

«КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОП. И СНИЖЕНИЮ РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ЖИДКОГО АММИАКА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКА».PDF

**«Методические проблемы обоснования
безопасности опасного производственного объекта»**

Семинар в ЗАО НТЦ ПБ 18.05.2015

**«Конструкционные мероприятия по повышению безопасности и снижению
риска эксплуатации изотермических резервуаров
для хранения жидкого аммиака на основе оценки риска»**

Х.М. Ханухов, д.т.н., чл-корр. АИН РФ, ген. дир.

А.В. Алипов, к.ф.-м.н., нач. отд.

Н.В. Четвертухин, рук. гр.

Научно-производственный консорциум «Изотермик»

Цель настоящего доклада – применение анализа риска аварии изотермических резервуаров аммиака для совершенствования их конструкции и повышения безопасности эксплуатации.

1. В настоящее время согласно Европейским нормам [1] изотермические резервуары (ИР) для хранения сжиженных газов подразделяются на 4 типа:

- ИР "одинарного сдерживания" ("single containment"), имеющий один силовой корпус, рассчитанный на гидростатическое давление жидкости и давление газа над жидкостью;
- ИР "двойного сдерживания" ("double containment"), имеющий один силовой корпус и открытую защитную ограждающую стенку (или закрытую навесом от попадания дождя и снега);
- ИР "полного сдерживания" ("full containment"), имеющий два силовых корпуса, концентрически расположенных один в другом, каждый из которых предназначен для сдерживания гидростатического давления жидкости, причем наружный корпус герметичен и рассчитан на сдерживание давления газа;
- мембранный ИР – железобетонный резервуар, покрытый изнутри тонкой металлической мембраной (практически не нашедший применения в России).

Первые три типа ИР классифицируются не по конструктивному исполнению, а по

надежности сдерживания возможного аварийного пролива содержимого. Например, к первому типу ("single containment") относятся как одностенные, так и двустенные ИР, у которых наружная стенка не рассчитана на сдерживание гидростатического давления хранимого продукта, а является ограждающей конструкцией для засыпной теплоизоляции. Практически все ИР, построенные в России 20- 40 лет назад, относятся к этому типу.

Возможные варианты конструктивных решений вертикальных цилиндрических изотермических резервуаров (ИР) для хранения сжиженных газов из металла и/или железобетона подробно рассмотрены в монографии Б.В. Поповского и А.З. Майлера [2]. Все они вписываются в рассмотренную европейскую классификацию.

В настоящее время в наиболее ответственных случаях (вблизи городской застройки, вблизи пожаро- и взрывоопасных объектов и т.п.) в отечественную практику входит применение двустенных ИР с двумя силовыми стальными корпусами, обеспечивающих "полное сдерживание" хранимого продукта при его аварийном проливе из внутреннего резервуара. В рамках такой конструкции проектируются две ее разновидности: 1) и наружный, и внутренний резервуары имеют герметичную стационарную купольную крышу (рис. 1.2); 2) внутренний резервуар имеет подвесную паропроницаемую крышу, крепящуюся к крыше наружного резервуара (рис. 1.3). Исторически сложилось, что в отечественном резервуаростроении наиболее надежным считается ИР с двумя силовыми корпусами и двумя герметичными стационарными купольными крышами.

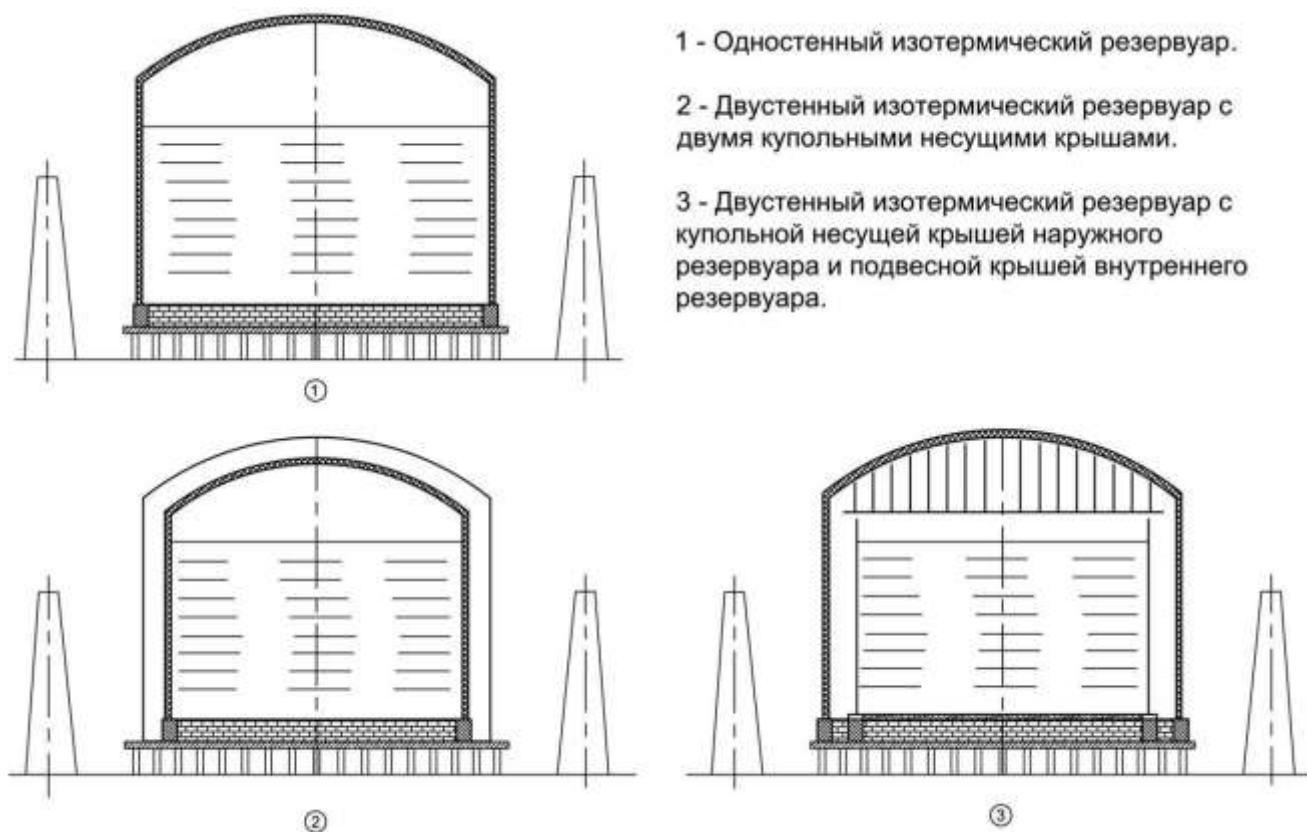
В наиболее ответственных случаях для уменьшения последствий возможной аварии вокруг ИР возводится кольцевая защитная железобетонная стена. Высота стены рассчитывается так, чтобы она могла вместить полный объем хранимого в ИР продукта.

