

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Кондрашова О.Г., Назарова М.Н.

Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в последние годы в резервуаростроении, резервуары для нефти и нефтепродуктов остаются одними из наиболее опасных объектов.

Это связано с целым рядом причин, наиболее характерными из них являются:

- высокая пожаровзрывоопасность хранимых продуктов,
- крупные размеры конструкций и связанная с этим протяженность сварных швов, которые трудно проконтролировать по всей длине,
- несовершенства геометрической формы, неравномерные просадки оснований,
- большие перемещения стенки, особенно в зонах геометрических искажений проектной формы,
- высокая скорость коррозионных повреждений,
- малоцикловая усталость отдельных зон стенки конструкции,
- сложный характер нагружения конструкции в зоне уторного шва в сочетании с практическим отсутствием контроля сплошности этих сварных соединений.

С каждым годом количество аварий на резервуарах возрастает в связи с тем, что большой процент резервуаров уже выработал свой проектный ресурс. Износ эксплуатируемых вертикальных стальных резервуаров (РВС) составляет 60 – 80%. На основании обследования ЦНИИПСК [2] установлено, что общее число аварий в 3-5 раз больше регистрируемых. Интенсивность возникновения аварийных ситуаций остается достаточно высокой и составляет за последние 30 лет около 0,0003 разрушений резервуаров в год. Анализ динамики риска разрушений [3] показал, что фактический риск аварий на два порядка превышает нормативное значение и составляет $1,6 \cdot 10^{-3}$.

Опасность возникновения аварийных ситуаций оценивается тяжестью причиняемого ущерба, который зависит от того, как проявляется авария: в виде взрывов и пожаров от разлившегося н/продукта, в виде хрупких разрушений или локальных отказов резервуаров. Как показывает практика, аварии РВС в большинстве случаев сопровождаются значительными потерями н/продуктов, отравлением местности и гибелью людей. В экстремальных случаях по статистическим данным общий материальный ущерб превышает в 500 и более раз первичные затраты на сооружение резервуаров.

Поэтому есть основания считать, что на сегодняшний день вопрос обеспечения надежности резервуарных конструкций остается нерешенным.

Проблема повышения надежности резервуарных конструкций должна решаться на всех этапах при проектировании, при изготовлении, при монтаже и испытаниях, при эксплуатации и диагностировании резервуаров.

Для разработки мероприятий, позволяющих предотвратить аварии и исключить недостатки, допущенные при проектировании РВС, необходимо изучать опыт их эксплуатации и проанализировать причины аварий.

Анализ статистических данных за последние 30 лет показал, что наиболее распространенными авариями резервуаров являются хрупкое разрушение (63,1 %), затем – взрывы и пожары (12,4 %). Поэтому для исследования практический интерес представляет вопрос изучения причин возникновения, последствий и мероприятий по предотвращению данного рода аварий.

Рассмотрим несколько случаев хрупкого разрушения РВС [1].

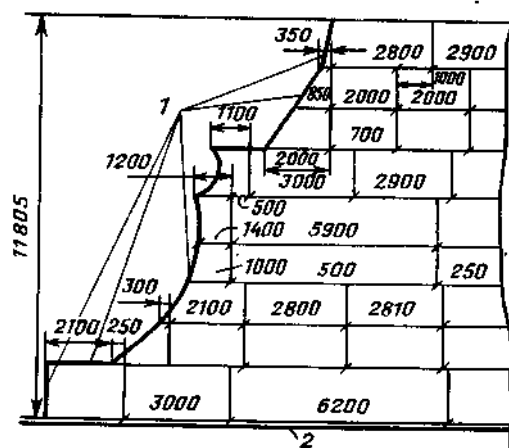
Полное разрушение РВС вместимостью 700 м³ произошло в Якутии при температуре –57°. В соответствии с типовым проектом резервуар предназначался для эксплуатации в условиях Крайнего Севера с расчетной температурой до –65°. Стенка резервуара должна быть изготовлена в соответствии с ГОСТ из низколегированной стали марки 09Г2С-15. Восстановление картины аварии производилось по траектории трещины и кристаллографическому характеру ее поверхности. Из чего было установлено, что хрупкая трещина возникла в уторном шве в области стыка стенки с днищем и распространилась по образующей стенки на всю её высоту. Интенсивный разлив н/продукта через образовавшийся проем привел к возникновению реактивной силы, под действием которой произошло лавинообразное разрушение стенки и днища резервуара.

