

УДК 622.691.4:614.8

В.С. Сафонов, А.В. Мельников, С.В. Ганага

Методические аспекты анализа аварийных процессов на подводных газопроводах

Континентальный шельф Российской Федерации является самым крупным в мире по площади. Извлекаемые ресурсы углеводородов оцениваются по нефти как 13,5 млрд т, по газу – как 73 трлн м³. Основная роль в добыче углеводородов при этом принадлежит арктическим (70 % общих ресурсов) и дальневосточным (20 % общих ресурсов) морям. Среди объектов обустройства морских месторождений особое место занимают подводные трубопроводы, эксплуатация которых происходит зачастую в сложных инженерно-геологических и природно-климатических условиях, причем с ограниченными возможностями проведения диагностических и ремонтных работ в разрезе года.

По результатам анализа зарубежных баз данных по инцидентам и авариям в системах морских трубопроводов (в Мексиканском заливе, Северном море, на шельфовых месторождениях Австралии и стран АТР, в Средиземноморье и др. [1]), а также с учетом условий эксплуатации трубопроводов в арктических и дальневосточных морях и принятых у нас в стране технических решений по обеспечению безопасности и соответствующих методов контроля и надзора для континентального шельфа России рекомендованы базовые значения величин ожидаемых частот возникновения аварий на морских трубопроводах (таблица). Нижняя граница в указанных диапазонах (см. табл.) при этом рекомендуется для новых трубопроводов, проектируемых с учетом применения всех современных технологий, материалов, методов строительства и контроля, а верхняя – это консервативная (завышенная) оценка.

При обосновании показателей рисков эксплуатации морских трубопроводов моделирование последствий аварий является одним из наиболее значимых этапов. При этом специфика протекания аварийных процессов будет зависеть от ряда характерных условий, среди которых необходимо отметить следующие:

- диаметр (500–1020 мм) и рабочее давление (0,5–2,5 МПа);
- компонентный состав перекачиваемой среды (наличие и возможность «выпадения» или отсутствие пластовой воды, тяжелых углеводородных компонентов, антигидратных компонентов и т.п.);
- рельеф трассы, характеристика грунта, особенности заглубления трубопровода в грунт;
- глубину моря в месте разрыва газопровода;
- условия перекрытия аварийного участка;
- наличие загрязняющих веществ в водной среде и др.

Различным аспектам моделирования и анализа негативных последствий аварийных разрывов подводных трубопроводов в научной литературе уделяется достаточно большое внимание. В настоящей работе отмечена необходимость правильного учета специфических условий возникновения и развития аварийных процессов при обосновании показателей безопасности и риска эксплуатации подводных газопроводов.

Ожидаемые частоты аварий на морских трубопроводах

Диаметр трубопровода, м	Частота, ав./год на 1000 км
До 0,2	$(0,15-1,5) \cdot 10^{-1}$
0,25–0,4	$(0,23-2,3) \cdot 10^{-2}$
0,43–0,6	$(0,18-1,8) \cdot 10^{-2}$
0,63–1,0	$(0,27-2,7) \cdot 10^{-2}$

Ключевые слова:

континентальный шельф РФ, морской газопровод, безопасность, авария, истечение газа, газожидкостный шлейф, дисперсия газа.

Keywords:

Russian continental shelf, offshore gas pipeline, safety, accident, gas flow, gas-liquid plume, gas dispersion.

При этом подразумевается, что в моделях развития сложных аварийных процессов характеристики предыдущего этапа являются начальными (краевыми) условиями для последующего этапа. Это обстоятельство в силу неизбежных упрощений при моделировании и (или) по причине недостаточных знаний о физических особенностях процессов может существенно повлиять на достоверность полученных результатов.

Формирование волн сжатия

После разрушения подводного газопровода сжатый газ начинает выделяться в окружающую среду, и под действием разности давлений граница контакта «газ – жидкость» начинает расширяться. В приграничной области жидкости формируется зона (волна) сжатия, скорость распространения которой равна местной скорости звука в жидкости. Скорость звука в воде (около 1500 м/с) существенно выше, чем в сжатом газе (при давлениях 10–15 МПа она составляет 400–470 м/с), поэтому волна сжатия «отрывается» от границы контакта «газ – жидкость».

В отличие от разрыва сухопутного газопровода при разрыве подводного большая часть потенциальной энергии сжатого газа переходит в кинетическую энергию воды в форме скоростного напора, следующего за фронтом волны сжатия в жидкости. Для моделирования быстропротекающих процессов при

сложном нелинейном поведении материалов и изменяющихся в процессе решения граничных условиях могут быть использованы разнообразные численные методики (например, [2, 3]). В рассматриваемом случае при наличии сложных контактных границ между средами наиболее предпочтительным является применение методики, основанной на смешанном лагранжево-эйлеровом подходе. Такая методика разработана и впервые апробирована в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» для моделирования физических процессов при аварийном разрыве подземного магистрального газопровода [4] с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Опыт создания нелинейных многофазных моделей применялся для анализа аварийных процессов при разрыве подводного газопровода [5, 6].

