

К сожалению, действующие редакции ст.179, 184 УПК РФ в настоящее время не позволяют этого делать, что, на наш взгляд, снижает эффективность проведения данных следственных действий.

#### **Использованные источники:**

1. Вошкина Н.Н. Проблемы законодательной регламентации личного обыска и освидетельствования с позиций криминалистической тактики // Криминалистика: актуальные вопросы теории и практики. Сборник материалов третьего Всероссийского круглого стола (17-18 июня 2004г.). Ростов-на-Дону, 2004. С.283-286.
2. Савельева М.В. Следственные действия: учебник для магистров. М., 2012.
3. Торбин Ю.Г. Понятие освидетельствования и тактика его производства // Вестник криминалистики. 2005. Вып.№1 (13). С.55-60.

*Четвертухин Н.В.*

*Ларионов М.В.*

*Чернобров А.Р.*

*Журавлев М.Д.*

*Широнин Е.В.*

*ООО «НПК Изотермик»*

### **РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКА**

Технические газы играют все возрастающую роль в мировой экономике. В бурно развивающихся отраслях – химии и нефтехимии – в качестве сырья используется около половины добываемого газа (бутан, пропан, пропилен, аммиак, этилен, кислород, азот, водород и т.д.). Расширяется применение сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива для пассажирского и коммунального автотранспорта, железнодорожного и водного транспорта, а также в ракетно-космической технике, что связано с более низкой стоимостью, большей доступностью и более высокой экологичностью.

В связи с этим, проблема хранения различных газов – важнейшая и неотъемлемая часть технологической цепочки «добыча-потребление», становится все актуальней в настоящее время.

Наиболее экономичный способ хранения технических газов – изотермический при температуре кипения и давлении, близком к атмосферному. При сжижении объем газов уменьшается от 246 (бутан) до 870 (кислород) раз, а его транспортировка становится мобильной – в цистернах (автомобильных или железнодорожных) и в крупнотоннажных судах-газовозах. Для хранения наибольшее распространение получили наземные вертикальные изотермические резервуары (ИР) (Рис.1).

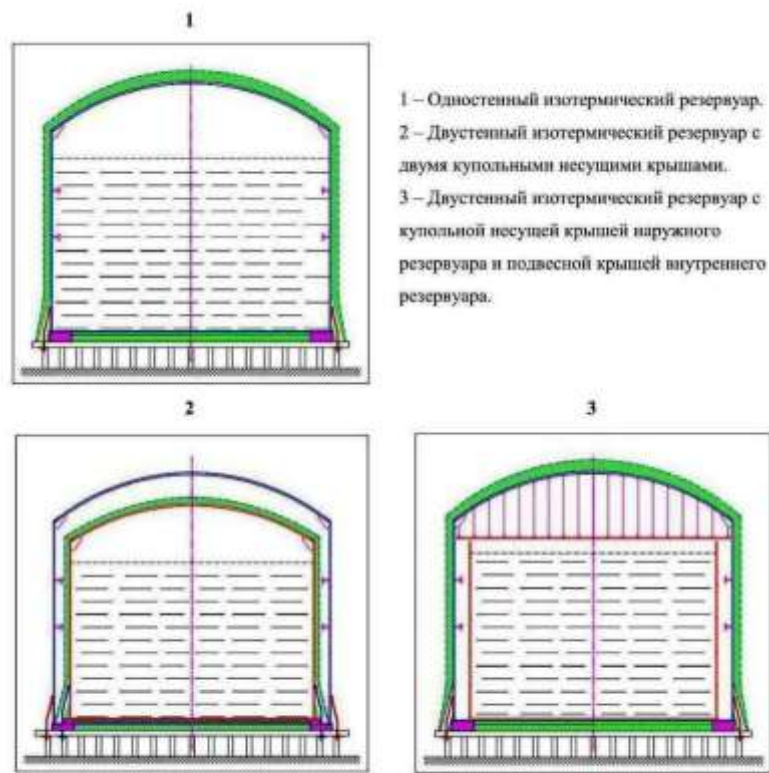


Рис.1 Основные виды вертикальных изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов.