Анализ обследования конструкционного материала показал, что резервуар был изготовлен из кипящей низкоуглеродистой стали, что является нарушением требований проекта. Кроме того, некачественное выполнение сварных швов и высокие реактивные напряжения, возникшие при низких температурах, инициировали развитие хрупкой трещины. Это трещина распространилась по всей высоте стенки и привела к полному разрушению резервуара, поскольку температура остановки хрупкой трещины у исследованной стали значительно выше температуры окружающей среды в момент аварии.

Другим примером аварии может послужить разрушение РВС вместимостью 2000 м³, которое произошло в Ивановской области. Согласно проекту стенка резервуара была изготовлена из низкоуглеродистой стали марки ВСтЗсп-5. Из фрагмента развертки стенки разрушившегося резервуара (рис.1) видно, что для изготовления стенки были использованы листы разных размеров, что является нарушением проекта. К тому же не соблюдены требования проекта к выбору марки стали. В момент аварии температура стенки резервуара была выше температуры окружающей среды. Установлено, что трещина возникла в стыке стенки с днищем в сварном шве, с помощью которого был заварен монтажный проем, не предусмотренный проектом. По вертикальному сварному шву трещина пересекла первый пояс, распространилась по горизонтальному шву монтажного проема и перешла на основной металл второго пояса. Разрушение второго и последующих поясов по основному металлу сопровождалось образованием косоугольного излома, что является признаком вязкой трещины.

Траектория трещины показана на рис. 1.

Поскольку распространение трещины происходило под углом 45° к образующей стенки, то вследствие этого стенка резервуара оторвалась от днища. При этом реактивная сила, вызванная потоком выливающегося н/продукта, частично развернула стенку, так как она не была полностью оторвана от крыши, вместе с которой и отбросила её на обвалование.



1- траектория трещины;
2 – днище

Рисунок 1 – Фрагмент развертки стенки разрушившегося резервуара вместимостью 2000 м³ и траектория развития трещины

Результаты исследования и анализ поверхности трещины позволяют заключить, что авария резервуара вызвана появлением хрупкой трещины в сварном шве монтажного проема. Причиной появления хрупкой трещины явился дефект сварки монтажного проёма, при которой образовался глубокий непровар. Можно также заключить, что допущенное отклонение от проекта – применение стали марки СтЗкп (кипящей) вместо ВСтЗсп-5 (спокойной) не стало непосредственной причиной аварии, поскольку использованная сталь сохраняла при температуре, при которой произошла авария, достаточную трещиностойкость для того, чтобы исключить проникновение трещины в соседний пояс при жестком нагружении. Проведенный анализ показывает, что основную роль в обеспечении надежности резервуара играет качество сварки. Особенность данной аварии заключается в том, что она сопровождается смешанным разрушением, то есть образованием хрупкой и вязкой трещин. В практике известны случаи, когда хрупкая трещина, пройдя несколько миллиметров, превращалась в вязкую, и на этом процесс разрушения останавливался. В анализируемом случае распространение трещины продолжалось вязко, приведя к полному разрушению резервуара. Вязкому разрушению резервуара способствовало постоянно увеличивающееся нагружение краев отверстия при истечении продукта, возникшее при частичном отрыве листа, которым был заварен монтажный проем.

Отметим, ещё одну аварию резервуара вместимостью 5000 м³, вызванную хрупким разрушением, которая произошла при температуре – 34°. В данном случае трещина произошла в сварном шве корпуса люк-лаза. При внешнем осмотре было установлено, что сварка корпуса люка-лаза проведена без вывода кратера сварного шва на технологическую прокладку. В результате чего образовался непровар, который послужил причиной возникновения области повышенной концентрации напряжения. Появлению хрупкой трещины способствовали низкая температура окружающего воздуха и концентрация напряжения около отверстия в стенке резервуара, в которую вварен корпус люка-

лаза. Неправильное размещение корпуса люка-лаза привело к тому, что сварной шов с дефектом оказался в области максимальной концентрации напряжения. Развитие хрупкой трещины сопровождалось разрушением корпуса люка-лаза с одновременным переходом на основной металл стенки резервуара. В результате края стенки резервуара потеряли устойчивость и раскрылись под действием гидростатического давления. Через образовавшееся в стенке отверстие произошел выброс продукта, что привело в дальнейшем к разрыву стенки резервуара.

В заключении, можно считать, что непосредственной причиной разрушения резервуара является концентратор напряжения в корпусе люка-лаза, вызванный тем, что при его сварке кратер не был выведен на технологическую прокладку, то есть не были соблюдены требования при сварке к основному металлу люка-лаза.

