

УДК 622.692.48

Влияние технико-технологических и природно-климатических факторов на специфику развития аварий на трубопроводах, транспортирующих широкую фракцию легких углеводородов

Часть II. Возможные последствия аварийных выбросов из трубопроводов и методы их снижения¹

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: трубопровод, широкая фракция легких углеводородов, моделирование последствий аварий, технологические и природные поражающие факторы, масштаб зоны потенциального поражения, минимизация последствий аварий.

Тезисы. В работе на базе численного решения полномерной системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса проанализировано влияние технико-технологических и природно-климатических факторов на масштабы распространения взрывоопасного облака паров широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) в приземном слое атмосферы при аварийной разгерметизации трубопровода ШФЛУ. С использованием имеющихся экспериментальных данных оценены возможные режимы сгорания паровоздушного облака в свободном и «технологически загроможденном» пространствах и обоснована конфигурация зон термобарического поражения людей и оборудования.

Предложены организационно-технические мероприятия, призванные минимизировать время идентификации аварии и перекрытия задвижками аварийного участка. Сформулированы предложения по направленному выбору прочностных и вязкостных характеристик трубной стали и толщин стенок труб исходя из требований ограничения масштабов аварийных выбросов для трубопроводов ШФЛУ в зонах их сближения с объектами социальной, промышленной и транспортной инфраструктуры.

Основным фактором потенциальной опасности для трубопроводов, перекачивающих термодинамически нестабильные сжиженные углеводородные газы, в том числе широкую фракцию легких углеводородов (ШФЛУ), 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 расширяя зону потенциальной опасности относительно места аварии.

Для ответа на вопрос о степени опасности возможного аварийного выброса ШФЛУ из трубопровода необходимо было дополнительно к части I настоящей статьи¹:

- исследовать влияние различных факторов на масштабы распространения облака паров ШФЛУ в окружающем пространстве;
- обосновать характерные сценарии и последствия его сгорания как в «свободном», так и в «загроможденном» пространствах.

Дисперсия паров ШФЛУ в приземном слое атмосферы исследовалась на базе оригинального численного решения полномерной системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса [1]. Верификация математической модели и разработанной числовой программы по материалам ряда крупномасштабных зарубежных промышленных экспериментов в области дисперсии «тяжелых» газов показала хорошие

¹ См.: 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. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2020. – № 1 (42). – С. 53–69.

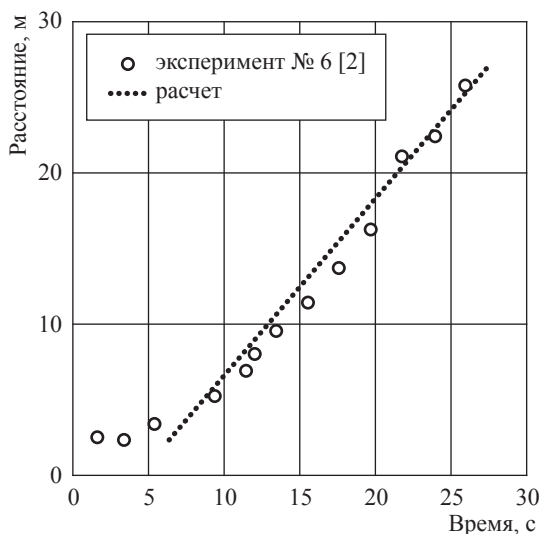


Рис. 2.1. Положение центра облака в зависимости от времени

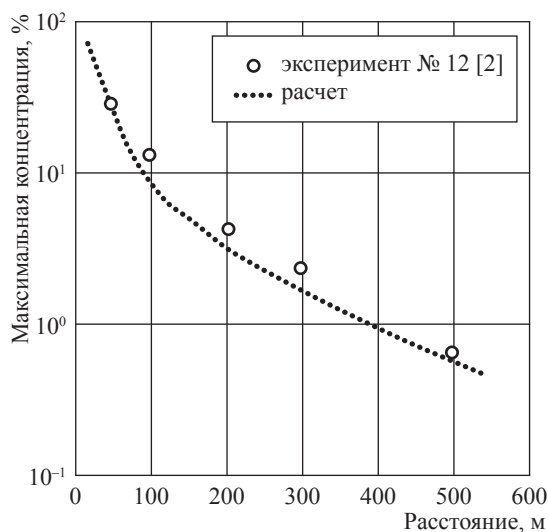


Рис. 2.2. Зависимость максимальной осевой концентрации «примеси» в облаке от расстояния

результаты [2–4]. В частности, расчеты сравнивались с экспериментальными данными о дисперсии «тяжелого» газа в приземном слое атмосферы на специальном полигоне Thorney Island (Великобритания): «мгновенный» выброс 2 тыс. м³ смеси фреона-12 с азотом, исходная плотность которой в 2 раза превышала плотность воздуха (рис. 2.1, 2.2).

Анализ эволюции облаков паров ШФЛУ в атмосфере проводился по результатам предварительного анализа для следующих значений аварийного массового расхода ШФЛУ (G), кг/с: 20, 50, 100 (продольные трещины); 300 и 600 (разрыв «гильотинного» типа). Ранее¹ отмечено, что индикатором факта возникновения аварии на трубопроводе (разгерметизации) для оператора служит падение давления нагнетания на насосной станции вверх по потоку на 2 атм. Анализ гидродинамических процессов в трубопроводе диаметром $d_0 = 426$ мм, рассчитанном на $P_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа, при различных сценариях аварийной разгерметизации (см. ч. I) позволил установить, что в зависимости от интенсивности аварийного истечения ШФЛУ время остановки перекачки продукта и перекрытия аварийной секции трубопровода (τ_*) объективно составит: 20 мин при $G = 20$ кг/с; 14,4 мин при $G = 50$ кг/с; 12,45 мин при $G = 100$ кг/с; 9,8 мин при $G = 300$ кг/с.

Результаты расчетов (А.С. Едигаров) предельных размеров зон загазованности (потенциальной опасности) для различных классов устойчивости атмосферы (по Паскуиллу)

при фиксированной скорости ветра ($W_a = 5$ м/с) и различных интенсивностях истечения жидкости из трубопровода ($d_0 = 426$ мм, $P_{\text{раб}} = 6,4$ МПа, расстояние между задвижками $\Delta \ell = 5$ км) представлены на рис. 2.3, влияние скорости ветра на предельные размеры облака проиллюстрировано рис. 2.4. Под зоной потенциальной опасности в данном случае понимается внешняя граница облака с концентрацией газа ($C_{\text{ШФЛУ}}$) не 1,0 НКПВ, а 0,5 НКПВ². Для пропана это примерно 1,0 % об.

Основанием этому могут служить следующие положения:

- на фронтальной границе облака вследствие выраженных турбулентных процессов наблюдается высокая неоднородность концентрации паров в воздухе (отношение текущей концентрации к средней может варьироваться в пределах от 2 до 4);
- при воспламенении облака от внешнего энергетического источника (как правило, по фронту движения) его сгорание в свободном пространстве протекает с относительно небольшими скоростями и в узкой зоне в виде «стены огня» или «термика» без выраженных эффектов внешнего термобарического воздействия.

В качестве подтверждения этих положений ниже представлены результаты измерений скорости сгорания метано- и пропано-воздушных облаков, полученные в ходе промышленных

² НКПВ – нижний концентрационный предел воспламенения газа в воздухе.