При разработке методики учитывались результаты полномасштабных экспериментальных исследований по разрывам труб диаметрами $558 \times 6,35$ мм ($P = 10$ МПа) и $106 \times 15,2$ мм ($P = 11,4$ МПа), в том числе обетонированных, на дне озера глубиной 12 м [7]. При этом установлено, что:

- зависимость формирующегося избыточного давления от времени можно представить некоторой идеализированной импульсной функцией, в которой пиковая величина давления (P_{\max}) и последующее «установившееся» давление зависят от начального давления в трубе ($P_{\text{тр}}$), ее диаметра и расстояния от точки разрыва;
- время подхода в заданную точку первичной волны (начало повышения давления t_0) пропорционально расстоянию (X), м, деленному на скорость распространения звука в воде (~ 1500 м/с): $t_0 \sim X / 1500$ (рис. 1).

Разработанная в [5] методика позволила провести:

- 1) моделирование поведения тела трубы при разрушении в рамках оболочечной теории с возможностью пластического течения материала, упрочнения и разрушения по критерию истощения пластичности;
- 2) учет бетонного покрытия трубы;
- 3) связанный расчет течения газа в трубе, учитывающий взаимодействие трубы и газа с окружающей водой и возможность притока флюида в расчетную область из удаленных участков трубопровода;
- 4) расчет преднапряженного состояния системы под действием силы тяжести и внутреннего давления.

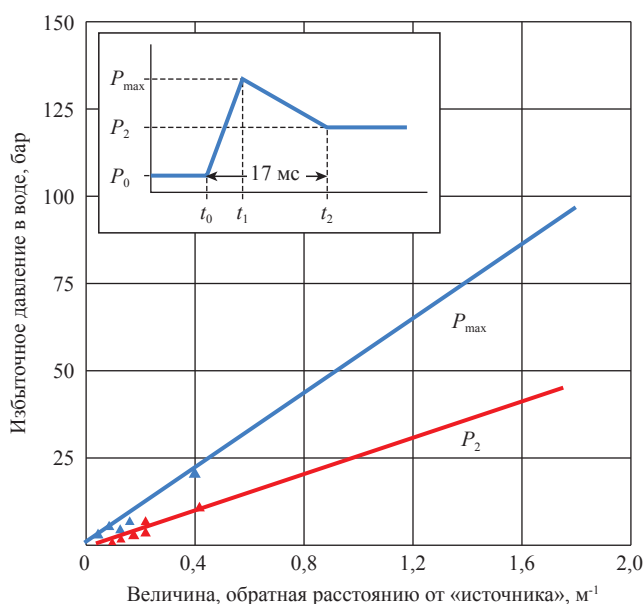


Рис. 1. Экспериментальные данные по изменению давления при разрушении газопровода

На рис. 2 представлены характерные кривые изменения давления волны сжатия в воде при разрыве газопровода диаметром 1,07 м с бетонным покрытием при $P = 13$ МПа на глубине 100 м (скорость раскрытия трещины (V) изменялась линейно в диапазоне $50 < V < 200$ м/с).

Как показал анализ полученных данных, функции изменения давления во времени носят плавный (неударный) характер, по координате близки к линейным лишь в прилегающей зоне (примерно до 5 м), а далее меняются уже обратно пропорционально квадрату расстояния, что указывает на сферическую форму источника импульса.

Установлено также, что движение тела трубы за счет кинетических эффектов весьма незначительно и не представляет серьезной опасности для смежных ниток даже в случае «всплытия» трубы из траншеи.

Аварийное истечение газа

Динамика аварийного истечения газа определяется классическими законами сохранения потока сжимаемого газа. Эта задача с различной степенью приближения численно реализована в целом ряде работ [8–11]. В данной статье использованы результаты исследований ООО «Газпром ВНИИГАЗ», проведенных для подводного перехода газопроводов ($D_0 = 550$ мм, $P = 22$ МПа) через Черное море [11]. При проведении расчетов использовалось уравнение состояния Бенедикта–Вебба–Рубина (BWR). В качестве граничного условия на левой границе потока (компрессорная станция, КС) использовалась характеристика центробежного нагнетателя. Принималось, что при возникновении аварийного разрыва КС «Береговая» будет отключена при падении давления нагнетания на 3 ати, а КС на турецком берегу – исходя из условий антипомпажного режима при снижении расхода газа до 0,9 от номинального. На рис. 3 представлены расчеты динамики аварийного истечения газа для трех вариантов разрыва на расстояниях 19,8; 99 и 360 км от КС.