В соответствии с требованием Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" и ГОСТ Р 54257-2010 "Надежность строительных конструкций и оснований" изотермические резервуары данного класса относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности, при прочностных расчетах которых должен применяться повышенный коэффициент надежности по ответственности сооружения $\gamma_n \geq 1.1$, что приводит к увеличению толщины элементов ИР. Как правило, принимается $\gamma_n = 1.2$.

2. Статья посвящена сравнению надежности и безопасности этих двух вариантов двустенных вертикальных стальных изотермических резервуаров "полного сдерживания" для хранения жидкого аммиака.

В статье исследуется влияние данных конструктивных особенностей ИР:

- 1) на снижение риска аварии ИР;
- 2) на уменьшение последствий аварии.



1 - Одностенный изотермический резервуар.

2 - Двустенный изотермический резервуар с двумя купольными несущими крышами.

3 - Двустенный изотермический резервуар с купольной несущей крышей наружного резервуара и подвесной крышей внутреннего резервуара.

Рис.1 Основные виды вертикальных изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов.

3. Риск нежелательного события (аварии, инцидента) рассчитывается по формуле:

$$R = P \cdot V,$$

где P – вероятность или показатель частоты нежелательного события,

V – ущерб от последствий аварии, инцидента.

Соответственно, оценивается индивидуальный и коллективный риск человеческих потерь, и риск финансовых потерь.

Методика оценки риска соответствует требованиям [3].

4. Идентификация опасностей от аварии ИР и количественные оценки риска, в том числе оценки частоты возникновения различных видов повреждений и аварий изотермических резервуаров сжиженных газов сделаны по имеющимся отечественным данным 10 случаев повреждений ИР за период 35 лет – с 1979 по 2014 год, (в том числе одной крупной аварии с человеческими жертвами на изотермическом резервуаре жидкого аммиака в г. Ионава в 1989 г.), а также с учетом статистики аварий на ИР жидкого аммиака в США за период 1964 – 1984 г.

В таблице 1 приведены сводные данные по авариям и инцидентам на изотермических резервуарах сжиженных газов в России (по данным экспертиз промышленной безопасности, про-

веденных ООО “НПК Изотермик”).

Таблица 1.

№ п/п		Причины аварии, инцидента	% к итогу	Частота реализации сценария аварии, год ⁻¹
1	Авария, полное разрушение ИР	Отказ компрессора компримирования аммиака + «человеческий фактор»	10%	$2,6 \times 10^{-4}$
2	Инцидент	Утечка аммиака через микротрещины во внутреннем днище резервуара, повышение концентрации аммиака в межстенном пространстве.	10%	$0,45 \div 0,5 \times 10^{-3}$
3	Инцидент	Трещина в «воротнике» трубопровода выхода жидкого аммиака. Ошибка проекта.	10%	$0,45 \div 0,5 \times 10^{-3}$
4	Инцидент	Недопустимая деформация анкерных полос, просадка ИР из-за гниения деревянного опорного кольца	10%	$0,45 \div 0,5 \times 10^{-3}$
5	Инцидент, не связанный с эксплуатацией	Нарушение условий гидро-пневмоиспытаний, повлекшее недопустимые деформации резервуара – потерю устойчивости стенки *)	40%	$6,6 \times 10^{-2}$
6	Инцидент, не связанный с эксплуатацией	Нарушение правил безопасности при вводе ИР в эксплуатацию после технической диагностики	20%	$0,33 \times 10^{-2}$

*) Инцидент, не связанный с эксплуатацией, данный инцидент имел место, по крайней мере, в 4-х случаях.

**) Далее в оценке риска аварии инциденты не используются.

Количество ИР для хранения различных сжиженных газов в России – около 60 единиц. Среднее время эксплуатации ИР – 35 лет. Количество "резервуаров-лет", т.е. произведение количества ИР на среднее время эксплуатации оцениваем величиной 2100.

Количество "резервуаро-лет" по аммиачным ИР в США за период 1964 – 1984 г.г., оцениваем величиной 5600. Все эти резервуары, как в России, так и в США имеют одну силовую стенку.

Таким образом, в России и США за $2100 + 5600 = 7700$ "резервуаро-лет" произошло 2 случая аварий, сопровождавшихся разрушением ИР, причем по сходным причинам – в результате остановки компрессора компримирования газообразного аммиака и повышения давления в ИР. Различий в конструкциях ИР в России и США в рассматриваемый период практически не было, поэтому статистику аварий объединяем в общую.

5. Наиболее вероятный и наиболее опасный сценарий аварии ИР: нарушение в работе агрегата компримирования аммиака, приводящее к его остановке, повышению температуры в резервуаре и росту внутреннего давления до значения, в 2 – 3 раза превышающего расчетное. Далее может произойти разрушение резервуара по двум сценариям: либо обрыв анкеров при недостаточной их прочности, недопустимая деформация корпуса и разрушение сварного соединения стенки с днищем, либо – при повышенной прочности анкеров – разрушение сварного соединения стенки с крышей. Именно такие сценарии аварии реализовались при двух документально зафиксированных случаях в истории эксплуатации изотермических резервуаров: в СССР в г. Ионава в 1989 г. и в США в г. Гейсмар, шт. Луизиана в 1984 г. Из этих двух сценариев аварии наиболее опасный – первый: отрыв стенки от днища с полным проливом жидкого аммиака во внешнюю среду (Ионава). Второй сценарий – отрыв крыши от стенки значительно менее опасный, т.к. в этом случае продукт остается во внутреннем резервуаре (г. Гейсмар).

Коррозионное разрушение элементов ИР как фактор возможного сценария аварии не рассматриваем. Согласно [8] “В условиях длительного (более 40лет) воздействия аммиачной среды металл внутреннего корпуса изотермических хранилищ коррозионно-механическим повреждениям не подвергается. Его структура, прочностные и деформационные характеристики не изменяются”. Наша многолетняя практика обследования металлоконструкций изотермических резервуаров аммиака это подтверждает.

б. Фактическую частоту аварий изотермического резервуара с одной силовой стенкой по причине роста внутреннего давления оцениваем величиной:

$$P_1 = \frac{2}{7700} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Логико-вероятностный анализ методом "дерева отказов" с учетом отказов элементов технологической цепочки ИР дает существенно меньшее значение вероятности аварии и полного разрушения ИР – не более 10^{-6} .

В запас оценки риска принимаем в качестве максимальной оценки вероятности аварии ИР с одной силовой стенкой частоту аварий, фактически имевших место в истории эксплуатации ИР, а именно $2,6 \times 10^{-4} \text{ год}^{-1}$.