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 настоящей статье исследуется влияние инновационных конструктивных особенностей ИР на снижение риска аварии и на уменьшение последствий аварии.

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.*

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 (табл. 1) приведены сводные данные по авариям и инцидентам на изотермических резервуарах сжиженных газов в России (по данным экспертиз промышленной безопасности, проведенных ООО “НПК Изотермик”).

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.

Таблица 1.

№ п/п	Авария, инцидент	Причины аварии, инцидента	% к итогу	Частота реализации сценария аварии, год-1
			РФ и США 7700 резервуаро-лет, 2 аварии	
1	Авария, полное разрушение ИР	Отказ компрессора компримирования аммиака + «человеческий фактор»	100	$2,6 \times 10^{-4}$
			РФ 2100 резервуаро-лет, 1 авария, 9 инцидентов	
1	Авария, полное	Отказ компрессора компримирования аммиака + «человеческий фактор»	10%	$4,5 \div 5,0 \times 10^{-4}$

	разрушение ИР			
2	Инцидент	Утечка аммиака через микротрещины во внутреннем днище резервуара, повышение концентрации аммиака в межстенном пространстве.	10%	$4,5 \div 5,0 \times 10^{-4}$
3	Инцидент	Трещина в «воротнике» трубопровода выхода жидкого аммиака. Ошибка проекта.	10%	$4,5 \div 5,0 \times 10^{-4}$
4	Инцидент	Недопустимая деформация анкерных полос, просадка ИР из-за гниения деревянного опорного кольца	10%	$4,5 \div 5,0 \times 10^{-4}$
5	Инцидент, не связанный с эксплуатацией	Нарушение условий гидро-пневмоиспытаний, повлекшее недопустимые деформации резервуара *)	40%	$6,6 \times 10^{-2}$
6	Инцидент, не связанный с эксплуатацией	Нарушение правил безопасности при вводе ИР в эксплуатацию после технической диагностики	20%	$3,3 \times 10^{-3}$

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

Далее в оценке риска аварии инциденты не используются.

На основании фактов приходим к выводу, что 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 [6] “В условиях длительного (более 40 лет) 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.

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  $10^{-6}$ . Рассматривалась вероятность отказов систем КИПиА, автоматических систем управления (автоматического регулирования, контроля, блокировки, сигнализации), противоаварийной защиты. В качестве исходных данных для расчета вероятности реализации опасных событий использовались данные по надежности приборов и элементов оборудования [7].

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  $2,6 \times 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>.

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 не менее чем 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:

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

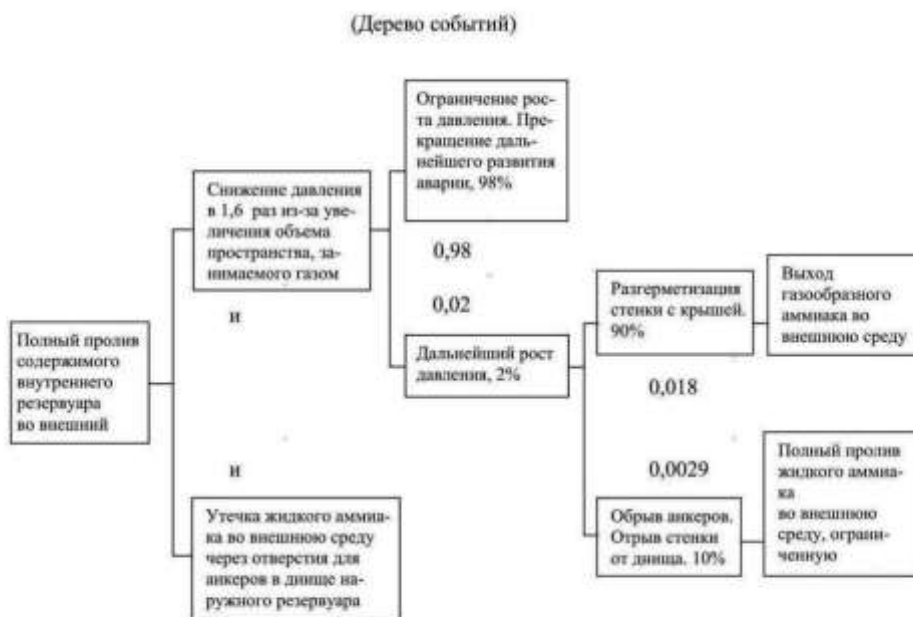
Принимаем для дальнейшего анализа худший сценарий аварии, т.е. считаем, что содержимое внутреннего резервуара полностью проливается в наружный резервуар. Считаем внутренний резервуар полностью заполненным продуктом.