Формирование газожидкостного шлейфа

В общем случае в окрестности аварийного разрыва подводного газопровода возникает нестационарное трехмерное газожидкостное течение, описываемое системой уравнений многофазной гидродинамики. Численное решение этой системы уравнений встречает значительные трудности. В потоке обычно условно

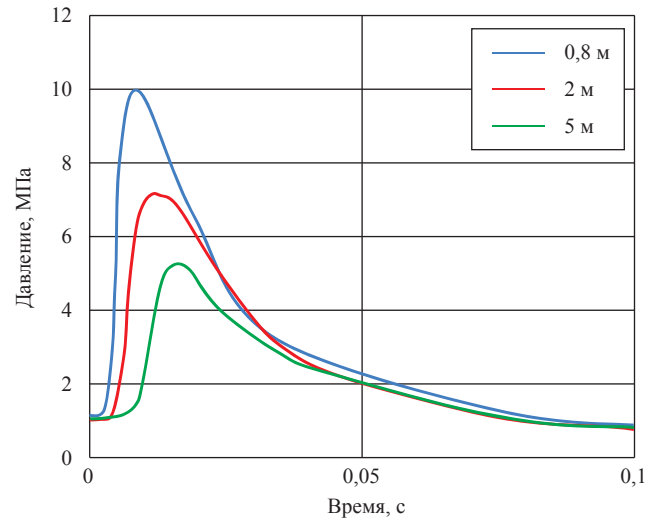


Рис. 2. Динамика давления в воде на различных расстояниях от оси при разрушении газопровода

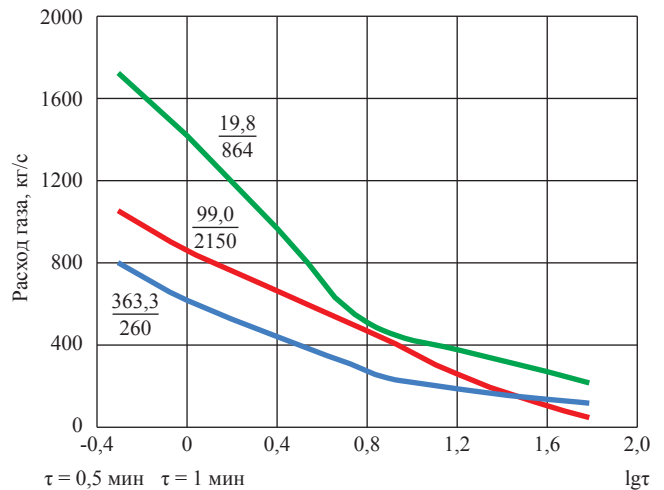


Рис. 3. Динамика аварийного истечения газа: в числителях дробей – расстояние от КС «Береговая», км; в знаменателях – глубина моря, м; τ – время, мин

выделяют 3 характерных участка: 1) *начальный*, где происходит гашение кинетической энергии газа; 2) *пузырьковый шлейф*, в котором движение газа осуществляется уже только под действием архимедовой силы; 3) *плоская радиально растекающаяся «струя»* на поверхности раздела, газ из которой выделяется в атмосферу. При этом влияние начального участка на выделение газа с поверхности зависит как от глубины моря, так и от интенсивности истечения газа.

В дальнейшем будем условно рассматривать 2 предельных варианта аварийного разрыва: при «большой» глубине и на «мелководье». Характерный пример разрыва газопровода на «большой» глубине – упомянутый ранее

переход через Черное море. Этот пример представляет для нас особый интерес, в том числе и применительно к вопросам экологической безопасности.

Следует отметить, что особенности движения «классического» вертикального газожидкостного шлейфа в приложении к различным техническим задачам (в том числе при фонтанировании подводных скважин) достаточно детально исследованы – как аналитическими и численными методами, так и экспериментально – и освещены в научной литературе. Не претендуя на полноту анализа, укажем, например, работы [12–21]. Однако эти результаты имеют либо узкую направленность, либо излишне сложны, что затрудняет их использование в практических задачах анализа риска. В этой связи в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» разработана полуэмпирическая модель квазиодномерного газожидкостного течения [20], которая применялась в расчетах газопровода «Голубой поток» [11].

Для основного участка струи (вертикального потока) использовалась система дифференцированных уравнений, включающая:

- закон сохранения массы газа;
- закон изменения количества движения под воздействием архимедовой силы;
- закон изменения объемного расхода в струе за счет эжекции воды;
- уравнение материального баланса для растворенного в воде сероводорода (при отсутствии термодинамического разгазирования);

• экспериментально установленные профили скорости и массовой концентрации газа в струе;

• уравнение состояния газа $\rho = f(P, T, Z)$, где ρ – плотность, P – давление, T – температура, Z – коэффициент сжимаемости газа.

Сравнение результатов численной реализации указанной системы уравнений с данными экспериментов, проведенных в морском технологическом институте в г. Тронхейме (Норвегия) [11], показало удовлетворительное совпадение. С использованием представленных выше моделей истечения газа и движения газожидкостного шлейфа проведены расчеты выноса морской воды на поверхность с различных глубин при разрыве одной из ниток газопровода. Некоторые результаты приведены на рис. 4.