Анализ показывает, что вероятность разрушения резервуара “однократного сдерживания” по причине роста внутреннего давления при увеличении толщины несущей стенки, вызванной применением повышенного коэффициента надежности по ответственности сооружения $\gamma_n = 1,2$, снижается также в $\gamma_n = 1,2$ раза.

С учетом сказанного выше вероятность разрушения одностенного резервуара с увеличенной в $\gamma_n = 1,2$ раз толщиной стенки и толщиной окрайки днища:

$$P_1 = \frac{2,6}{1,2} 10^{-4} = 2,17 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Принимаем для дальнейшего анализа худший сценарий аварии, т.е. считаем, что содержимое внутреннего резервуара полностью проливается в наружный резервуар. Считаем внутренний резервуар полностью заполненным продуктом.

Считаем, что после разрушения внутреннего резервуара в течение нескольких часов компрессорный агрегат не вводится в строй или по каким-либо причинам предохранительные клапаны не справляются с поступающим в результате испарения объемом газа, и давление газа продолжает нарастать.

При анализе вероятности разрушения как внутреннего, так и наружного резервуара используем то обстоятельство, что время аварийного повышения избыточного давления газа до значения не менее $0,3 \text{ кгс/см}^2$, при котором резервуар может разрушиться, в объеме свободного пространства резервуара – нескольких тысяч кубометров – может измеряться несколькими часами, но не минутами.

Схема возможного развития аварии при разрушении внутреннего резервуара ("дерево событий") представлена на рис. 1,а. Условную вероятность разрушения внутреннего резервуара принимаем равной единице. Условная вероятность каждого возможного сценария дальнейшего развития событий указана на рис. 4 по нашей экспертной оценке.

Анализ показывает, что продолжение аварии с отрывом стенки наружного резервуара от днища и полным проливом аммиака во внешнюю среду невозможно при выполнении любого из двух условий: 1) при своевременном вводе компрессора и прекращении дальнейшего развития аварии и/или надежной работе предохранительных клапанов; 2) при повышенной прочности анкеров.

Рис. 1,а. Сценарии развития аварии разгерметизации внутреннего резервуара с полным проливом жидкого аммиака в наружный резервуар

(Дерево событий)



Вероятность разрушения наружного резервуара и пролива жидкого аммиака во внешнюю среду, ограниченную ж/б защитной стеной, при условии разрушения внутреннего резервуара, путем логико-вероятностного анализа с использованием «дерева событий» оцениваем величиной $P_2 = 2 \times 10^{-3}$, т.е. величиной, на порядок большей, чем разрушение внутреннего резервуара.

Вероятность разрушения внутреннего, а затем и наружного резервуара с двумя силовыми корпусами и двумя купольными крышами оцениваем величиной

$$P = P_1 P_2 = 2,17 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 4,34 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}.$$

7. Таким образом, приходим к выводу, что риск аварии ИР с двойным силовым корпусом и двумя герметичными купольными крышами в основном зависит от надежности работы компрессорной установки и пропускной способности предохранительных клапанов и в незначительной степени определяется увеличением сечений конструктивных элементов из-за применения повышенного коэффициента надежности сооружения. При длительном выходе из строя компрессора и недостаточной пропускной способности предохранительных клапанов сначала внутренний, а затем и наружный резервуар с большой вероятностью может быть разрушен, и здесь уже речь может идти не о предотвращении разрушения, а о контролируемом разрушении, т.е. о конструктивных мероприятиях, препятствующих отрыву стенки от днища. К таким конструктивным решениям относятся: проектирование легкобрасываемой крыши и/или повышение прочности анкерных креплений (см. п. 9).

8. Хрупкое разрушение стенки резервуара считаем событием весьма маловероятным.

Частота хрупкого разрушения стенки резервуара для нефти и нефтепродуктов по оценке API-581 – 10^{-7} год⁻¹. Хрупкое разрушение стенки изотермического резервуара еще менее вероятное событие, т.к. для изготовления ИР применяются специальные холодостойкие стали с повышенной вязкостью и улучшенной свариваемостью [8], а также используется полистовая сборка (вместо рулонной), что препятствует распространению трещин. По нашей оценке с использованием "дерева отказов" вероятность хрупкого разрушения стенки ИР не превышает $1,4 \times 10^{-9}$.

9. Для анализа механизма разрушения ИР при повышении внутреннего давления сверх проектного нами проведены прочностные расчеты внутреннего резервуара при полном его заполнении жидким аммиаком и различных значениях внутреннего избыточного давления газообразного аммиака.

В качестве примера взят ИР вместимостью 30000 т жидкого аммиака. Толщины элементов резервуара взяты по расчету на прочность с учетом повышающего коэффициента надежности по ответственности сооружения $\gamma_n = 1,2$.

Расчеты проведены с учетом геометрической нелинейности. Работа материала резервуара считается упругой.

Значения максимального условного упругого меридионального напряжения в окрайке днища в зоне сварного соединения со стенкой резервуара приведено на рис. 2.

Из расчетов следует, что при значениях давления газа до $0,13$ кгс/см² окрайка днища прижимается к плоскому основанию давлением жидкости и не отрывается от основания независимо от наличия или отсутствия анкеров. При бóльших давлениях газа анкера активно включаются в работу.

До тех пор, пока резервуар удерживается анкерами, напряжение в окрайке днища в угорном узле практически постоянно, определяется гидростатическим давлением жидкости и незначительно зависит от давления газа. Видно, что в этом случае при всех значениях давления газа напряжение в узле стыка стенки с днищем меньше напряжения в узле стыка стенки с крышей (линии 1 и 2 на рис. 2). Поэтому при наличии анкеров и их надежной работе, при любом давлении газа отрыв стенки от днища невозможен, т.к. отрыв крыши от стенки произойдет раньше.

При отсутствии анкеров окрайка днища сильно деформируется, и напряжения в узле стыка стенки с днищем при всех значениях давления газа, превышающих в данном случае $0,13$ кгс/см², оказываются выше напряжений в узле стыка стенки с крышей (линии 2, 3 и 4 на рис. 2). Поэтому при обрыве анкеров в первую очередь должен произойти отрыв стенки от днища, что и имело место в Ионаве.