Изучая статистику разрушений резервуаров, можно отметить, что на практике большинство хрупких разрушений РВС возникает от сварочных дефектов или трещин малоциклового усталости, возникающих вблизи мест концентрации напряжений. Характерными местами разрушений являются технологические отверстия, уторные и монтажные соединения.

Хрупкое разрушение РВС происходит под влиянием комплекса неблагоприятных факторов. В числе преобладающих факторов, определяющих хрупкое разрушение резервуаров, можно назвать температуру. Понижение температуры влияет на прочность металла. Известно, что в металле без трещин и надрезов прочность при понижении температуры не снижается, а в металле с концентраторами напряжений разрушение становится более хрупким с понижением температуры. Однако, как показывает практика эксплуатации резервуаров, низкая температура и соответствующая ей повышенная хрупкость основного металла не являются обязательными условиями внезапного разрушения конструкций.

На развитие хрупкого разрушения существенно влияют свойства сталей. Вероятность хрупкого разрушения увеличивается при понижении пластических свойств (охрупчивании) металла. В такой же качественной зависимости находится частота разрушения от ударной вязкости основного металла. В большей степени влияние ударной вязкости сказывается при наличии значительных концентраций напряжений. Многие стали под влиянием ряда факторов могут перейти из вязкого состояния в хрупкое.

К таким факторам можно отнести: понижение температуры, наличие объемно-напряженного состояния в сварных швах или околошовной зоне, в которых могут наблюдаться дефекты в виде непроваров и микроскопических трещин, изменение скорости нагружения и уровня разлива н/продуктов в РВС.

Из числа элементов, входящих в состав низкоуглеродистой стали, широко применяемой для изготовления резервуаров, наибольшее влияние на ударную вязкость и критическую температуру хрупкости оказывает содержание углерода. С увеличением количества углерода склонность стали к хрупкому разрушению увеличивается, поэтому содержание углерода не должно превышать 0,2-0,22 %. Марганец при его содержании до 0,65 % положительно влияет на механические свойства и свариваемость стали, одновременно уменьшая склонность металла к хрупкому разрушению. Наличие кремния свыше 0,25 % может привести к ухудшению свариваемости и образованию дефектов в процессе сварки. Весьма существенным для свойств сталей при низких температурах является содержание

серы. Её содержание не должно превышать 0,04 %. Сера не должна содержаться в стали в виде скоплений или сульфидных строчек, наличие которых может привести к скоплениям значительных концентраций.

Кроме того, не развитие процесса хрупкого разрушения РВС оказывают влияние дефекты коррозионного происхождения. Следует отметить, что для резервуаров характерны повреждения вследствие местной коррозии внутренней поверхности нижней части стенки, окрайки днища и углового шва таврового соединения с днищем. Степень коррозионных повреждений зависит от параметров агрессивной среды (уровня подтоварной воды, наличия в ней концентрации H_2S , CO_2 и др. агрессивных компонентов), режима эксплуатации (колебания уровня и оборачиваемости продукта), качества металла (углерода, легирующих добавок) и вида и качества антикоррозионного покрытия.

Практика исследования эксплуатируемых резервуаров показывает, что металл уторного узла и 1-ого пояса стенки резервуара чаще всего подвержены глубокой язвенной коррозии, вследствие чего происходит интенсивное локальное разрушение. На границе внутреннего сварного шва и внутренней поверхности стенки наблюдается ножевая коррозия.

Анализируя сложный механизм протекания язвенной и ножевой коррозии резервуара в зоне воздействия подтоварной воды, можно выделить следующие этапы:

- в условиях химической и структурной неоднородности сварного соединения, наличия коррозионно-активной среды происходит электрохимическая коррозия, приводящая к образованию коррозионных язв, так и насыщению водородом поверхностных слоев металла,
- под воздействием потока водорода в поверхностных слоях в отдельных участках металла происходит образование многочисленных пор, содержащих водород,
- под воздействием нормальных к поверхности металла напряжений возможно развитие как пластических сдвигов, так и межзеренных трещин, вызывающих отрыв фрагментов металла, что обуславливает резкое увеличение скорости локальной коррозии в отдельных зонах резервуара.

Такие факторы коррозионного воздействия на металл приводят к водородному охрупчиванию стали резервуара.

Помимо хрупких разрушений для резервуаров характерны аварии, сопровождающиеся взрывами и пожарами.