Здесь же кратко рассмотрим гидродинамические особенности формирования газожидкостной струи в «мелкой» воде. Задача при этом становится в общем случае трехмерной, и ее решение существенно усложняется. В этой связи определенный интерес представляют результаты модельных экспериментов. Их достаточно полное обобщение дано в [16]. Там же представлены результаты собственных экспериментальных исследований автора по «вторжению» одиночной струи газа в слой «мелкой» воды. При этом на горизонтальную струю оказывают значительное влияние силы плавуности, за счет чего траектория струи отклоняется от горизонтальной оси, и когда энер-

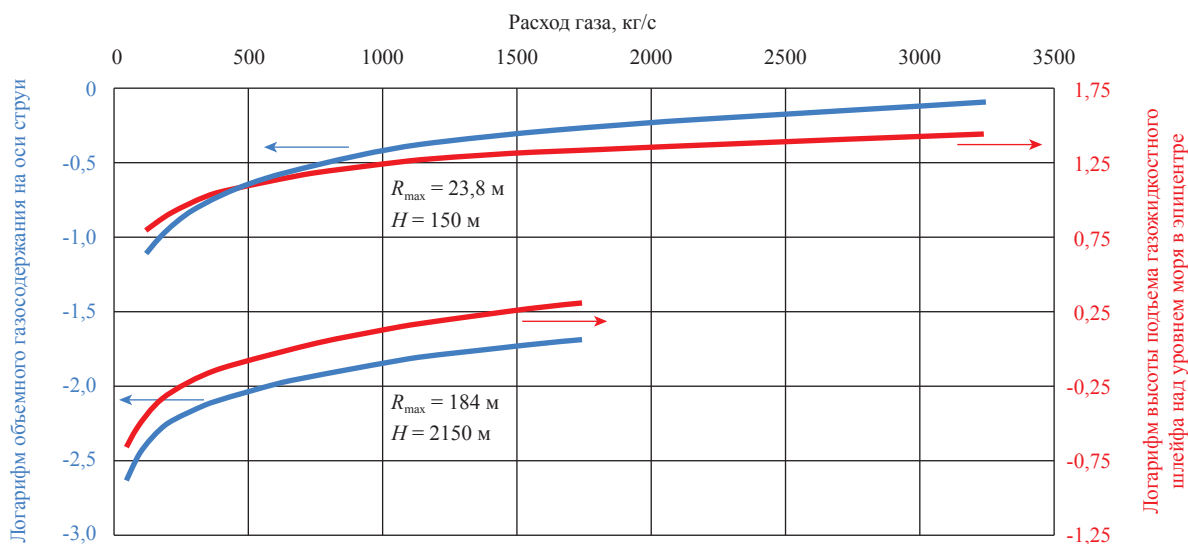


Рис. 4. Результаты моделирования подъема газожидкостного шлейфа с различных глубин моря H :

R_{\max} – радиус газожидкостного пятна на поверхности моря

гия струи становится меньше энергии подъемных сил, струя распадается на отдельные пузыри, т.е. формируется пузырьковый шлейф. Газожидкостное пятно на поверхности воды при этом имеет форму эллипса (окружности при вертикальном истечении).

Следует учитывать, что в отличие от сценария аварийного разрыва на глубине (вертикальная симметричная газожидкостная струя) в данном случае в процессе моделирования возникает целый ряд неопределенностей (возможных сценариев) при формулировании граничных условий, связанных со следующими обстоятельствами:

- место аварийного разрыва газопровода в системе «подводный добычный комплекс (платформа) – берег» и особенности отключения аварийного участка определяют формирование либо одиночной струи, либо двух встречных струй газа;
- особенности заглупления газопровода, характеристики грунтовой засыпки, протяженность разрыва отражаются на ориентации струй газа в пространстве и их гидродинамическом взаимодействии между собой и поверхностью дна.

Указанные и другие факторы влияют на особенности формирования газожидкостного пятна на поверхности воды, т.е. на начальные условия дальнейшего распространения газа в приповерхностном слое атмосферы, что будет более подробно рассмотрено далее.

Загрязнения окружающей среды

Как известно, гидрологическая структура вод Черного моря отличается чрезвычайной вертикальной неоднородностью в верхнем (~ 150 м) слое, а во всем нижележащем слое (150–2200 м) – наоборот, значительной температурно-соленостной (а следовательно, и плотностной) однородностью [22]. В верхнем слое воды сероводород отсутствует, а далее, с глубиной, его количество постепенно увеличивается и достигает на глубине 2000 м концентрации 10,3 мл/л, причем перенос сероводорода течениями из глубинных слоев Черного моря к его поверхности в естественном климатическом режиме невозможен. Таким образом, возникает задача прогноза объемов выделения на поверхности раздела сероводорода из слоев воды, увлекаемых аварийным выбросом газа.