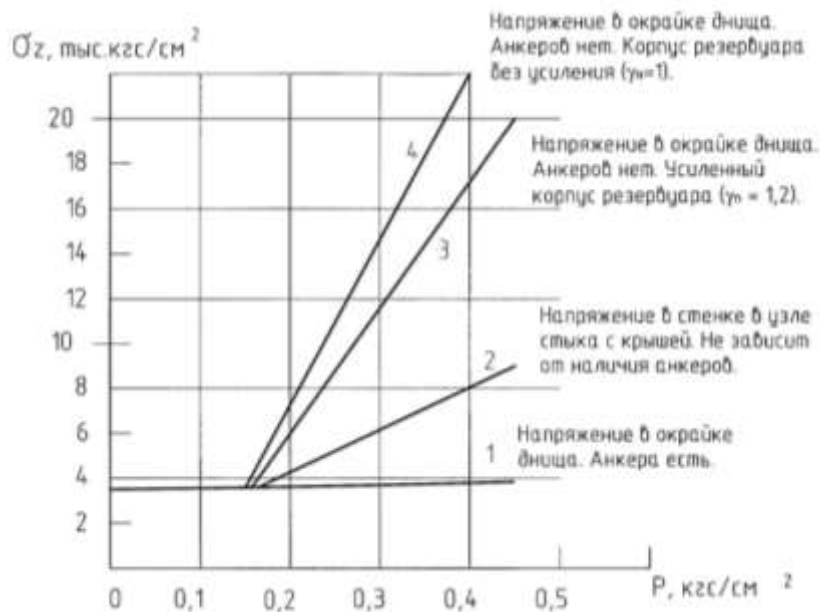


Рис.2. Меридиональное напряжение σ_z в узлах стыка стенки резервуара с днищем и крышей при действии гидростатической нагрузки и избыточного давления P.

При обрыве анкеров, вызванном ростом давления, изгибные меридиональные напряжения в окрайке днища в районе уторного узла оказываются значительно выше напряжений в стенке резервуара. Поэтому разрушение (раскрытие) стенки по вертикальным сварным соединениям, тем более, с учетом полистовой сборки, исключаяющей образование протяженных вертикальных швов, практически невозможно, т.к. ранее него произойдет разрушение сварного соединения стенки с днищем. Например, при избыточном давлении $0,3 \text{ кгс/см}^2$ кольцевое напряжение в стенке $\sigma_\varphi = 1790 \text{ кгс/см}^2$, максимальное условное упругое меридиональное напряжение в окрайке днища в районе уторного узла $\sigma_z = 11980 \text{ кгс/см}^2$ (линия 3 на рис. 2), т.е. в 6,7 раз выше.

Проведенные нами расчеты показывают, что разрушение резервуара может произойти при следующих значениях нагрузок:

- внутреннее давление газообразного аммиака – не менее 30 кПа;
- вакуум – не менее 1,5 кПа.

(Значение внутреннего давления, при котором произошло разрушение ИР в г. Ионава, оценивается величиной 40 кПа).

Избежать наихудшего сценария аварии – отрыва стенки внутреннего резервуара от днища можно двумя путями. Первый путь - проектирование и монтаж легкобрасываемой крышки. Второй путь значительно проще – увеличение прочности анкеров, т.е. их площади сечения, а также длины сварных швов крепления анкеров к стенке резервуара. **Таким образом, мы приходим к концепции управляемого разрушения резервуара.**

10. Рассмотрим вопрос о влиянии железобетонной защитной стенки на степень тяжести последствий аварии. Расчеты зон токсического поражения при аварии ИР и проливе жидкого аммиака проведены по «Методике расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака» (ТОКСИ 2.2 [4]).

В соответствии с [4] рассматривались худшие климатические условия, а именно, авария происходит летом, ночью при слабом ветре 1 м/с, в условиях инверсии. Для примера взят ИР вместимостью 30000 т.

Рассматриваются 2 сценария аварии:

1) ИР ничем не огорожен, полное разрушение ИР, 30000 т аммиака свободно разливаются по площади предприятия;

2) ИР огорожен защитной ж/б стеной высотой 17 м. Высота стены позволяет вместить весь объем жидкого аммиака при проливе.

При свободном проливе жидкого аммиака по территории предприятия зона смертельного поражения людей - область, вытянутая по направлению ветра на 8,72 км, шириной 600 м, площадью 4,1 км².

При испарении аммиака с высоты ограждающей стены $H_w = 17$ м площадь зоны смертельного поражения людей сокращается по сравнению со свободным проливом в 250 раз - до 0,016 км²: это область, начинающаяся на расстоянии 700 м от ИР и заканчивающаяся на расстоянии 1400 м от ИР, шириной 36 м.

Таким образом, при аварии ИР с проливом жидкого аммиака внутри ограждающей ж/б стены зона распространения токсичного облака и поражения людей резко снижается за счет двух факторов: 1) испарение аммиака происходит со значительно меньшей площади; 2) испарение аммиака происходит не с уровня земли, а с уровня ж/б стены.

Расчеты показывают, что второй фактор имеет решающее значение. В этом случае за счет того, что газ аммиак легче воздуха, до уровня земли смесь аммиака с воздухом опускается не сразу около места пролива, а на значительном удалении от него по направлению ветра и со значительно сниженной концентрацией NH₃. На рис. 3, 4 показан профиль облака с указанием линий токсодозы: 1) при свободном проливе аммиака по территории предприятия и 2) для ИР, защищенного стеной высотой 17 м.

Критерий поражения – LD₅₀ = 150 мг·мин/л (LD – Lethal Dose) – токсодоза, вызывающая смертельный исход у 50% пораженных людей, не защищенных средствами индивидуальной защиты; PD₅₀ = 15 мг·мин/л – (Primary Dose) – пороговая токсодоза, вызывающая первые признаки отравления у 50% пораженных.

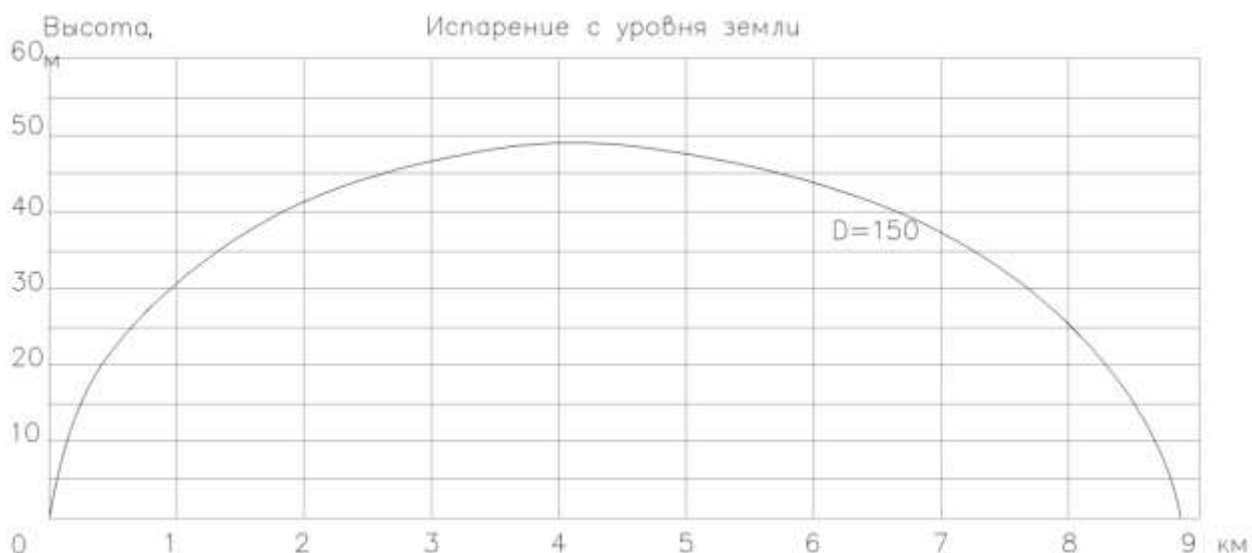


Рис. 3. Профиль токсичного облака.
 Изолиния смертельной токсодозы $LD_{50} = 150$ мг·мин/л

