поверхности с сильно положительным градиентом вверх (приподнятая инверсия)		100	20	Средние повреждения зданий	Серьезное повреждение тканей

Примечание. К — коэффициент возможного увеличения избыточного давления Δp_f ударной волны; С — сооружения; П — персонал (население).

дефлаграционном взрыве облака ГВС метана в открытой местности.

Рассмотрим дефлаграционный взрыв облака ГВС метана в открытой местности. Для оценки параметров дефлаграционного взрыва облака ГВС метана можно рекомендовать руководство по безопасности, изложенное в документе [10]. Но на дальних расстояниях в условиях Севера следует учесть влияние мощных температурных инверсий на параметры слабой ударной волны, т.е. на волны с избыточным давлением не более 200 Па.

Изучению влияния инверсии на возможность увеличения слабых воздушных волн при взрывных работах посвящены труды следующих авторов — Я.И. Цейтлина, М.И. Ганопольского, В.А. Громова, Ю.С. Рыбнова, В.И. Кудрявцева, В.Ф. Евменова, П.В. Меньшикова [11—13].

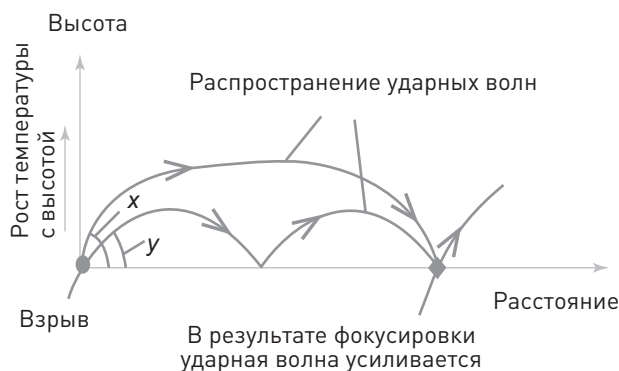


Рис. 4. Эффект фокусировки ударных волн при температурной инверсии

В работе П.В. Меньшикова [13] экспериментально получены коэффициенты возможного увеличения воздушной ударной волны в зависимости от характера изменения температуры с высотой. При отрицательном градиенте температур увеличения избыточного давления ударной волны не наблюдается. При положительном градиенте температур возможны увеличения избыточного давления ударной волны от 5 до 100 раз, в зависимости от характера инверсии. Результаты экспериментальных работ П.В. Меньшикова можем применить для крупных аварий газопроводов, таких как взрыв облака ГВС метана в открытом пространстве.

Результаты оценки увеличения избыточного давления Δp_f (200 Па) слабой ударной волны представлены в таблице.

Из таблицы видно, что избыточное давление, увеличившись в 25 раз при приземной инверсии и в 100 раз при приподнятой инверсии, приводит к поражению человека на том же расстоянии, которое было безопасно для человека при отсутствии инверсии.

Рассмотрим механизм увеличения избыточного давления ударной волны под влиянием температурной инверсии. Известно, что скорость распространения ударной волны с увеличением температуры повышается. Поэтому при температурной инверсии, когда температура растет с высотой, движение волны в приземном слое будет более медленное и фронт волны отклонится к поверхности земли. Схематично это показано на рис. 4.

Ударные волны, вышедшие под углом x , отклонятся к земле и достигнут поверхности земли на некото-

ром расстоянии. Ударные волны, вышедшие под углом y ($y < x$), достигнут поверхности земли на меньшем расстоянии. Отразившись от поверхности, они совершат еще один цикл. При соответствующем соотношении x и y ударные волны, вышедшие под углом x , придут в ту же точку, что и ударные волны, вышедшие под углом y . Сложение волн в точке прихода приведет к увеличению давления в фазе сжатия.

Таким образом, на дальних расстояниях необходимо учитывать увеличение значения избыточного давления при наличии температурной инверсии.

Заключение

Повышение промышленной безопасности опасных производственных объектов, работающих в условиях Севера, требует всестороннего учета влияния специфических для данного района природно-климатических факторов на параметры риска. В статье проанализированы климатические особенности Севера, выявлены неблагоприятные аномальные метеоусловия, характеризующиеся образованием мощных температурных инверсий. Обосновано влияние неблагоприятных аномальных метеоусловий на характер развития аварий, показаны существенные изменения протекания аварий газопроводов на Севере от условий с умеренным климатом. Отмеченные обстоятельства позволяют считать разработанный методический подход к оценке риска аварий газопроводов, размещаемых на территории Крайнего Севера, Арктики, актуальным и перспективным.

Литература

1. Захарова М.И. Анализ риска аварий резервуаров и газопроводов в условиях Севера // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 2. С. 54—64.
2. СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».
3. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Стохастические модели и результаты количественной оценки интегрированного риска аварий на магистральном трубопроводном транспорте в условиях Заполярья // Устойчивое экологическое развитие: региональные аспекты. Междунар. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2001. С. 125—138.
4. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: РАО «Газпром», 1996. 208 с.
5. Маршалл В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 672 с.
6. Сонькин Л.Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе // Труды ГГО. 1973. Вып. 254. С. 121—131.
7. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеопиздат, 1975. 448 с.
8. Безуглая Э.Ю., Виноградова Е.В., Елекоева Л.П., Жабарова Б.Н., Лебедева В.Ф., Разбегаева Е.А., Захарова Г.Б., Церфас К.Э. Инверсии температуры над территорией СССР // Труды ГГО. 1977. Вып. 387. С. 88—109.
9. Анапольская Л.Н., Копанева И.Д. Климатические параметры Восточно-Сибирского и Дальневосточного экономических районов. Научно-справочное пособие. Л.: Гидрометеопиздат, 1979. 389 с.
10. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 апреля 2015 г. № 159).
11. Цейтлин Я.И., Ганопольский М.И., Громов В.А. Влияние метеоусловий на интенсивность слабых ударно-воздушных волн взрывов // ФТПРПИ. 1980. № 3. С. 51—55.
12. Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Евменов В.Ф. Экспериментальные исследования влияния приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности на амплитуду слабых воздушных ударных волн от наземных химических взрывов // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 6. С. 98—100.
13. Меньшиков П.В. Факторы, влияющие на интенсивность ударной воздушной волны // Технология и безопасность взрывных работ: материалы научно-технической конференции «Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле». Екатеринбург. 2011 г. С. 246—255.

Сведения об авторе

Захарова Марина Ивановна: кандидат технических наук, научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
Количество публикаций: 27
Область научных интересов: анализ риска
Контактная информация:
Адрес: 677891, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1
Тел.: +7 (4112) 39-05-52,
E-mail: marine3@yandex.ru