В приложении к проблеме выделения сероводорода были проведены специальные исследова-

ния ряда задач фазовых равновесий по оригинальным моделям ООО «Газпром ВНИИГАЗ». На базе расчетов по представленным ранее моделям установлено, что концентрация сероводорода на поверхности моря при разрыве газопровода, например, на глубине 530 м (~15 км от берега) составит 2,2 мл/л, а на глубине 2150 м (~100 км) – 4,8 мл/л. Как уже отмечалось, целый ряд морских газопроводов предназначен для транспортировки пластовой продукции на берег в многофазном состоянии. При этом в потоке в состоянии неустойчивого термодинамического равновесия присутствуют углеводородные компоненты C_3-C_{5+} , которые при аварийном разрыве газопровода выделяются в виде жидкой фазы (C_{5+}) и растекаются по поверхности.

Важно подчеркнуть, что действующая нормативная база вводит единые требования к борьбе с аварийными разливами нефти и нефтепродуктов. К последним по формальному признаку относят и конденсат, что в данном контексте не вполне соответствует действительности. В качестве подтверждения этому положению далее рассмотрены некоторые результаты моделирования аварийного разрыва трубопровода с условным диаметром $D_y = 500$ мм, транспортирующего многофазную продукцию Киринского газоконденсатного месторождения от подводного манифольда ($P = 110$ бар) на берег. Содержание конденсата в газе принято 150 г/м³. На рис. 5 представлены расчеты динамики растекания и конвективно-диффузного

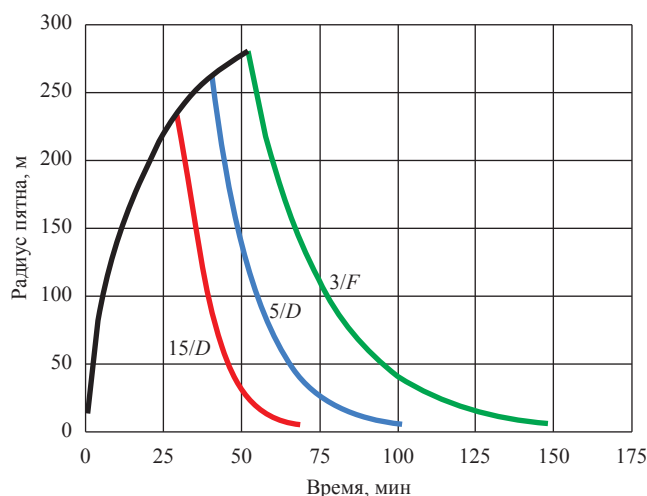


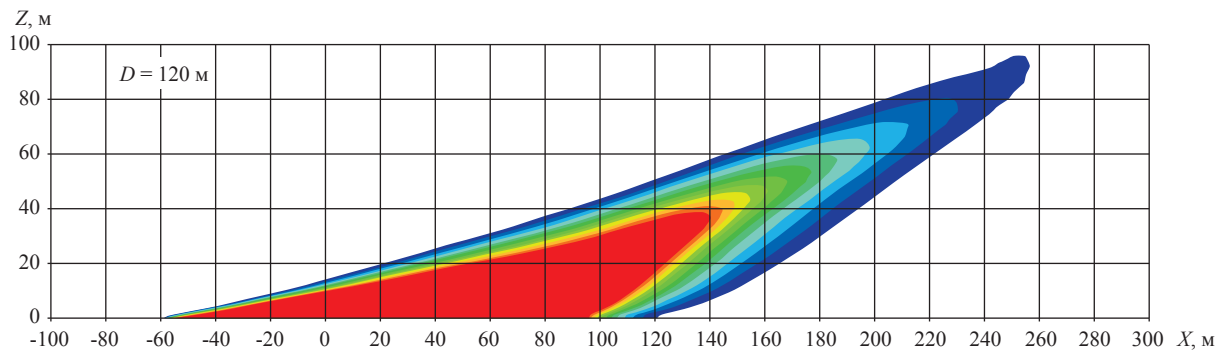
Рис. 5. Динамика растекания и испарения пленки конденсата на поверхности воды при различных скоростях ветра (3, 5, 15 м/с соответственно) и классах устойчивости атмосферы по Паскуиллу (F, D)

испарения пленки конденсата на поверхности воды с температурой $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура воздуха $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$) для различных скоростей ветра и классов устойчивости атмосферы, выполненные с помощью программного комплекса PHAST. Как видно, даже для неблагоприятных метеоусловий (класс F), частота возникновения которых в разрезе года для указанного региона не превышает 5 %, пленка конденсата существует лишь 2–2,5 ч, что заведомо ниже нормативного времени реагирования (4 ч) согласно Плану ликвидации аварийных разливов нефти на Киринском газоконденсатном месторождении. Указанное обстоятельство свидетельствует о необходимости внесения определенных изменений в действующую нормативно-техническую документацию.