Оценка коллективного риска показывает, что при ограждении данного ИП ж/б стеной высотой 17 м вероятное количество смертельно пораженных при аварии с полным проливом жидкого аммиака снижается с 142 чел до 5 чел., т.е. в 28 раз.

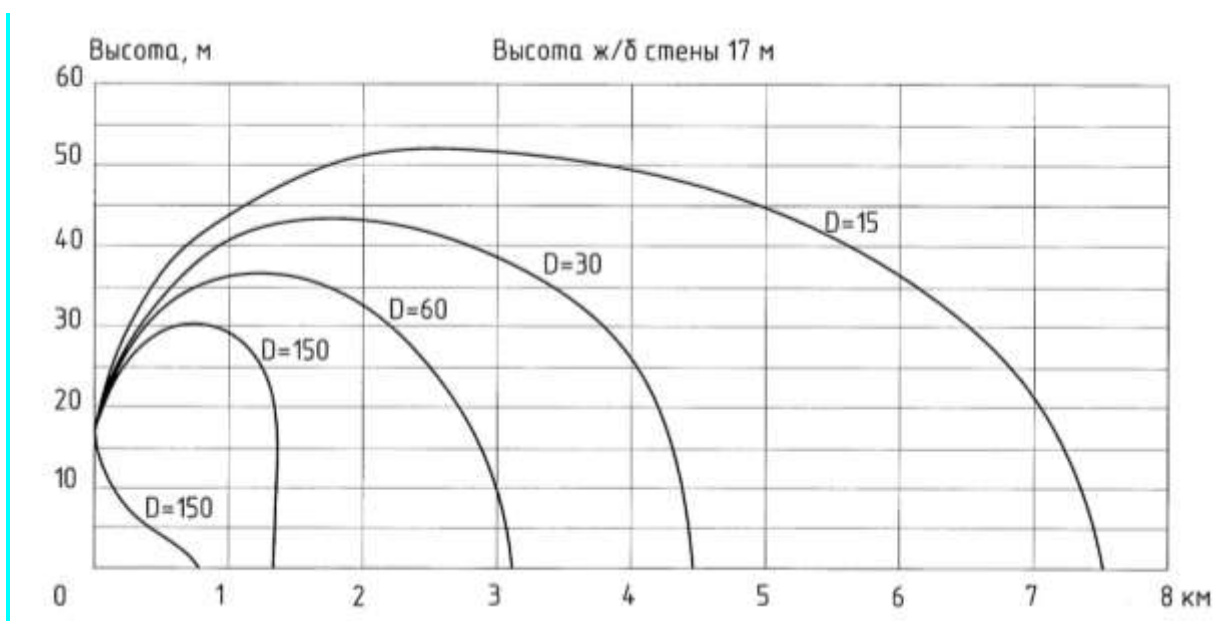


Рис.4 Профиль токсичного облака.
 Изолинии токсодозы (мг x мин/л).

При увеличении высоты ограждающей ж/б стены зона возможного смертельного поражения LD_{50} поднимается над землей, так что люди оказываются вне этой зоны. Например, для

$H_w = 22$ м нижняя граница смертельной токсодозы LD_{50} проходит на высоте 9 м над землей (рис. 5).

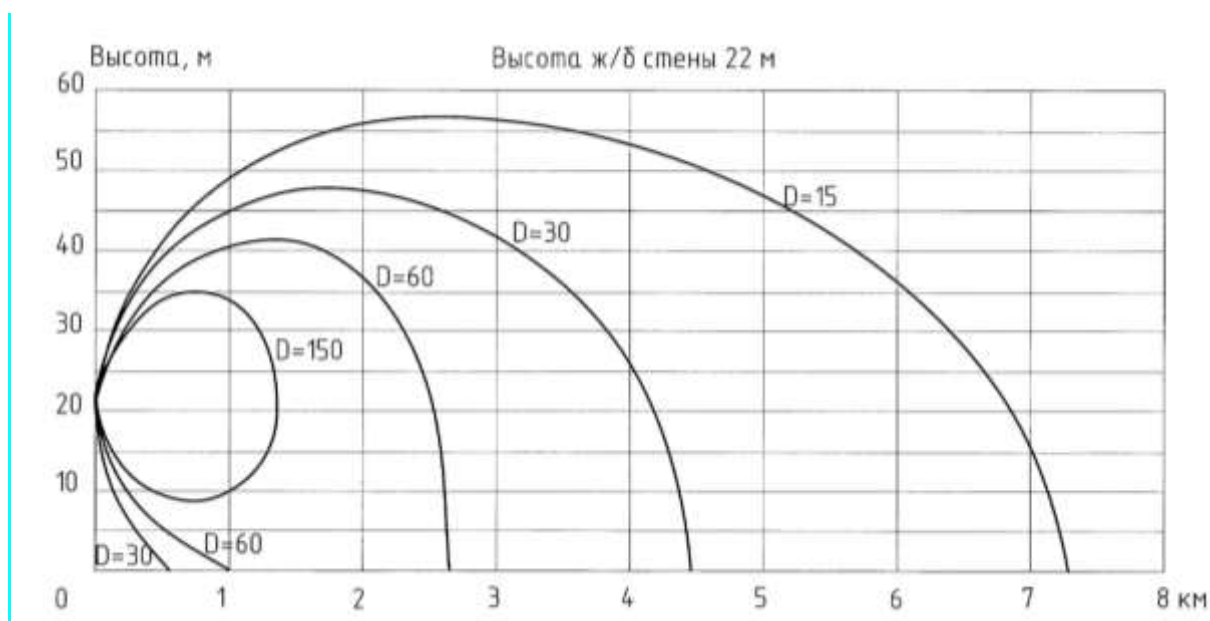


Рис.5 Профиль токсичного облака.

Изолинии токсодозы D (мг \times мин/л).

Таким образом, за счет оптимального выбора высоты ограждающей стены можно значительно снизить риск токсического поражения людей.