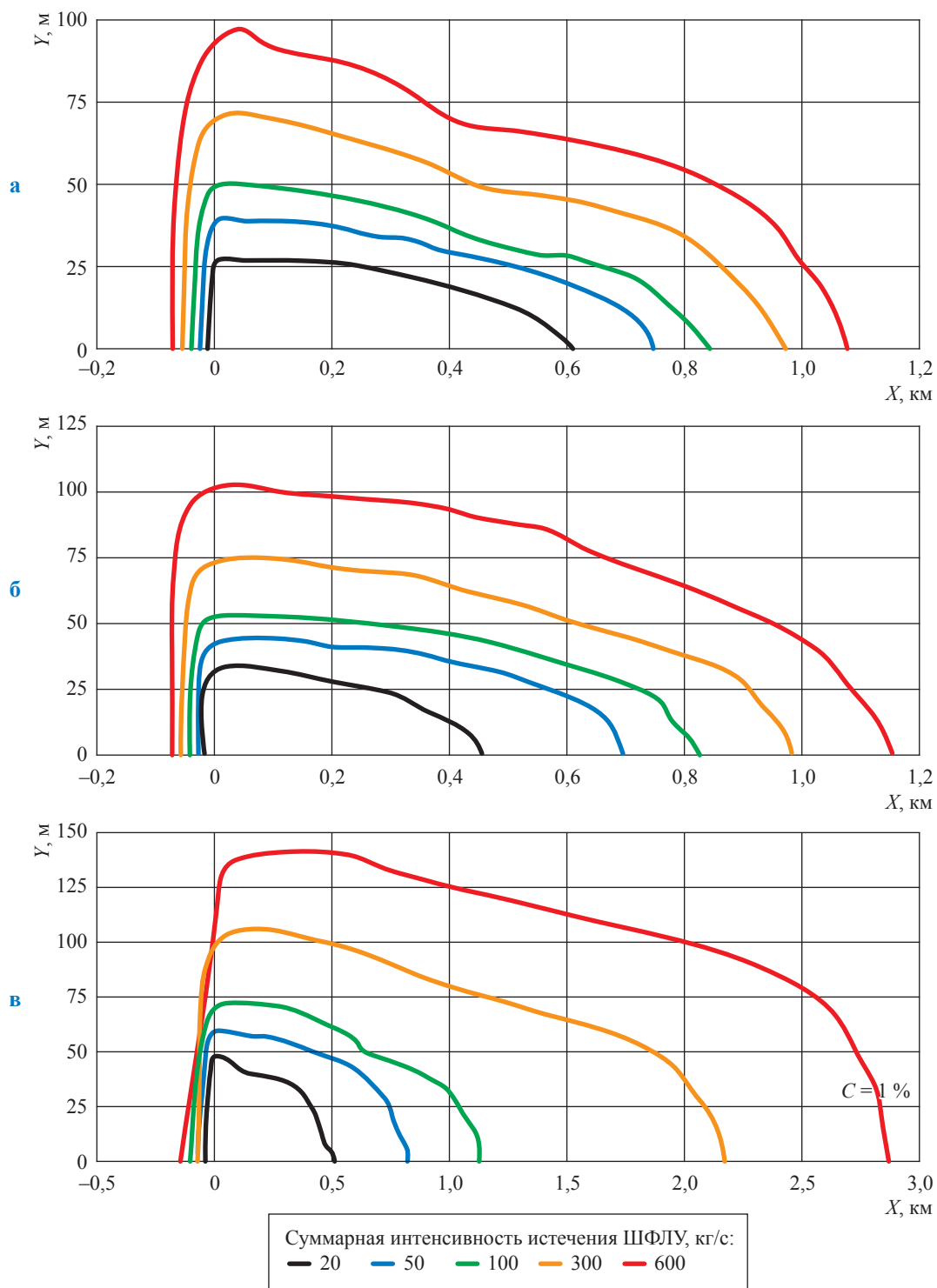


Рис. 2.3. Влияние интенсивности истечения ШФЛУ из трубопровода на предельные размеры облака для классов устойчивости атмосферы В (а), D (б) и F (в) при $W_a = 5$ м/с

экспериментов на полигонах в США, Франции и Англии [5–20]. В большинстве этих экспериментов при поджигании облака от открытого источника огня (факела) на вытянутом по ветру крае наблюдалось устойчивое горение паров по фронту (нормально по отношению

к направлению ветра) в виде «термика» без заметных колебаний скорости устойчивого движения фронта пламени (скорости воспламенения смеси горючего в воздухе – ϑ) (рис. 2.5). Практически пропорциональное возрастание ϑ с увеличением W_a ($\vartheta \sim 2,0 \dots 2,5 W_a$) указывает

на дополнительную турбулизацию облака и его активное смешение с воздухом. Относительно скромные значения ϑ свидетельствуют о явно дефлаграционном характере горения. При воспламенении облака не по передней кромке, а в «глубине» (в области между верхним и нижним концентрационными пределами воспламенения) его скорость сгорания возрастает, но только до момента прорыва полуэллиптического фронта горения за пределы толщины

облака (2...4 м). После этого процесс горения разделяется на два фронта (по ветру и против ветра) и по своей физической сущности аналогичен рассмотренному выше. Предельные значения скоростей горения при поджигании облака в глубине будут соответствовать, видимо, сценарию горения стехиометрической смеси конкретного углеводорода с воздухом. В лабораторных опытах компаний «Шелл» и LLNL эти скорости для метана и пропана составляли 30...35 м/с.

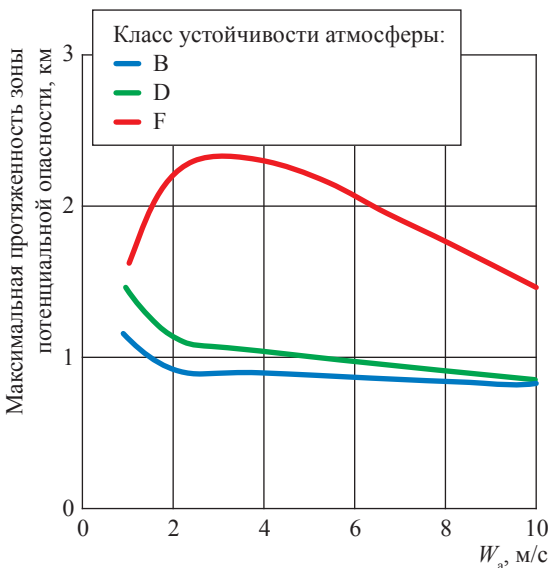


Рис. 2.4. Влияние метеорологических характеристик атмосферы на протяженность зоны потенциальной опасности: $G = 300 \text{ кг/с}$

На рис. 2.6 представлены данные одного из измерений (облака паров СПГ, серия Coyote [6]) воздействия радиационного излучения движущегося фронта пламени в облаке на единичные площадки на поверхности грунта. Как видно, даже вблизи горящего облака

$$(20 \text{ м}) \text{ интегральная тепловая доза } Q = \int_0^{\tau} q(\tau) dt$$

не представляла серьезной опасности для людей и технологического оборудования.