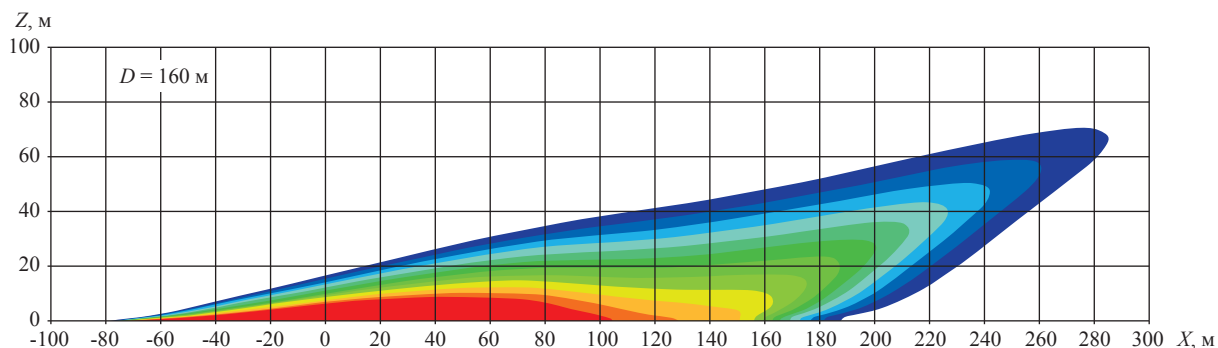
Дисперсия газа в атмосфере

Как было показано ранее, объективно неизбежное введение определенных упрощений при моделировании аварийного истечения газа и движения газожидкостной струи приводит к неопределенностям задания величин массового расхода газа и размеров газожидкост-

ного пятна на поверхности воды как граничных условий для последующего моделирования нестационарного процесса рассеивания взрывоопасного (токсичного) газа в атмосфере. На рис. 6 представлены расчеты дисперсии газа в атмосфере для акватории Черного моря при разрыве газопровода на глубине $\sim 900\text{ м}$ (20-й километр трассы). В силу выраженной нестационарности истечения газа из трубопровода и особенностей всплытия пузырьков газа на поверхности воды формируется источник выделения газа переменной мощности. Однако, учитывая, что с точки зрения анализа риска наибольший интерес представляют максимальные размеры зоны загазованности, расчеты проводились для интенсивности истечения, усредненной в течение 1-й минуты после аварийного разрыва, – 1600 кг/с , для трех возможных значений диаметра газожидкостного пятна (базового D_0 и $D_0 \pm 50\%$), класса устойчивости атмосферы D и наиболее характерной для него скорости ветра 5 м/с (температура воды $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, воздуха $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Состав газа: 99,5 % метана и 0,5 % сероводорода. Расчеты проводились как по разработанной в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



а



б

Рис. 6. Моделирование распространения взрывопожароопасного облака в приповерхностном слое – сценарий разрушения газопровода «на глубине»: $D = 120\text{ мм}$ (а); $D = 160\text{ мм}$ (б); изменение цвета от красного к темно-синему соответствует изменению объемной концентрации метана от 15 до 5 %

оригинальной трехмерной модели [23, 24], так и с помощью программного комплекса PHAST.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в силу весьма незначительной скорости поступления газа в атмосферу с большой поверхности воды возникает выраженное вертикальное течение более легкого, чем воздух, газа под действием сил Архимеда, вследствие чего интенсифицируются процессы турбулентного массопереноса и поток газа активно разбавляется воздухом до безопасных концентраций. Изоконцентрации сероводорода здесь не приводятся, однако их протяженность примерно в 1,5 раза больше, чем для метана. Относительно незначительный масштаб газовой опасности определяется в данном случае в основном спецификой выброса газа с большой глубины.

Рассмотрим далее другой характерный сценарий – выброс газа на мелководье. Расчеты дисперсии газа в атмосфере проведены с помощью программного комплекса PHAST при разрыве газопровода диаметром 1,02 м с номинальным давлением $P = 7,5$ МПа, проложенного на глубине 12 м (условия Обской губы). Поскольку в данном случае струя газа практически «мгновенно» проходит через слой воды, интервал осреднения массового расхода газа принят равным 30 с после начала разрыва трубы. Основная неопределенность при моделировании – площадь газожидкостного пятна на поверхности. На рис. 7 представлены расчеты максимального по размерам поля концентраций $C_{об}$ (5 % об.) для фиксированного расхода и

ряда эквивалентных диаметров D газожидкостного пятна (температура воды +5 °С, воздуха +10 °С). Отличительной особенностью данного сценария разрыва газопровода является поступление газа в атмосферу с относительно высокой скоростью, что делает доминирующим эжекционный механизм захвата воздуха в струю, провоцируя ее быстрое разбавление до безопасных концентраций, причем на значительной высоте, а не в приповерхностном слое атмосферы. Таким образом, газовая опасность в данном случае, по существу, будет ограничена «местом» аварийного разрыва.

Разрыв газопровода подо льдом

В завершение целесообразно кратко остановиться еще на одной особенности аварий на подводных газопроводах, а именно, аварийном истечении газа при наличии сплошного ледяного покрова. Эта задача в различных приближениях решалась в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» с привлечением специалистов ВНИИЭФ в приложении к переходу газопровода $D_y = 1400$ мм, $P = 7,5$ МПа через Байдарацкую губу на базе специальных экспериментов и современных расчетных методик [25]. Установлено, что при разрыве газопровода (на полное сечение) разрушение льда формирующимся подо льдом газовым пузырем происходит при всех его возможных толщинах, при этом зависимость радиуса пузыря ($R_{пуз}$), м, необходимого для разрушения льда толщиной H , м, может быть приблизительно описана как $R_{пуз} = 2,27 \cdot H^{0,7}$ (предел прочности льда принят равным 0,5 МПа [26]).