11. Рассмотрим далее другую конструкцию изотермического резервуара жидкого аммиака типа "full containment", имеющую также два силовых корпуса – внутренний и наружный, но с подвесной паропроницаемой внутренней крышей и свободным межстенным пространством без теплоизоляции. Теплоизоляция наружного резервуара - пеностекло.

Конструкция внутреннего резервуара в виде стакана с паропроницаемой подвесной крышей обеспечивает максимальную из возможных вариантов надежность конструкции и имеет ряд следующих преимуществ.

11.1. Так как подвесная крыша не герметична, обеспечивается невозможность создания во внутреннем резервуаре чрезмерного избыточного давления или вакуума, которые могут привести к нарушению прочности, либо потере устойчивости. При такой конструкции разрушение внутреннего резервуара с отрывом стенки от днища (которое имело место в Ионаве в 1989 г.) принципиально невозможно.

11.2. Поскольку внутренний резервуар не имеет стационарной крыши, не требуется его анкерное крепление, соответственно, не требуется изготовление в днище наружного резервуара отверстий для анкерных пластин внутреннего резервуара. При любой утечке аммиака из внутреннего резервуара он будет удержан наружным корпусом и не поступит во внешнюю среду.

11.3. Не требуется система осушения межстенного пространства азотом.

11.4. При размещении теплоизоляции на наружной поверхности наружного резервуара за

счет пустого межстенного пространства увеличивается общий объем пространства, занимаемого газом. При аварийном выходе из строя компрессорной установки или иной неисправности, приводящей к росту внутреннего давления, потребуется большее время для создания критического давления газообразного аммиака и, соответственно, больше времени для принятия решения по выходу из этой аварийной ситуации.

11.5. Наружный резервуар в процессе эксплуатации не испытывает гидростатических нагрузок от продукта, следовательно физических причин для образования и роста трещин в сварных соединениях наружного резервуара нет в принципе. Поэтому сценарий хрупкого разрушения внутреннего резервуара и одновременно с этим аварийное повышение давления, приводящее к разрушению наружного резервуара с проливом жидкого аммиака во внешнюю среду считаем невероятным и не рассматриваем. Вероятность такого события не превышает $2,8 \times 10^{-12}$ год⁻¹.

Ввиду невероятности полного разрушения ИР с подвесной внутренней крышей не требуется сооружение защитной ж/б стены вокруг ИР. При любом повреждении внутреннего резервуара наружный резервуар полностью сдержит содержимое от пролива во внешнюю среду.

11.6. При аварийной разгерметизации наружного корпуса, вызванной частичным разрушением наружной крыши (или даже ее полным сносом) при росте внутреннего давления газообразного аммиака, испарение происходит с уровня верха наружной оболочки, которая в этом случае выполняет функцию защитной стенки. При этом резко сокращается риск поражения людей.

12. Для иллюстрации утверждения п. 11.6 приведем результаты расчета зон токсического поражения при аварии ИР и проливе жидкого аммиака по методике ТОКСИ 2.2 [4]. Для примера взят ИР вместимостью 10000 т.

Рассматриваются 2 сценария аварии:

1) ИР ничем не огорожен, полное разрушение ИР, 10000 т аммиака свободно разливаются по площади предприятия;

2) в результате повышения внутреннего давления произошла разгерметизация наружного резервуара – полный отрыв крыши от стенки, испарение аммиака происходит с уровня 25 м – высоты наружной стенки.

На рис. 6 показан профиль токсичного облака – границы различных значений токсодозы для времени экспозиции 30 минут при испарении аммиака с уровня земли. На рис. 7 то же, но при испарении с уровня 25 м.

Из расчета следует, что при полном разрушении ИР и испарении аммиака с уровня земли зона смертельного поражения представляет собой овал длиной 2780 м шириной 180 м площадью 0,4 км².

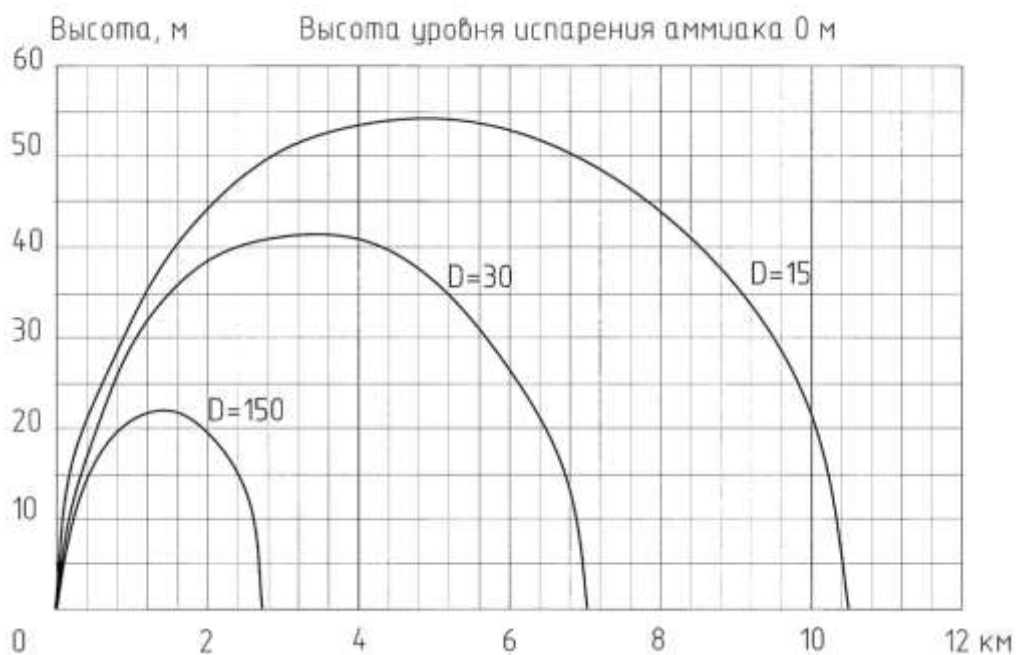


Рис. 6. Профиль токсичного облака. Изолинии токсодозы D (мг х мин/л)