На практике попадание людей в зону горения облака на открытом пространстве, как правило, имеет летальный исход. Уровень поражения людей, находящихся в укрытиях (зданиях, подвалах и т.п.), будет заведомо ниже, поскольку, например, кирпичные здания разрушаются при внешних избыточных давлениях 30...40 кПа, т.е. при давлениях, почти в 10 раз превышающих наблюдаемые в отмеченных выше экспериментах. Однако при этом нельзя исключить затекание газа внутрь помещений

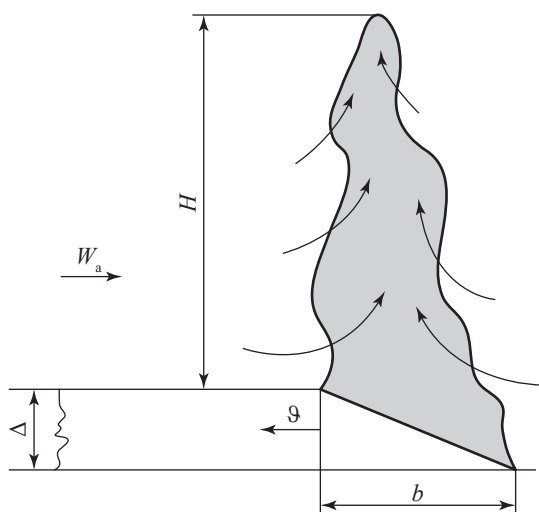
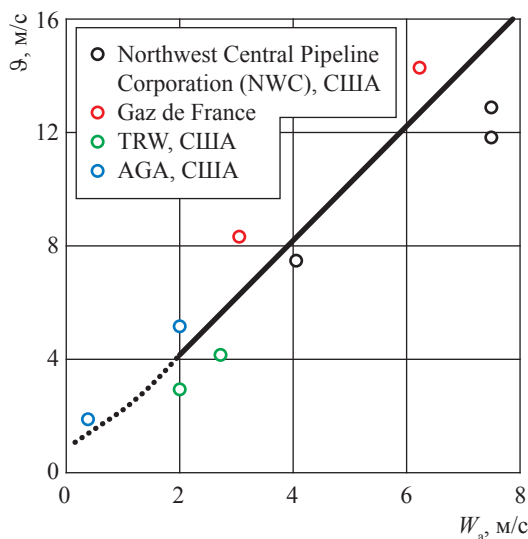


Рис. 2.5. Обобщение экспериментальных данных по скорости распространения фронта пламени в облаке против ветра



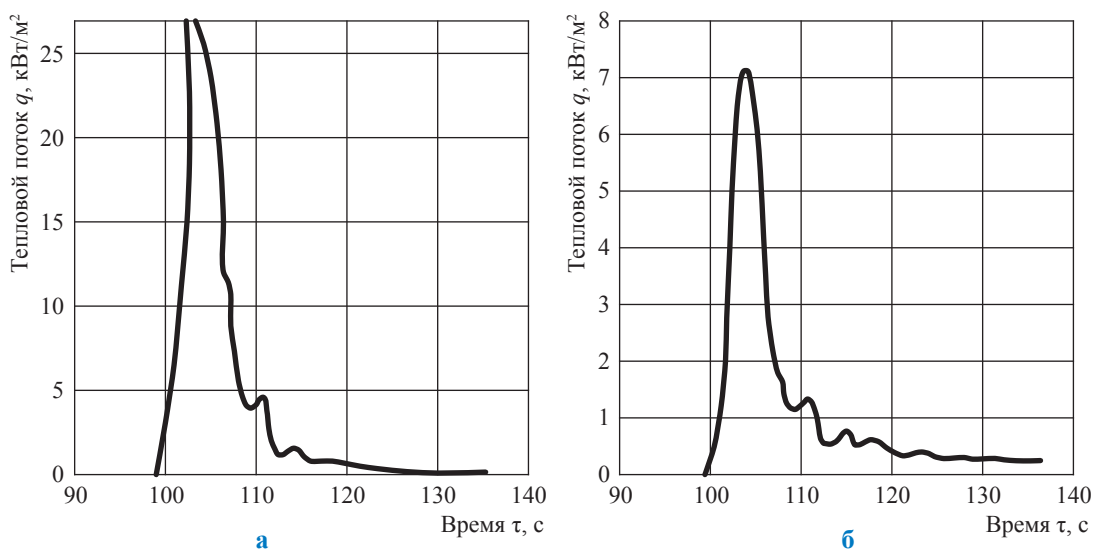


Рис. 2.6. Тепловой поток на уровне поверхности грунта от горящего облака паров сжиженного природного газа (СПГ) на расстояниях 20 м (а) и 60 м (б) перпендикулярно фронту пламени

с последующим его воспламенением. В этой связи принималось, что в пределах площади горящего облака будет иметь место «абсолютное» поражение всех людей вне зависимости от их местонахождения. Что касается вторичных эффектов поражения (вне зоны горения) за счет радиационного излучения пламени и барического воздействия воздушной волны сжатия, то, как показали оценки, для дефлаграционного режима горения облака в открытом пространстве они могут оказать определенное влияние на масштабы поражения лишь в непосредственной близости от границ сгорающего облака.

Таким образом, расчет зон негативного воздействия (поражения) по граничной концентрации 0,5 НКПВ позволяет косвенно учитывать дополнительные эффекты внешнего термобарического воздействия облака при его сгорании в «свободном» пространстве.

Заметим также, что облака «тяжелых» углеводородных газов достаточно четко идентифицируются визуально, и у человека, как правило, имеются необходимые возможности адекватного реагирования на возникшую ситуацию и выхода из зоны прямого поражения.

В приложении к условиям трассы возможны случаи прохождения трубопровода ШФЛУ, например, по полям, зарастающим густым кустарником или мелколесьем, когда при аварийном разрыве трубопровода потенциальное облако углеводородных паров будет

двигаться и сгорать в сильно загроможденном пространстве. За счет резкой интенсификации турбулентных процессов скорость горения облака может при этом существенно возрасти, что будет сопровождаться и значительным увеличением барического воздействия на окружающую среду. Следует, однако, подчеркнуть, что речь идет в данном случае о загромождении пространства периодически повторяющимися однородными относительно мелкими элементами, по размерам соизмеримыми с масштабом турбулентного вихря. Согласно опубликованным экспериментальным данным [21–28], режим сгорания такого облака останется дефлаграционным, однако скорость движения фронта пламени ϑ может возрасти при этом до 150...250 м/с, а уровень избыточного давления в воздушной волне сжатия – составит 20...30 кПа. Такое избыточное давление соответствует слабой и средней степеням повреждений жилых и административных зданий с вероятностью гибели находящихся там людей, не превышающей 5%. Для людей на открытой местности вне зоны горения облака вероятность летального барического воздействия составит при этом не более 1% [27].

Особо отметим также, что типовое расположение технологического оборудования, зданий, сооружений на различных промышленных площадках или же жилых зданий и элементов соответствующей инфраструктуры в населенных пунктах классифицируется как слабое

загромождение. При сгорании паровоздушных облаков в подобных пространствах возникающее избыточное давление будет находиться в пределах менее 10 кПа, что не может привести к сколь-нибудь значительному ущербу.

При достижении фронтом горения облака места разрыва трубопровода возникнет прямое горение ШФЛУ с поверхности разлива (испарения). В первом приближении при этом можно считать скорость выгорания ШФЛУ постоянной (~10 мм/мин), отношение высоты видимой части пламени пожара к диаметру разлива равным 2,3...2,5, излучение с единицы поверхности пламени (для модели цилиндрического излучателя) – 50 кВт/м² (для пропана).