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  $0,3$  кгс/см<sup>2</sup>, 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. 2). Условную вероятность разрушения внутреннего резервуара принимаем равной

единице.



*Рис. 2 Сценарии развития аварии при разгерметизации внутреннего резервуара с полным проливом жидкого аммиака в наружный резервуар*

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.

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:

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

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 инновационным конструктивным решениям в ИР относятся: проектирование легкобрасываемой крыши и/или повышение прочности анкерных креплений.

Как показывают расчеты на примере аммиачного резервуара вместимостью 30000 тонн, до тех пор, пока резервуар удерживается анкерами, напряжение в окрайке днища в уторном узле практически постоянно, определяется гидростатическим давлением жидкости и незначительно зависит от давления газа. В этом случае при всех значениях давления газа напряжения в узле стыка стенки с днищем меньше напряжений в узле стыка стенки с крышей (линии 1 и 2 на рис. 3). 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 оказываются выше напряжений в узле стыка стенки с крышей (линии 2, 3 и 4 на рис. 3). Поэтому при обрыве анкеров в первую очередь должен произойти отрыв стенки от днища, что и имело место в Ионаве.



Рис. 3. Меридиональное напряжение  $\sigma_z$  в узлах стыка стенки резервуара с днищем и крышей при действии гидростатической нагрузки и избыточного давления  $P$ .

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 легкобрасываемой крыши. 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.

Конструкция ИР жидкого аммиака типа "full containment", имеющая два силовых корпуса – внутренний и наружный, и подвесную паропроницаемую внутреннюю крышу и свободное межстенное пространство без теплоизоляции (теплоизоляция наружного резервуара – пеностекло) обеспечивает максимальную из возможных вариантов надежность конструкции и имеет ряд следующих преимуществ:

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.

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.

3. Не требуется система осушения межстенного пространства азотом.

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, потребуются большее время для создания критического давления газообразного аммиака и, соответственно, больше времени для принятия решения по выходу из этой аварийной ситуации.

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<sup>-1</sup>. 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.

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.

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;
- обеспечивает пожарную безопасность, т.к. пеностекло не горит;
- обладает отличными теплоизоляционными свойствами;
- уменьшает нагрузку на фундамент;
- обеспечивает 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.

#### Выводы:

1. Риск аварии полного разрушения ИР с двойным силовым корпусом и двумя стационарными купольными крышами оценивается величиной  $4,34 \times 10^{-7}$  год<sup>-1</sup> 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  $\gamma_n$ .

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  $4,7 \times 10^{-8}$  год<sup>-1</sup>. Вероятность полного разрушения ИР с двумя силовыми корпусами и подвесной внутренней крышей не более  $2,8 \times 10^{-12}$  год<sup>-1</sup>.

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.

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.

#### **Использованные источники:**

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 0oC and -165oC, British Standards Institution, 2006.
2. Б.В. Поповский, А.З. Майлер. Строительство изотермических резервуаров. М., "Недра", 1988.
3. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах. (приказ Ростехнадзора от 13.05.2015 №188).
4. API RP 581. Risk-Based Inspection Technology, American Petroleum Institute, 2008.
5. Ханухов Х.М., Алипов А.В. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций. В сборнике научных трудов «Предотвращение аварий зданий и сооружений», Магнитогорский дом печати, 2011, -440 с., стр. 384-422.
6. Баско Е.М. О ресурсе безопасной эксплуатации изотермических стальных резервуаров для хранения жидкого аммиака. "Промышленное и гражданское строительство", № 5, 2005 г.
7. Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. Надежность технических систем и оценка риска, М., "Машиностроение", 1984.