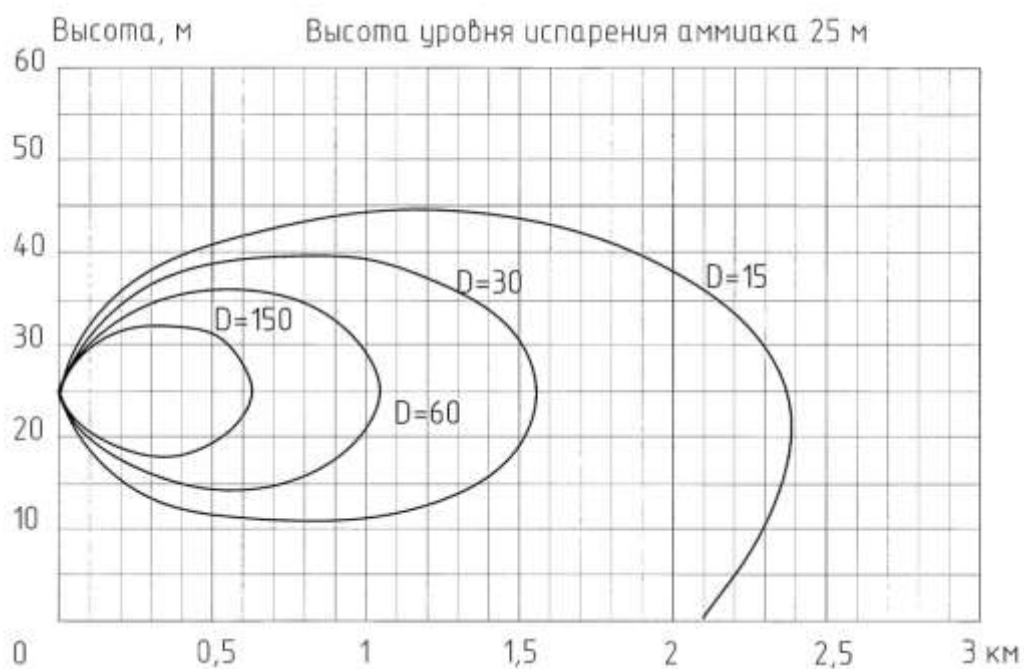


Рис. 7. Профиль токсичного облака. Изолинии токсодозы D (мг х мин/л)

*) *Комментарии к рис. 7.* Условное время, в течение которого, как мы предполагаем, будут приняты меры по откачке жидкого аммиака или прекращению испарения – 24 часа. Данный параметр не влияет на предельную концентрацию аммиака в воздухе и границы токсодозы, т.к. через 2 – 2,5 часа после начала аварии при сохранении атмосферных условий устанавливается стационарный режим испарения аммиака и распространения его в воздухе.

Граница смертельной токсодозы $LD_{50} = 150$ мг·мин/л проходит на значительной высоте над землей (при времени экспозиции 30 мин – на высоте около 18 м). Люди, находящиеся на земле, оказываются вне опасной зоны и не только за 30 минут, но и за существенно большее время не могут получить смертельную токсодозу.

На рис. 8 показаны границы смертельной токсодозы $LD_{50} = 150$ мг·мин/л при времени нахождения людей в данной точке пространства в течение 0,5 часа, 2, 4 и 6 часов. Видно, что смертельную токсодозу можно получить не менее чем за 5 – 6 часов нахождения без средств индивидуальной защиты на территории предприятия на расстоянии от 1250 м до 2200 м от места аварии по направлению ветра.

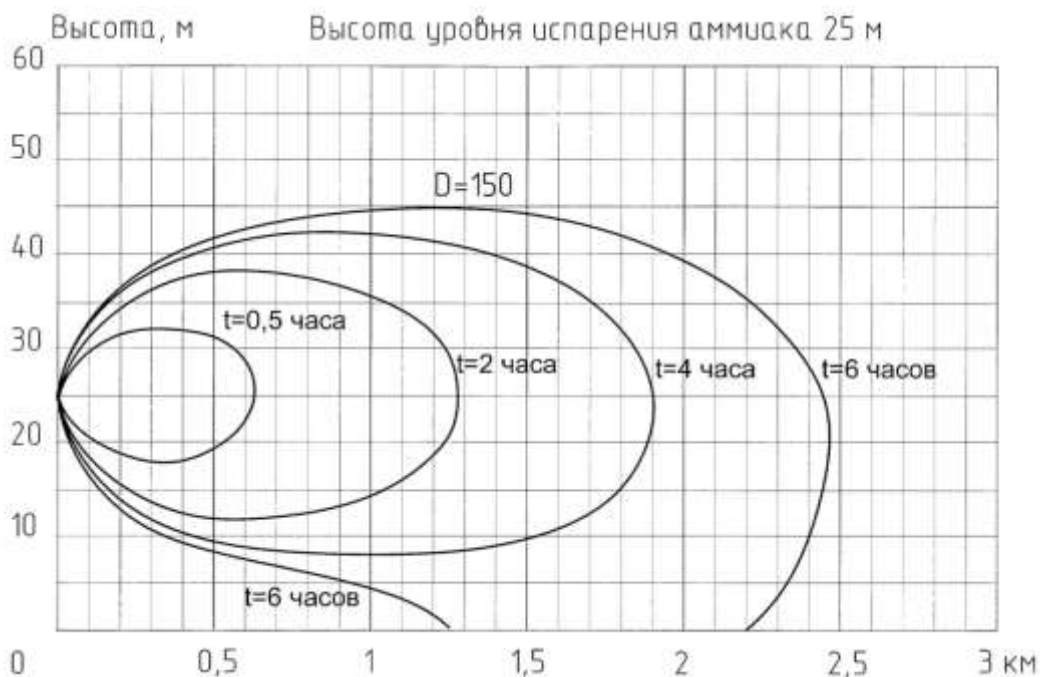


Рис. 8. Границы смертельного поражения при времени экспозиции 0,5 час, 2, 4, 6 часов. Изолинии токсодозы D (мг х мин/л)

Таким образом, наиболее безопасная конструкция изотермического резервуара (ИР) сжиженного аммиака – двойной силовой корпус с открытым внутренним "стаканом".

13. Конструкция ИР может быть улучшена при применении теплоизоляции из пеностекла (Foamglas) и размещения ее на наружной поверхности наружного корпуса. Такой вариант теплоизоляции обеспечивает следующие преимущества перед засыпной перлитной или пенополиуретановой теплоизоляцией:

- обеспечивает пароводонепроницаемость;
- полностью снимает проблему коррозии наружной поверхности из-за плотного прилегания к металлу на клею и отсутствия влаги;
- негорючая - обеспечивает пожарную безопасность;
- обладает отличными теплоизоляционными свойствами;
- уменьшает нагрузку на фундамент;
- долговечность не менее 25 лет.

На снижение риска аварии такая теплоизоляция влияет следующим образом:

- уменьшается вероятность повышения температуры и, соответственно, давления из-за улучшения теплоизоляционных свойств;
- увеличивается объем свободного межстенного пространства, соответственно для

создания опасного уровня внутреннего давления потребуется большее время.

14. Предложения по организации системы постоянного акустико-эмиссионного мониторинга ИР с двойным силовым корпусом и подвесной внутренней крышей на основе анализа риска аварии

14.1. Поскольку наиболее опасный из всех возможных сценарий аварии – разрушение наружного резервуара от повышения внутреннего давления при отказе компрессоров, либо предохранительных клапанов - система акустико-эмиссионного мониторинга (САЭМ) должна быть ориентирована на предупреждение именно этого сценария аварии.