Статистика данных по пожарам показывает, что наиболее опасным фактором возникновения пожара является гидродинамическое истечение н/продукта, хранимого в резервуаре. Из общего числа случаев разрушений резервуаров третья часть происшедших аварий сопровождалась разливом н/продуктов за пределы территории парка и приводила к катастрофическим последствиям с большим материальным ущербом и гибелью людей. Особенностью гидродинамического растекания является перенос вместе с горячей жидкостью открытого огня, теплового излучения пламени и других опасных факторов пожара. Так, например, на Каменской нефтебазе в Ростовской области вследствие полного разрушения резервуара объемом 700 м^3 произошел пожар, который охватил все строения и часть резервуарного парка нефтебазы и распространился на жилые дома. Площадь пожара составила более 10 тыс. м^2 . Убыток более 1млн.руб. Пожары от утечки н/продуктов могут происходить и не

при полном разрушении резервуаров, они могут быть связаны с утечками продуктов через прокорродировавшие места резервуаров.

Типичными пожарами РВС также являются пожары при очистке и ремонте резервуаров, они составляют 40 % от общего числа пожаров [4].

Пожары при очистке резервуаров чаще всего происходят из-за вспышки паров н/продукта от выхлопной трубы при зачистке резервуаров от тяжелых донных отложений. Также к пожару или взрыву могут привести нарушения герметичности фланцевых соединений, запорной и регулировочной арматуры, неисправности предохранительных клапанов и нарушения правил эксплуатации оборудования. При сливно-наливных операциях чаще всего причиной возникновения пожаров в резервуарах являются разряды статического электричества в виде искр, что является недопустимым во взрыво- и пожароопасных условиях.

Для ликвидации искры в качестве защитной меры используют заземление и антистатические присадки. Чтобы избежать распространения пожара, охватывающего соседние резервуары, необходимо обеспечить соблюдение требуемых противопожарных разрывов между резервуарами.

При опорожнении н/продуктов неисправность дыхательной арматуры резервуаров или превышение допускаемой скорости слива приводят к образованию вакуума. В таких условиях в верхних поясах корпуса образуются значительные напряжения и появляются вмятины. Появление данных дефектов сопровождается изменением формы резервуаров. При многократной деформации в местах расположения вмятин ухудшаются прочностные свойства металла. При этом возможен разрыв корпуса резервуара с последующим истечением продукта, и как следствие увеличивается риск возникновения взрыва и пожара.

К аварийным ситуациям при хранении н/продуктов нередко приводит осадка основания РВС. Осадка основания в основном происходит не равномерно, наибольшего значения она достигает около стенок и наименьшего – в центре. В результате местного повреждения краев основания в корпусе и днище резервуара развиваются значительные напряжения, которые могут привести к изменению формы цилиндрической оболочки с образованием выпучин и вмятин. Как показывает практика, разрушение резервуаров происходит чаще всего не при первом гидравлическом испытании, а после несколько лет эксплуатации. Характер разрушения зависит от многих факторов: качества монтажа, условий эксплуатации резервуаров.

Как показывает опыт эксплуатации стальных вертикальных резервуаров, особенно резервуаров большой вместимости, практически сразу после гидравлического испытания возникает неравномерная осадка между его центральной частью и стенкой из-за различного удельного давления на грунт от массы стенки и от гидростатической нагрузки. Давление под стенкой колеблется в пределах 0,9-1,5 МПа, а в средней части не более 0,1-0,2 МПа. Из практики эксплуатации резервуаров известны случаи, когда разница осадки между центральной и периферийной частью днища достигает 0,6-0,8 м.

Осадка оснований резервуаров, вызываемая деформацией грунтов, является неизбежным явлением в практике эксплуатации резервуаров. Осадка основания возникает в результате сжатия грунта под нагрузкой, вызванной массой конструкции резервуара и хранимой в нем жидкости.

Неравномерная осадка и местные просадки по периметру дна резервуара также являются неизбежными вследствие невозможности достижения одинаковой степени уплотнения грунтов искусственного основания.

Большие неравномерные осадки по площади дна и по его периметру вызывают дополнительные деформации в конструктивных элементах резервуаров, особенно в нижнем узле сопряжения стенки с окрайкой дна и связанные с ними дополнительные напряжения. Сочетание значительных эксплуатационных напряжений с дополнительными от неравномерной осадки может привести к разрушению узла сопряжения или к разрыву полотнища дна. В мировой практике эксплуатации стальных резервуаров известны случаи разрушения резервуаров, вызванные неравномерными осадками основания.