Из представленных на рис. 2.3, 2.4 данных следует, что линейные размеры зон потенциальной опасности при разрыве трубопровода ШФЛУ диаметром $d_0 = 426$ мм при $P_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа могут достигать для наиболее неблагоприятных сочетаний метеорологических характеристик атмосферы ~2,8 км. Однако следует учитывать, что в реальных условиях между классами устойчивости атмосферы и вероятностью возникновения тех или иных скоростей ветра существуют достаточно четкие статистически значимые корреляции в разрезе года. При этом вероятность сочетания класса устойчивости атмосферы F и значений $W_a = 2...4$ м/с в разрезе года, как правило, мала. В качестве примера на рис. 2.7 приведены корреляции, используемые обычно при анализе

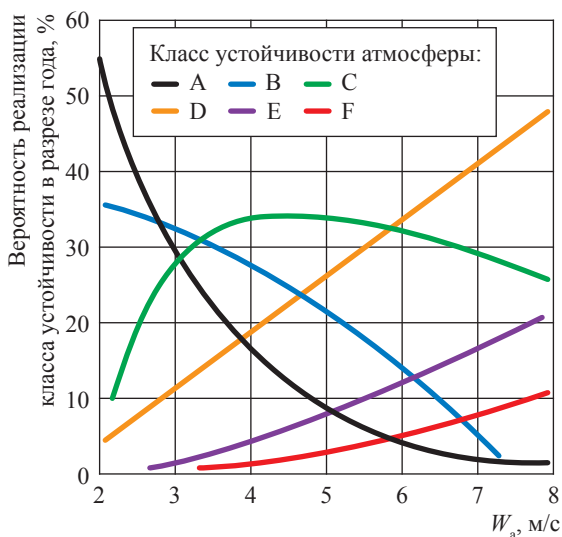


Рис. 2.7. Распределение классов устойчивости атмосферы в зависимости от скорости ветра (Р. Макнаут)

риска аварий на опасных производственных объектах в США [29]. По действующим в США нормативам, сочетание метеопараметров с долей повторяемости в разрезе года менее 5 % при расчетах показателей риска не учитывается. Данные метеостанций в России [30] несколько отличаются от США, особенно в разрезе года, однако общие закономерности сохраняются. Если ориентироваться на наиболее часто реализуемые на практике классы устойчивости атмосферы B и D, предельные размеры зон газозагрязненности для трубопровода ШФЛУ не превышают 1,0...1,2 км.

Одним из известных методов уменьшения масштабов воздействия на окружающую среду аварий на трубопроводах для перекачки стабильных углеводородов (нефтей, нефтепродуктов) является снижение потенциального объема стока за счет дифференцированной расстановки отсекающей арматуры по трассе трубопровода с обязательным учетом специфики рельефа трассы на конкретных участках (гидростатического напора при «самотечном» сливе). Однако для трубопровода ШФЛУ даже после перекрытия аварийного участка давление в нем не падает до атмосферного, а становится равным равновесному давлению насыщенных паров (при температуре грунта $\bar{T}_{\text{гр}} = 280$ К для рассматриваемой ШФЛУ¹ $P_{\text{нас.п}} = 4,5...5,5$ атм), что может привести в ряде случаев к практически полному опорожнению отсеченного участка трубопровода.

Результаты расчетов максимального дрейфа облака в зависимости от расстояния между линейными задвижками (Δl) и от начальной (максимальной) интенсивности аварийного истечения ШФЛУ представлены на рис. 2.8. Предполагались адекватное поведение оператора на НС вверх по потоку и остановка перекачки с перекрытием аварийного участка через 5 мин после получения соответствующей информации о падении давления нагнетания на $\Delta P = 2$ ат.

Анализ этих данных свидетельствует, что влияние частоты расстановки запорной арматуры существенно только при больших интенсивностях истечения ШФЛУ – примерно 300 кг/с, т.е. при разрывах трубопровода гильотинного типа. В этом случае расстановка задвижек, например, через каждый километр трассы может привести к снижению протяженности зоны потенциальной опасности почти в 2 раза. Однако сценарий разрыва «гильотинного» типа

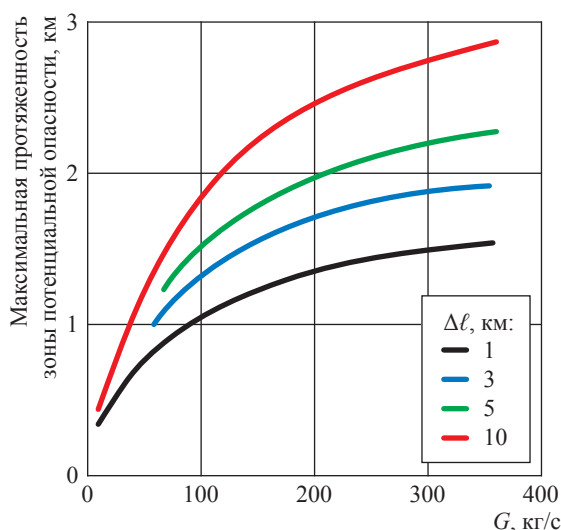


Рис. 2.8. Влияние интенсивности истечения ШФЛУ из трубопровода на максимальную протяженность зоны потенциальной опасности ($C = 1\%$ об.) при различных расстояниях между запорной арматурой: $W_a = 2$ м/с; класс устойчивости атмосферы F; $d_0 = 426$ мм; $P_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа; расстояние между НС $L = 200$ км; расстояние от НС до места разрыва $L^* = 100$ км

относится к разряду гипотетических и представляет интерес, по всей видимости, только для случаев прохождения трассы в зонах повышенного влияния факторов механического воздействия. В случае же возникновения наиболее реальных утечек из продольных трещин – в диапазоне от 20 до 100 кг/с – увеличение частоты расстановки запорной арматуры оказывает значительно меньшее влияние на снижение линейного размера зоны потенциальной опасности. Причиной этого является следующее обстоятельство. Увеличивая частоту расстановки запорной арматуры, мы уменьшаем общий объем выброса ШФЛУ из аварийного участка трубопровода. Однако время напорного режима истечения (до момента перекрытия аварийного участка) формально остается прежним. В результате масса ШФЛУ, выброшенная за этот период из трубопровода, оказывается уже «достаточной» для формирования протяженной взрывоопасной зоны. В этой связи, как уже отмечалось, необходимо использовать автоматизированную систему перекрытия линейных задвижек, которая, в отличие от «адекватной» реакции оператора на НС, будет срабатывать по сигналам датчиков (в рамках, например, единой оптоволоконной системы контроля состояния трубопровода

вдоль трассы), расположенных, в том числе, в местах установки отсекающей арматуры и реагирующих на сугубо специфические процессы падения давления в аварийном участке трубопровода ШФЛУ при прохождении как первичной (лидирующей – 600 м/с), так и вторичной (80... 120 м/с) волн давления.

В расчетах, проиллюстрированных рис. 2.3, 2.4, 2.8, принималось, что контроль и управление аварийными процессами осуществляются с линейного диспетчерского пункта, реакция оператора на НС (вверх по потоку) на аварию адекватна ситуации и через интервал времени (τ_*) = $\tau_0 + \Delta t$ при $\Delta t = 5$ мин (см. ч. I) происходят остановка перекачки и перекрытие задвижек.

Вместе с тем известно, что линейная трубопроводная арматура и системы ее привода, а также системы контрольно-измерительных приборов и аппаратуры на НС имеют ограниченные показатели надежности [31], т.е. могут в свою очередь привести к отказу. Необходимо также учитывать возможное негативное влияние «человеческого фактора».