14.2. Установка САЭМ на внутреннем резервуаре, выполненном в виде открытого стакана без стационарной крыши, тем более с усиленным корпусом за счет применения повышенного коэффициента надежности по ответственности сооружения $\gamma_n = 1,2$ лишена смысла. При качественно выполненном монтаже резервуара и надежном контроле качества сварных соединений физических причин для роста усталостных трещин в корпусе внутреннего резервуара нет. Корпус внутреннего резервуара, выполненный без грубых дефектов, способен выдержать десятки тысяч циклов полного налива-слива жидкого аммиака.

14.3. Образование хрупкой трещины при захолаживании резервуара для жидкого аммиака, температура кипения которого находится в диапазоне климатических зимних температур, явление – близкое к невероятному. Установка САЭМ с целью предупреждения этой близкой к невероятной ситуации также лишена смысла, тем более что процесс хрупкого разрушения в этом случае произойдет мгновенно, и САЭМ не сможет обеспечить его предотвращение.

14.4. На основе анализа риска и с учетом расчета напряженного состояния наружного резервуара при повышении давления (п. 6) считаем целесообразным установку датчиков САЭМ на внешней поверхности наружного резервуара.

14.5. Как в процессе эксплуатации ИР, так и при аварийном повышении давления большая часть поверхности наружной стенки, кроме узких зон высотой по 0,5 м от дна и крыши, находится в слабо напряженном состоянии. Из этого следует, что контролировать нужно только узкие зоны сопряжения стенки с дном и крышей.

14.6. Для такого контроля состояния металла достаточно разместить небольшое количество датчиков - преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) равномерно по периметру наружной стенки на высоте 0,5 – 1 м от дна и на таком же расстоянии от крыши.

14.7. Условия для проявления акустической эмиссии могут возникнуть в узле соединения стенки и крыши при повышении давления газообразного аммиака свыше 0,15 – 0,2 кгс/см². В этом случае САЭМ в дополнение к штатным приборам контроля давления будет указывать непосредственно на опасное состояние металла – растущие трещины или возникновение зон пластической деформации. С учетом того, что отрыв крыши от стенки возможен при внутреннем давлении не ниже 0,3 кгс/см², а повышение давления до этого уровня займет несколько часов, система акустико-эмиссионного мониторинга заблаговременно предупредит о приближении опасного состояния металла.

14.8. Природа опасного состояния для наружного резервуара ясна априори – развитие пластических деформаций на линии стыка крыши (дна) и стенки при повышении давления. Поэтому для идентификации источника эмиссии в этом случае достаточно зонной локации, что

вполне обеспечивается одним слоем ПАЭ по высоте. Установка ПАЭ на наружной крыше (также как и на днище в межстенном пространстве) с целью планарной локации источников эмиссии (определения координат источника эмиссии на поверхности оболочки) для этого не требуется.

15. Вероятные финансовые потери при аварии ИР могут быть рассчитаны при учете генплана предприятия, взаимного расположения ИР и других ОПО и т.п. Однако априорную оценку вероятных финансовых потерь, например, для цели страхования можно сделать относительно к фактическому расположению опасного объекта.

При аварии ОПО первой категории опасности финансовые потери по оценке [7] могут составить до 100 крат затрат стоимости объекта и стоимости хранимого продукта.

Выводы:

1. Риск аварии полного разрушения ИР с двойным силовым корпусом и двумя купольными крышами оценивается величиной $4,34 \times 10^{-7}$ год⁻¹ и в основном зависит от надежности работы компрессорной установки и пропускной способности предохранительных клапанов. При длительном выходе из строя компрессора и недостаточной пропускной способности предохранительных клапанов резервуар с большой вероятностью может быть разрушен, и здесь уже речь может идти не о предотвращении разрушения, а о контролируемом разрушении, т.е. о конструктивных мероприятиях, препятствующих отрыву внутренней стенки от днища. Применение повышенного коэффициента надежности по ответственности сооружения $\gamma_n \geq 1.1$ лишь незначительно снижает риск аварии – пропорционально величине γ_n .

2. Для снижения риска последствий аварии ИР данной конструкции рекомендуется повысить прочность анкерных креплений внутреннего и наружного резервуаров, увеличив площади их сечений в 1,5 – 2 раза по сравнению с теми, что следуют из расчета на прочность при проектных эксплуатационных нагрузках.

3. Анализ риска показывает, что конструкция ИР с двумя силовыми корпусами и двумя стационарными купольными крышами не является наиболее безопасной. Наиболее безопасна конструкция ИР с двумя силовыми корпусами и внутренним резервуаром типа "стакан" с подвесной крышей. В этом случае разрушение внутреннего резервуара с полным проливом его содержимого во внешний резервуар делается практически невозможным. Наиболее вероятный и наиболее опасный сценарий аварии – частичное разрушение наружного резервуара - разгерметизация соединения его стенки и крыши. Риск такой аварии составляет не более 9×10^{-8} год⁻¹. Вероятность полного разрушения ИР с двумя силовыми корпусами и подвесной внутренней крышей не более $2,8 \times 10^{-12}$ год⁻¹.

4. Вероятность разрушения изотермических резервуаров с двумя силовыми корпусами и внутренней подвесной крышей настолько низка, что сооружение защитной железобетонной стены для них не требуется. Защитную функцию полностью обеспечивает внешний корпус.

5. Для снижения риска последствий аварии существующих изотермических резервуаров "одинарного сдерживания" рекомендуется сооружение вокруг них защитной железобетонной стены.

6. В результате анализа риска вариантов конструкции изотермического резервуара для хранения жидкого аммиака предложена наиболее безопасная конструкция типа "full containment", способная конкурировать на мировом рынке.

Список использованных нормативных документов и технической литературы

1. EN 14620-1. Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C.
2. Б.В. Поповский, А.З. Майлер. Строительство изотермических резервуаров. М., "Недра", 1988.
3. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
4. Методика расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака. В сб. "Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах", серия 27, выпуск 2, М., ЗАО НТЦ ПБ, 2013.
5. МДС 11-16.2002. Методические рекомендации по составлению раздела "Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций".
6. API RP 581. Risk-Based Inspection Technology, American Petroleum Institute, 2008.
7. Ханухов Х.М., Алипов А.В. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций. Сборник научных трудов «Предотвращение аварий зданий и сооружений», Москва, 2011.-440с., стр. 384-422.
8. Баско Е.М. О ресурсе безопасной эксплуатации изотермических стальных резервуаров для хранения жидкого аммиака. "Промышленное и гражданское строительство", № 5, 2005 г.