К числу таких аварий относятся разрыв дна длиной 10 м раскрытием 0,15 м у резервуара корпорации Mitsubishi (Япония, 1974 г.), две аварии на нефтебазе около Лондона несколько аварий на резервуарном парке фирмы ESSO (г. Фоулей, Англия) [12]. Характерно, что на нефтебазе в г. Фоулей первая авария произошла во время их испытания (1955 г.). Причиной разрушения дна резервуаров была большая локальная просадка основания. В начале 70-х годов произошли еще три крупных аварий с резервуарами диаметром 53 м новой постройки. Два резервуара заполнены водой, один - нефтью. Один из поврежденных резервуаров при испытании получил в среднем осадку, равную 254 мм, а периферийная осадка по площади дна на участке шириной 2,0 м от стенки к центру - 150 мм, в то время как на не разрушенных участках она составила 40-50 мм.

Детальное рассмотрение актов расследований аварий резервуаров за последние 30 лет показывает, что в 38 случаях из 44 имела место неравномерная осадка основания, которая в сочетании с другими факторами явилась причиной разрушения. О количественном соотношении влияния осадки и других факторов судить трудно, т.к. нет действительной картины осадки этих резервуаров. Тем не менее, известен ряд случаев, когда причиной разрушений явилась только осадка, в одном случае - это различная по величине осадка корпуса резервуара и технологических трубопроводов, что повлекло за собой отрыв последних от стенки и дальнейший разрыв последней; в другом - неравномерная осадка, достигшая 320 мм, что привело к разрыву стенки и полному разрушению резервуара в третьем - неравномерная осадка, приведшая к разрыву дна.

Необходимо отметить, что обычно аварии обусловлены комплексом причин, одной из которых является неравномерная осадка отдельных участков основания.

В заключение нужно отметить, что предпосылкой развития аварийных ситуаций РВС является совместное действие следующих факторов: наличие дефектов, воздействие условий окружающей среды, нарушение требований проекта и режимов эксплуатации резервуаров, несоблюдение ПТБ и др.

Поэтому решение проблемы повышения работоспособности резервуаров должно сводиться к осуществлению конструктивно-технологических, эксплуатационных и организационных мероприятий.

Конструктивно-технологические мероприятия по повышению ресурса безопасной эксплуатации резервуаров выполняются на стадиях проектирования, изготовления и монтажа.

Одним из важнейших условий обеспечения высокой надежности и безопасности резервуаров является использование при их изготовлении мелкозернистых сталей с высокой стойкостью к хрупким разрушениям, а также

получение качественных сварных соединений с минимальным уровнем пластических деформаций.

Основные мероприятия должны быть направлены на исключение дефектов в заводских сварных швах. При проведении обследований резервуаров наблюдаются грубые отклонения размеров сварных швов от требований ГОСТ. Швы с завышенными размерами имеют крупнозернистую литую дендритную структуру металла. Если в сварном шве с крупным зерном имеется завышенное усиление, и в этой зоне имеется подрез или наплыв (тоже очень частый заводской дефект), то, в результате резкого увеличения коэффициента концентрации напряжений, риск возникновения хрупкого или малоциклового разрушения конструкции в таких зонах высок.

Кроме того, необходимо повысить качество врезки технологических проемов для монтажа внутреннего оборудования. Несовершенство выполнения технологических проемов и последующая неправильная установка вставок, накладок, заглушек способствуют значительной концентрации напряжений в этих зонах.

Эксплуатационные и организационные мероприятия по повышению безотказной работоспособности резервуаров сводятся к соблюдению регламента работ по заполнению и опорожнению н/продуктов, обновлению антикоррозионных покрытий и проведению текущих освидетельствований с установлением их фактического качества. Надлежащие условия эксплуатации, регулярное квалифицированное обследование резервуаров, выполнение регламентных мероприятий могут значительно повысить ресурс РВС. Техническое освидетельствование резервуаров включает в себя регулярный внешний осмотр, проведение диагностических мероприятий и прогнозирование на основании данных обследования остаточного ресурса РВС.

Таким образом, учитывая выше изложенное, есть основания считать, что вопрос обеспечения безопасной эксплуатации РВС остается на сегодняшний день нерешенным и решение этого вопроса должно сводиться не только к строгому соблюдению типового проекта, но и к обеспечению качественного и своевременного диагностирования с использованием современных методов и средств диагностики с последующей оценкой остаточного ресурса РВС.

Список использованных источников

1. Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995. – 253с.
2. Кандаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения // Промышленное и гражданское строительство. 1998, № 5.
3. Швырков С.А., Семиков В.Л. / Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1996, № 5. С. 39-50.
4. Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами // Обзорная информация. 1992, вып.3-4. – 100 с.