В связи с изложенным было дополнительно проанализировано влияние общего времени остановки перекачки и перекрытия задвижек (τ_*) на аварийном участке (на перегоне между НС) на масштабы зон потенциальной (газовой) опасности. Расчеты проведены для случая разгерметизации трубы по «гильотинному» типу (300 кг/с). Для получения верхней оценки при этом условно предполагалось, что интенсивность аварийного истечения ШФЛУ сохраняется постоянной (критической¹) вплоть до момента остановки перекачки. Рассмотрены следующие временные интервалы перекрытия аварийного участка:

- 1...3 мин в случае наличия и успешного срабатывания аварийной автоматики закрытия ближайших линейных задвижек при расстоянии между ними 5 или 10 км;
- 5...20 мин в случае «адекватной» реакции оператора на НС вверх по потоку от точки разрыва на перегоне между НС длиной 200...250 км;
- 30...60 мин в случае «неадекватной» реакции оператора на НС, т.е. при продолжении перекачки и, более того, активном поддержании ее номинального режима (для $d_0 = 426$ мм при $P_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа номинальный расход ШФЛУ ≈ 100 кг/с) вплоть до включения резервных насосных агрегатов (сценарий аварии под Уфой).

Результаты расчетов (рис. 2.9) показывают, что своевременная реакция оператора на аварию позволяет значительно ограничить зону потенциальной опасности. При этом речь идет в первую очередь о прекращении перекачки. Очевидно также, что максимальный положительный эффект достигается, как указывалось выше, при использовании блокирующей аварийной автоматики линейных задвижек.

Перейдем к анализу мероприятий, снижающих вероятность возникновения аварий и тяжесть их последствий. Меры общего снижения риска аварий на трубопроводах ШФЛУ на стадии проекта определяются: выбором трассы, т.е. удаленностью трубопровода от населенных пунктов, объектов промышленной и транспортной инфраструктуры; специальными требованиями на отдельных участках трассы к глубине укладки трубопровода, его усиленным антикоррозионным покрытиям, прочностным характеристикам металла труб и толщине их стенок; специальными требованиями к диагностике и управлению техническим состоянием трубопровода, а также контролю гидравлических процессов перекачки.

На стадии эксплуатации к мероприятиям, направленным на снижение риска, можно отнести: регулярную внутритрубную диагностику с применением дефектоскопов нового

поколения, а также иные методы контроля целостности трубопровода; оснащение транспортной системы современной автоматизированной системой управления технологическими процессами; подготовку персонала к действиям в условиях возникновения различного рода чрезвычайных ситуаций; информирование населения и органов местного самоуправления региона, а также администрации строительных и землеустроительных организаций о рисках, связанных с эксплуатацией данного трубопровода, и контроль их деятельности в полосе прохождения трассы, включая использование беспилотных воздушных средств наблюдения.

Заметим, что принципиально возможны два основных варианта развития процесса разгерметизации трубопровода: 1) образование «свища» (так называемый принцип «течь перед разрушением»); 2) «протяженное» разрушение. Первый реализуется при условии, что длина поверхностного дефекта (коррозионного дефекта, задира, царапины и т.п.) в момент разгерметизации не превышает некоторого критического значения, характерного для данной трубы и для соответствующего значения $P_{\text{раб}}$. Образовавшийся сквозной дефект продолжает далее развиваться (увеличиваться), но уже только за счет имеющих место в процессе эксплуатации циклических нагрузок. В противном случае реализуется второй вариант, когда после разгерметизации стенки сразу начинается дальнейшее разрушение металла и сквозная «трещина» распространяется самопроизвольно на расстояние, заведомо превышающее размеры исходного дефекта. При этом протяженность разрыва будет определяться вязкостью и прочностными характеристиками трубной стали, толщиной стенки трубы и свойствами транспортируемого продукта, а также условиями, при которых происходит процесс разрушения и может в принципе достигать значений 1,5...2,0 калибра и более.

Исходя из отмеченных положений предлагается следующий алгоритм решения задачи направленного ограничения зон потенциальной опасности от трубопроводов ШФЛУ. На основании комплексного числового анализа с учетом расположения защищаемого объекта относительно трубопровода, а также инфраструктурного окружения (промышленные и сельскохозяйственные предприятия, транспорт) обосновывается корреляция между местом возникновения аварии, возможными

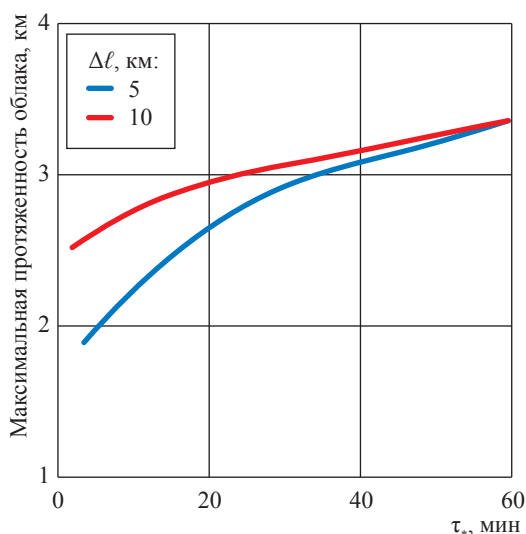


Рис. 2.9. Влияние времени остановки перекачки и отсечения аварийного участка на протяженность зоны потенциальной опасности ($C = 1\%$ об.) при различных расстояниях между запорной арматурой: $G = 300$ кг/с; $W_a = 2$ м/с; класс устойчивости атмосферы F

размерами сквозных дефектов, временем остановки перекачки, региональными метеорологическими характеристиками и размерами зон потенциальной опасности. При этом идентифицируется сочетание условий, при которых появляется возможность «захвата» облаком как фактором потенциальной опасности рассматриваемого реципиента риска. На основании этого анализа для конкретного участка трассы вводятся ограничения на масштабы аварийного истечения ШФЛУ и потенциальные размеры облака, а следовательно, и на факт попадания реципиента в зону захвата этого облака. Подобные ограничения могут, например, полностью исключать разрывы только «гильтинного» типа либо дополнительно устанавливать предельные размеры продольных трещин.

Соответственно, ставится обратная задача: подобрать условия заглубления трубопровода в грунт и методы его защиты от внешних механических повреждений, а также обосновать основные технические характеристики трубопровода таким образом, чтобы исключить образование «протяженных» трещин размерами, например, более 0,5 калибра и тем самым исключить утечки интенсивностью более 50 кг/с (для $d_0 = 426$ мм при $P_{\text{раб}} \leq 6,4$ МПа). А это, в свою очередь, ограничивает возможность распространения взрывоопасного облака даже при самых неблагоприятных метеоусловиях на расстоянии более 1000 м (см. рис 2.3, 2.4). Таким образом, уже на стадии разработки исходных требований к характеристикам трубопровода вводится известный в методологии риска принцип «внутренне присущей безопасности», или «физически ограниченной меры опасности».

Опыт известной фирмы British Gas свидетельствует о том, что при увеличении толщины стенки трубы (δ) до 12 мм практически исключается вероятность повреждения тела трубы стандартной землеройной техникой (в том числе возможность пробоя стенки трубы зубом

экскаватора). Кроме того, по информации западных компаний, с увеличением значения δ , мм, частота аварийных отказов на трубопроводах уменьшается в пропорции $\sim 1/\delta^{2,5}$. Из этих данных следует, что при двукратном увеличении δ частота аварийных утечек уменьшается в 5...6 раз. С учетом того, что при этом спектр утечек сдвигается в область меньших значений, показатели риска аварий снижаются, по расчетам, еще в 2...3 раза. Таким образом, в целом применение труб повышенной толщины и повышенного качества может привести к уменьшению показателей риска в 7...8 раз.