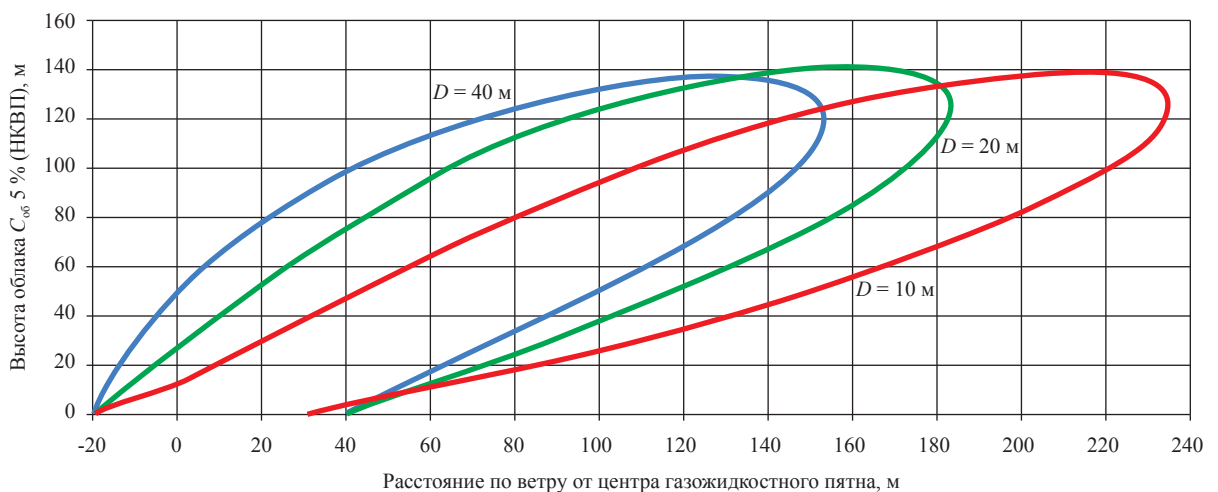


Рис. 7. Моделирование распространения взрывопожароопасного облака в приповерхностном слое – сценарий разрушения газопровода «на мелководье»:
НКВП – нижний концентрационный предел воспламенения

Методические аспекты проведения анализа риска аварий на газопроводах для различных морских объектов (судов, стационарных платформ, береговых объектов) освещены в специальной литературе и здесь не рассматриваются.

Таким образом, проведен анализ методических особенностей моделирования различных фаз развития аварий на подводных газопроводах. Установлено, что разрушение газопровода в отличие от взрывов конденсированных взрывчатых веществ не сопровождается возникновением ударных эффектов в воде и не представляет значимой опасности для других газопроводов и инженерных сооружений.

Выявлено, что при всплытии газа с «большой» глубины его поступление в атмосферу происходит с малой скоростью. За счет разницы плотностей возникают интенсивные конвективные течения, способствующие активному разбавлению газа воздухом до безопасных концентраций уже на небольших расстояниях от газожидкостного пятна. Наоборот, при истечении с малых глубин возникает струйное течение с эжекционным механизмом захвата воздуха. Протяженность пожароопасной зоны при этом также незначительна. При аварийном разрыве газопровода большого диаметра ($P \geq 7,5$ МПа, $D \geq 1,0$ м) подо льдом произойдет разрушение ледяного покрова (толщина льда $\sim 1-1,5$ м), и газ выйдет в атмосферу.

Список литературы

1. Лисанов М.В. Аварийность на морских нефтегазовых объектах / М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.В. Савина, Е.А. Самусева // Oil&Gas Journal Russia. – 2010. – № 5 (39). – С. 20–25.
2. Муйземнек А.Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. – Пенза, 2006.
3. Дубинский С.А. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0 / С.А. Дубинский // – САПР и графика. – 2004. – № 3. – С. 34–38.
4. Сафонов В.С. Моделирование развития аварийных процессов при разрыве подземного магистрального газопровода / В.С. Сафонов, Г.В. Белов, С.В. Ганага // ANSYS solutions (русс. ред.). – М., 2008. – № 2.
5. Сафонов В.С. Моделирование физических эффектов при аварийных разрывах подводных газопроводов / В.С. Сафонов, С.В. Ганага // Вести газовой науки. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 3 (14): Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – С. 212–219.
6. Ганага С.В. Моделирование аварийного разрыва газопровода на подводном переходе / С.В. Ганага, С.А. Ковалев // Применение методов математического моделирования и информатики для решения задач газовой отрасли: сб. науч. ст. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 148–155. – (Вести газовой науки).
7. Maxey W.A. Fracture arrest behavior of underwater pipe lines / W.A. Maxey // Journal Pipe Line Industry. – 1987. – October. – P. 32.
8. Едигаров А.С. Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода / А.С. Едигаров, В.А. Сулейманов // Математическое моделирование. – 1995. – Т. 7. – № 4. – С. 37–52.
9. Зубов В.И. Нестационарные газодинамические процессы в газопроводе на подводном переходе через Черное море / В.И. Зубов, В.Н. Котеров, А.В. Шипилин // Математическое моделирование. – 2001. – Т. 13. – № 4. – С. 58–70.
10. Максимов В.М. Гидродинамическое исследование подводных газовых выбросов: теория и эксперимент / В.М. Максимов, Е.Ф. Лимар, В.И. Исаев // Труды международной конференции по газовым технологиям (5–8 ноября 2002 г.). – Амстердам (Нидерланды), 2002.
11. Сафонов В.С. Обоснование показателей безопасности и анализ риска при эксплуатации подводного перехода газопровода «Россия – Турция» через Черное море / В.С. Сафонов, Г.Э. Одишария, Е.В. Шеберстов, А.С. Едигаров, В.А. Сулейманов // Проблемы разработки, внедрения и функционирования систем управления промышленной безопасностью в организациях, эксплуатирующих опасные производственные объекты. – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003. – С. 124–142.
12. Азбель Д.С. К вопросу о режиме открытых газовых факелов при барботаже / Д.С. Азбель // Теоретические основы химической технологии. – 1971. – Т. 5. – № 5. – С. 708–714.

13. Бытев Д.О. Распад затопленной газовой струи на пузыри в заданном внешнем потоке жидкости / Д.О. Бытев, С.Ю. Макаров, В.Б. Световой // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1986. – Т. 29. – С. 101–104.
14. Гебхарт Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен: в 2-х кн. Кн. 2 / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р.Л. Махаджан, Б. Саммакия. – М.: Мир, 1991. – 528 с.
15. Глишков М.А. Динамика газовой струи в жидкости / М.А. Глишков, Г.С. Сборщиков, И.Н. Неведомская // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1974: Сообщение 1. – № 1. – С. 158–160; Сообщение 2. – № 3. – С. 166–169.
16. Иванников А.В. Экспериментальные исследования истечения газожидкостной струи через слой жидкости: дис. ... канд. тех. наук / А.В. Иванников. – М.: РГУ нефти и газа им И.М. Губкина, 2007. – 141 с.
17. Исаев В.И. Экспериментальное моделирование аварийного фонтанирования газовой скважины через слой жидкости / В.И. Исаев, В.Г. Иванников, А.В. Иванников // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – М.: ВНИИОЭНГ, 2005. – № 10. – С. 35–39.
18. Исаев В.И. Исследование процессов истечения и рассеяния газовой смеси в водной среде при разрывах подводных переходов газо- и конденсаторов / В.И. Исаев, В.М. Максимов, А.И. Митюшин, Е.Ф. Лимар, П.А. Петров // Тр. Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы нефти и газа» (22–25 января 1996 г.). – М., 1996. – Т. 5. – С. 303–320.
19. Сборщиков Г.С. Пузырьковый и струйный режимы истечения газа через боковое затопленное отверстие / Г.С. Сборщиков, И.Н. Неведомская // Цветные металлы. – 1977. – № 4. – С. 16–19.
20. Шеберстов Е.В. Применение модели затопленной струи к оценке последствий подводных выбросов из скважин и трубопроводов / Е.В. Шеберстов // Математическое моделирование и информатика в научных исследованиях и научном проектировании газовой отрасли. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2000. – С. 182–191.
21. Эльперин И.Т. Процессы переноса во встречных струях (газовзвесь) / И.Т. Эльперин, В.Л. Мельцер, Л.Л. Павловский, Ю.П. Енякин. – Минск: Наука и техника, 1972. – 216 с.
22. Еремеев В.И. О соответствии положения верхней границы сероводородной зоны определенной изоклинической поверхности в Черном море по многолетним данным / В.И. Еремеев, А.М. Суворов, А.Х. Халиулин, Е.А. Годин // Океанология. – 1996. – Т. 36. – № 2. – С. 235–240.
23. Едигаров А.С. Моделирование распространения токсичных или горючих веществ в атмосфере при промышленных выбросах на объектах добычи и транспорта газа / А.С. Едигаров // Известия АН России. Энергетика. – 1996. – № 3. – С. 143–155.
24. Едигаров А.С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере / А.С. Едигаров // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. – 1991. – Т. 31. – № 9. – С. 1369–1380.
25. Баженов В.Г. Пакет прикладных программ ДИНАМИКА-2 / В.Г. Баженов, С.В. Зефиоров, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.К. Ломунов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация исследований: всесоюз. межвуз. сб. – Горький: Горьк. ун-т, 1987. – С. 4–13.
26. Маэно Н. Наука о льде / Н. Маэно. – М.: Мир, 1988. – 142 с.