Следует также подчеркнуть, что рассматриваемое увеличение значения δ увеличивает и критическую длину поверхностного дефекта, который при прорастании внутрь, т.е. при разгерметизации трубы, не даст в дальнейшем трещине развиваться по инерции.

В таблице приведены результаты стандартных расчетов толщин стенок трубопровода диаметром $d_0 = 426$ мм для $P_{\text{раб}} = 6,4$ МПа согласно СНиП 2.05.06-85.

Как показали расчеты специалистов ВНИИГАЗа, проведенные методом Кифнера [32, 33], для трубы размерами $d_0 = 426$ мм, $\delta = 12$ мм при ударной вязкости 24,5 Дж/см² критическая длина поверхностного дефекта составит 219 мм для труб класса прочности K_{42} и 241 мм для труб класса прочности K_{52} . Таким образом, по отношению к номинальным значениям δ (см. таблицу) при увеличении δ до 12 мм критическая длина трещин возрастает в 1,5...1,7 раза. Отметим также, что скорость общей коррозии для коррозионно-активных грунтов средней полосы России составляет от 0,01 до 0,1 мм/год; для «питингов» и «язв» – $\sim 0,1$ мм/год. Скорость «подрастания» трещин при цикличности колебания давления 1 раз в сутки составляет $\sim 8 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл.

Таким образом, есть все основания полагать, что увеличение δ существенно

Класс прочности трубной стали	δ , мм	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести трубной стали, МПа	Относительное удлинение металла трубы, %	Критическая длина трещины (по Кифнеру), мм
K_{34}	7,0...10,8	333	206	24	~ 150
K_{38}	6,3...9,7	372	235	22	
K_{42}	5,7...8,8	412	245	21	
K_{50}	4,8...7,5	490	343	20	
K_{52}	4,6...7,2	510	353	20	
K_{54}	4,5...6,9	530	363	20	
K_{56}	4,3...6,7	549	422	20	

продолжает период перехода исходного «некритического» дефекта в фазу потери трубопроводом конструктивной устойчивости и, тем самым, увеличивает возможность своевременной диагностики и ремонта трубопровода. Очевидно, что при этом возрастает значимость своевременного и качественного проведения внутритрубной дефектоскопии.

На основании изложенного можно утверждать, что современные методы управления показателями конструктивной надежности трубопроводов ШФЛУ и обоснование специальных компенсационных мероприятий при их эксплуатации позволяют обеспечить заданные показатели промышленной (пожарной) безопасности с учетом региональной, природно-климатической и инфраструктурной специфики прокладки трубопроводов.

В этой связи бытующее в определенных кругах мнение, что минимальные безопасные расстояния для трубопроводов ШФЛУ должны назначаться по наихудшему сценарию аварии («гильотинный» разрыв трубы, наиболее неблагоприятные сочетания метеоусловий, сгорание облака в детонационном режиме и т.п.), т.е. без учета региональных и инфраструктурных особенностей и специальных мероприятий по улучшению конструктивной надежности объекта, представляется ничем не обоснованными и противоречит современной концепции проектирования опасных производственных объектов.

На основании представленных исследований могут быть сделаны следующие общие выводы:

1) результаты многочисленных промышленных экспериментов, направленных на изучение дисперсии и горения протяженных «тяжелых» углеводородных облаков, свидетельствуют о том, что в «свободных» неограниченных пространствах горение облака протекает исключительно в дефлаграционном режиме, в узкой полосе, фронтально направлению ветра и с относительно низкой скоростью (25...30 м/с) без выраженного термобарического воздействия на окружающую среду.

При «сильном» загромождении пространства в направлении движения паровоздушного облака скорость его сгорания может возрасти в 5...10 раз. Однако режим горения облака останется при этом дефлаграционным, а формируемая в окружающем пространстве волна сжатия не выйдет за пределы 15...25 кПа, что может вызвать разрушения средней степени тяжести жилых и административных зданий с не превышающей 5 % вероятностью гибели находящихся там людей;

2) для конкретного проекта при обосновании влияния метеорологических факторов на максимальную протяженность распространения углеводородного облака в приземном слое атмосферы следует ориентироваться исключительно на региональную метеоинформацию, причем с обязательным учетом корреляций по повторяемости в разрезе года между классами устойчивости атмосферы и скоростями ветра;

3) уменьшение расстояний между местами установки отсекающей арматуры по трассе трубопровода оправдано только в случаях высокой вероятности внешних механических воздействий на трубопровод. При этом дополнительно должны быть приняты достаточные меры для предотвращения такого воздействия;

4) наиболее эффективной мерой снижения времени напорного истечения ШФЛУ при авариях на магистральных трубопроводах является установка на линейных задвижках аварийной автоматики, срабатывающей по характерным изменениям давления при гидравлической разгрузке трубопровода. Дополнительное снижение общего объема аварийного выброса может быть обеспечено также за счет оптимальной расстановки запорной арматуры;

5) современные методы расчета показателей конструктивной надежности трубопроводов позволяют с высокой достоверностью контролировать развитие коррозионных процессов, а также подобрать вязкостные и прочностные характеристики металла труб, исключая инерционную фазу раскрытия и ограничивающие предельные размеры продольных трещин, а следовательно и масштабы зон потенциальной опасности вокруг трубопровода ШФЛУ.

Список литературы

1. Едигаров А.С. Численный расчет турбулентного течения холодного тяжелого газа в атмосфере / А.С. Едигаров // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1991. – Т. 31. – № 9. – С. 1369–1380.
2. Gotaas Y. Heavy gas dispersion trials at Thorney Island / Y. Gotaas // Journal of Hazardous Materials. – 1985. – Т. 11. – Спецвыпуск. – С. 436. – DOI: 10.1016/0304-3894(85)85050-0.
3. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual. – Hague: Shell Internationale Research Maatschappij BV, 1994.
4. Carn K.K. Estimates of the mean concentration and variance for the Thorney Island phase 1, dense gas dispersion experiments / K.K. Carn // Journal of Hazardous Materials. – 1987. – Т. 16. – Спецвыпуск. – С. 75–101. – DOI: 10.1016/0304-3894(87)80028-6.
5. McRae T.G. Analysis of large-scale LNG/Water RPT explosions / T.G. McRae, N.C. Goldwire Jr., R.P. Koopman // ASME winter annual meeting, New Orleans, LA, USA, 9 Dec. 1984. – UCRL 91832.
6. Goldwire H.C. Jr. Coyote series data report LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn, and rapid phase transition / H.C. Goldwire Jr., H.C. Rodean, R.T. Cederwall, et al. – USA, CA: Lawrence Livermore National Lab., 1983. – UCID-19.
7. Rodean H.C. Vapor burn analysis for the Coyote series LNG spill experiments / H.C. Rodean, W.J. Hogan, P.A. Urtiew, et al. – USA, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1984. – UCRL-53530.
8. Morgan D.L. Phenomenology and modeling of liquefied natural gas vapor / D.L. Morgan, L.K. Morris, S.T. Chan, et al. – USA, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1984. – UCRL-53581.
9. An experimental investigation of atmospheric diffusion and ignition of boil-off associated with a spillage of liquefied natural gas: film section of the Report no. 08072-7 for the AGA. – Lyndhurst, Ohio: TRW, Inc., November 1968.
10. Hansen O.R. CFD-modeling of LNG dispersion experiments / O.R. Hansen, J.A. Meiheim, I.E. Storvik // 7th Topical conference on natural gas utilization: AIChE spring meeting, Houston, Texas, 22–26 April, 2007.
11. Segeant R.J. An experimental investigation of atmospheric diffusion and ignition of boil-off associated with a spillage of liquefied natural gas / R.J. Segeant, and F.E. Robinett // Film section of the Report № 08072-7 prepared for American Gas Association. – TRW, Inc., 1968.
12. Essais d'Épandage de Gaz Naturel Liquefié Sur de Sol: Report on the experiments conducted by Gaz de France. – Paris: Gaz de France, September 1972.
13. Lees F.P. Lees' loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment, and control / F.P. Lees. – Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 1996.
14. Davenport J.A. A study of vapour cloud incidents: a CEP technical manual / J.A. Davenport. – Loss Prevention. – 1977. – № 11. – С. 39–49.
15. Gugan K. Unconfined vapour cloud explosions / K. Gugan. – Reading, U.K.: Institution of Chemical Engineers: George Godwin Ltd., 1987. – С. 118.
16. Strehlow R.A. Unconfined vapour cloud explosions – An overview / R.A. Strehlow. – Elsevier Inc., 1973. – [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(73\)80107-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(73)80107-9)
17. Lind C.D. Explosion hazards associated with spills of large quantities of hazardous materials, Phase II / C.D. Lind, J.C. Whitson. – July 1977. – Report No CG-D-85-77.
18. Gullen W.D. The public inquiry into the piper alpha disaster / Lord W.D. Gullen; Department of Energy. – London: HMSO, 1990. – <https://www.hse.gov.uk/offshore/piper-alpha-public-inquiry-volume1.pdf>
19. Wingerden C.J.M., van. Simulation of an accidental vapor cloud explosion / C.J.M. van Wingerden, H.-C. Salvesen, R. Perbal // Process safety progress. – 1995. – Т. 14. – № 3. – С. 173–181.
20. Bakke J.R. A study on the effect of trees on gas explosions / J.R. Bakke, K. van Wingerden, P. Hoorelbeke, et al. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2010. – Т. 23. – С. 878–884.
21. Бесчастнов М.В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов / М.В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1983. – 471 с.
22. Гамера Ю.В. К вопросу о барических воздействиях при дефлаграционном горении метана на опасных производственных объектах газотранспортных систем / Ю.В. Гамера, С.В. Овчаров // Вести газовой науки. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – № 1 (17): Управление техническим состоянием и целостностью газопроводов. – С. 66–70.
23. Якуш С.Е. Гидродинамика и горение газовых и двухфазных выбросов в открытой атмосфере: дис. ... д.ф.-м.н.: 01.02.05 / С.Е. Якуш. – М., 2000.

24. Термические и радиационные ожоги / под ред. Л.И. Герасимовой, Г.И. Назаренко. – М.: Медицина, 2005. – 124 с.
25. Козлитин А.М. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов. – Саратов: СГТУ, 2000. – 216 с.
26. Козлитин А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин. – Саратов: СГТУ, 2002. – 180 с.
27. Козлитин А.М. Анализ методик оценки последствий взрывов на потенциально опасных объектах техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин // Устойчивое экологическое развитие: региональные проблемы: сб. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 34–62.
28. Козлитин А.М. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование и оценка: детерминированные методы количественной оценки опасностей техносферы: учеб. пособие / А.М. Козлитин, Б.Н. Яковлев; под ред. П.И. Попова. – Саратов: СГТУ, 2000. – 124 с.
29. McNaughton D.J. Errors inherent in wind inputs to unlinked source and dispersion models / D.J. McNaughton // J. Air Waste Manage. Assoc. – 2010. – №. 7. – С. 1018–1020.
30. Бызова Н.Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н.Л. Бызова, Е.К. Гаргер, В.Н. Иванов. – Л.: Гидрометеониздат, 1991. – 278 с.
31. Черняев В.Д. Эксплуатационная надежность магистральных нефтепроводов / В.Д. Черняев. – М.: Недра, 1992. – 272 с.
32. Kiefner J.F. // Proc. of Forth Symposium on Line Pipe Research. – American Gas Association, 1969. – Catalogue № L30075.
33. O'Grady T.J. Pressure calculation for corroded pipe developed / T.J. O'Grady, T.H. Daniel, J.F. Kiefner // Oil and Gas Journal. – 1992. – October 19. – <https://www.ogi.com/home/article/17219618/evaluating-corroded-pipeconclusion-pressure-calculation-for-corroded-pipe-developed>

Impact of engineering and environmental-climatic factors to specifics of failures at the pipelines transporting natural gas liquids.

Part II. Possible consequences of emergency discharge from pipelines.

Ways to decrease probability and effects of an accident¹

V.S. Safonov

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

Abstract. Basing on a numerical solution of a full-sized differential Navier-Stokes equation system the author analyzes impact of technical and natural-environmental factors to propagation of a fire-hazardous vapor cloud of a broad fraction of light hydrocarbons (BFLH) in the ground atmospheric layer in case of an accidental unsealing of a BFLH pipeline. Using test results, he estimates for such a vapor-air cloud the possible modes of burning either in free or in congested space, and substantiates configuration of a thermobaric casualty circle in respect to human beings.

The author grounds technical and managerial measures aimed at minimization of time necessary to identify a failure and to shut off a faulty sector with the stop-gate valves. A scheme of shut-off valves location is reasoned. There are also few suggestions concerning selection of strength and viscosity characteristics for pipe steel, and thickness of pipe walls. They base on the requirements for maximal permissible dimensions of longitudinal cracks, and amounts of emergency discharge for BFLH pipelines within the zones of their alignment to other social, industrial and transport facilities.

¹ See also: SAFONOV, V.S. Impact of engineering and environmental-climatic factors to specifics of failures at the pipelines transporting natural gas liquids [Vliyaniye tekhniko-tehnologicheskikh i prirodno-klimaticheskikh faktorov na spetsifiku razvitiya avari na truboprovodakh, transportiruyushchikh shirokuyu fraktsiyu legkikh uglevodorodov]. Pt. I: Peculiar hydrodynamic and heat-mass-exchange processes in case of a pipeline breakdown [Osobennosti protekaniya gidrodinamicheskikh i teplomassoobmennykh protsessov pri avariynykh razruvakh truboprovodov]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2018, no. 2(34): Improvement of reliability and safety at gas-industry facilities, pp. 53–69. ISSN 2306-8949. (Russ.).

Keywords: pipeline, broad fraction of light hydrocarbons, modelling aftereffects of breakdowns, manmade and natural affecting factors, scales of a potential hitting zone, minimization of wreck aftereffects.

References

1. YEDIGAROV, A.S. Numerical calculation of turbulent flow for a cold heavy gas in atmosphere [Chislennyy raschet turbulentnogo techeniya kholodnogo nyazhelogo gaza v atmosphere]. *Zhurnal Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki*. 1991, vol. 31, no. 9, pp. 1369–1380. ISSN 0044-4669. (Russ.).
2. GOTAAS, Y. Heavy gas dispersion trials at Thorney Island. *Journal of Hazardous Materials*. 1985, vol. 11, special is., p. 436. ISSN 0304-3894. DOI: 10.1016/0304-3894(85)85050-0.
3. *The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual*. Hague: Shell Internationale Research Maatschappij BV, 1994.
4. CARN, K.K. Estimates of the mean concentration and variance for the Thorney Island phase 1, dense gas dispersion experiments. *Journal of Hazardous Materials*. 1987, vol. 16. p. 75–101., DOI: 10.1016/0304-3894(87)80028-6.
5. MCRAE, T.G., N.C. GOLDWIRE Jr., R.P. KOOPMAN. Analysis of large-scale LNG/Water RPT explosions. In: *ASME winter annual meeting, New Orleans, LA, USA, 9 Dec. 1984*. UCRL 91832.
6. GOLDWIRE, H.C. Jr., H.C. RODEAN, R.T. CEDERWALL, et al. *Coyote series data report LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn, and rapid phase transition*. USA, CA: Lawrence Livermore National Lab., 1983. UCID-19.
7. RODEAN, H.C., W.J. HOGAN, P.A. URTIEW, et al. *Vapor burn analysis for the Coyote series LNG spill experiments*. USA, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1984. UCRL-53530.
8. MORGAN, D.L., L.K. MORRIS, S.T. CHAN, et al. *Phenomenology and modeling of liquefied natural gas vapor*. USA, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1984. UCRL-53581.
9. TRW, Inc. *An experimental investigation of atmospheric diffusion and ignition of boil-off associated with a spillage of liquefied natural gas: film section of the Report no. 08072-7 for the AGA*. Lyndhurst, Ohio: TRW, Inc., November 1968.
10. HANSEN, O.R., J.A. MEIHEIM, I.E. STORVIK. CFD-modeling of LNG dispersion experiments. In: *7th Topical conference on natural gas utilization: AIChE spring meeting, Houston, Texas, 22–26 April, 2007*.
11. SEGEANT, R.J., F.E. ROBINETT. An experimental investigation of atmospheric diffusion and ignition of boil-off associated with a spillage of liquefied natural gas. In: *Film section of the Report № 08072-7 prepared for American Gas Association*. TRW, Inc., 1968.
12. *Essais d'Épandage de Gaz Naturel Liquefié Sur de Sol: report on the experiments conducted by Gaz de France*. Paris: Gaz de France, September 1972. (French).
13. LEES, F.P. *Lees' loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment, and control*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 1996.
14. DAVENPORT, J.A. A study of vapour cloud incidents: a CEP technical manual. *Loss Prevention*. 1977, no. 11, pp. 39–49. ISSN 0097-2312.
15. GUGAN, K. *Unconfined vapour cloud explosions*. Reading, U.K.: Institution of Chemical Engineers: George Godwin Ltd., 1987, p. 118.
16. STREHLOW, R.A. *Unconfined vapour cloud explosions – An overview*. Elsevier Inc., 1973. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(73\)80107-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(73)80107-9)
17. LIND, C.D., J.C. WHITSON. *Explosion hazards associated with spills of large quantities of hazardous materials, Phase II*. July 1977. Report No CG-D-85-77.
18. GULLEN, W.D. The public inquiry into the piper alpha disaster [online]. London: HMSO, 1990. Available from: <https://www.hse.gov.uk/offshore/piper-alpha-public-inquiry-volume1.pdf>
19. WINGERDEN, C.J.M. van, H.-C. SALVESEN, R. PERBAL. Simulation of an accidental vapor cloud explosion. *Process Safety Progress*. 1995, vol. 14, no. 3, pp. 173–181. ISSN 1066-8527.
20. BAKKE, J.R., K. van WINGERDEN, P. HOORELBEKE, et al. A study on the effect of trees on gas explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010, vol. 23, pp. 878–884. ISSN 0950-4230.
21. BESCHASTNOV, M.V. *Explosion safety and emergency protection of chemical-engineering processes* [Vzryvobezopasnost i protivoavariynaya zashchita khimiko-tekhnologicheskikh protsessov]. Moscow: Khimiya, 1983. (Russ.).
22. GAMERA, Yu.V., S.V. OVCHAROV. On the problem of baric impacts during deflagration methane combustion at hazardous production facilities of gas transmission systems [K voprosy o baricheskikh vozdeystviyakh pri deflagratsionnom gorenii metana na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh gazotransportnykh sistem]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2014, no. 1 (17): Gas pipeline technical condition and integrity control, pp. 66–70. ISSN 2306-8949. (Russ.).
23. YAKUSH, S.Ye. *Hydrodynamics and combustion of gas and binary-phase wastes in open atmosphere* [Gidrodinamika i gorenije gazovykh i dvukhfaznykh vybrosov v otkrytoy atmosfere]. Dr. thesis (mathematics and physics). Moscow, 2000. (Russ.).
24. GERASIMOVA, L.I., G.I. NAZARENKO (eds.). *Thermal and radiation burns* [Termicheskiye i radiatsionnyye ozhogi]. Moscow: Meditsina, 2005. (Russ.).

25. KOZLITIN, A.M., A.I. POPOV. Methods for feasibility studying industrial and environmental safety of toxic manmade facilities [Metody tekhniko-ekonomicheskoy otsenki promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti vysokoriskovykh obyektov tekhnosfery]. Saratov: Saratov State Technical University, 2000. (Russ.).
26. KOZLITIN, A.M., A.I. POPOV. *Theoretical principals and practice of analysis of manmade risks. Probabilistic methods for quantitative assessment of technosphere hazards* [Teoreticheskiye osnovy i praktika analiza tekhnogennykh riskov. Veroyatnostnyye metody kolichestvennoy otsenki opasnostey tekhnosfery]. Saratov: Saratov State Technical University, 2002. (Russ.).
27. KOZLITIN, A.M., A.I. POPOV, P.A. KOZLITIN. Analysis of procedures for estimation of explosion aftereffects at potentially hazardous manmade facilities [Analiz metodik otsenki posledstviy vzyvov na potentsialno opasnykh obyektakh tekhnosfery]. In: *Steady ecologic development: regional challenges* [Ustoychivoye ekologicheskoye razvitiye: regionalnyye problemy]: collected book. Saratov: Saratov State Technical University, 2001, pp. 34–62. (Russ.).
28. KOZLITIN, A.M., B.N. YAKOVLEV. *Manmade emergencies. Prediction and assessment: deterministic methods for quantitative assessment of technosphere hazards* [Chrezvychaynyye situatsii tekhnogennogo kharaktera. Prognozirovaniye i otsenka: determinirovannyye metody kolichestvennoy otsenki opasnostey tekhnosfery]. Saratov: Saratov State Technical University, 2000. (Russ.).
29. McNAUGHTON, D.J. Errors inherent in wind inputs to unliked source and dispersion models. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2010, no. 7, pp. 1018–1020. ISSN 1047-3289.
30. BYZOVA, N.L., Ye.K. GARGER, V.N. IVANOV. *Experimental studies of atmospheric diffusion and calculation of dissipation of an additive* [Eksperimentalnyye issledovaniya atmosferno diffuzii i raschety rasseyaniya primesi]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. (Russ.).
31. CHERNYEV, V.D. *Operation reliability of trunk oil pipelines* [Ekspluatatsionnaya nadeznost magistralnykh nefteprovodov]. Moscow: Nedra, 1992. (Russ.).
32. KIEFNER, J.F. In: *Proc. of Forth Symposium on Line Pipe Research*. American Gas Association, 1969. Catalogue no. L30075.
33. O'GRADY, T.J., T.H. DANIEL, J.F. KIEFNER. Pressure calculation for corroded pipe developed [online]. *Oil and Gas Journal*. 1992, October 19. ISSN 0030-1388. Available from: <https://www.ogj.com/home/article/17219618/evaluating-corroded-pipeconclusion-pressure-calculation-for-corroded-pipe-developed>