

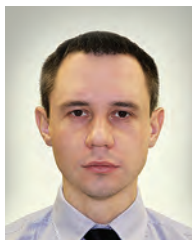


ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УТОРНОГО УЗЛА СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В СЛУЧАЕ ВОЗРАСТАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

УДК 621.642

Ключевые слова: резервуар вертикальный стальной, неограниченное возрастание внутреннего давления, прочность, уторный узел.

О.В. Худяков
ведущий инженер расчетной группы технологического отдела филиала ОАО «Гипротрубопровод» – «Самарагипротрубопровод», г. Самара
KhudyakovOV@gtpsam.gtp.transneft.ru



С.В. Индин
главный инженер филиала ОАО «Гипротрубопровод» – «Самарагипротрубопровод», г. Самара
IndinSV@gtpsam.gtp.transneft.ru



В статье рассмотрен актуальный вопрос современной практики проектирования резервуаров – определение прочности уторного узла вертикальных стальных резервуаров (РВС) при неограниченном возрастании внутреннего давления. Разработана методика расчета для определения предельно допустимого внутреннего давления в РВС в широком диапазоне параметров. Построена конечно-элементная модель в BK ANSYS.

Одним из актуальных аспектов современной практики проектирования РВС является вопрос прочности уторного узла при действии внутреннего давления. Этот вопрос напрямую связан с понятием взрывозащищенности резервуара. Под взрывозащищенностью подразумева-

ется предотвращение разрушения стенки и узла сопряжения стенки с днищем, а также разлива продукта в обвалование в случае аварийного возрастания давления в резервуаре. Это может иметь место не только при возгорании продукта, но и в случае срабатывания системы газового пожаротушения либо

выхода из строя дыхательной арматуры. Несмотря на кажущуюся простоту, вопрос проектирования РВС с учетом возможного превышения нормативных значений избыточного давления нельзя считать закрытым. Это становится очевидным при анализе действующей нормативно-технической документации (НТД).

ГОСТ 31385-2008 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» [1] дает понятие взрывозащищенной каркасной крыши через конструктивные ограничения размера катета и мест крепле-

ния настила к каркасу. Это должно привести к созданию «слабого узла», что обеспечит частичный или полный отрыв настила от каркаса крыши резервуара и быстрый сброс избыточного давления. На этом требования данного документа к учету возрастания избыточного давления в РВС заканчиваются.

СТО-СА-03-002-2009 «Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [2] также содержит требования к каркасным крышам во взрывозащищенном исполнении и к созданию «ослабленного узла». Но кроме этого, в нем содержатся расчетные критерии взрывозащитности, в том числе сравнение несущей способности шва сопряжения стенки и крыши и узла сопряжения стенки с окрайкой днища. Однако СТО-СА-03-002-2009 ограничивается расчетным аварийным давлением в 1,6 раза больше рабочего значения и не рассматривает возможность неограниченного роста нагрузки.

Иные нормативные документы, действующие на территории России, не содержат требований и рекомендаций к проектированию РВС в условиях возрастания избыточного давления выше проектных значений.

Как видно из представленного выше анализа действующей НТД, в настоящее время рассмотрение вопроса поведения конструкции при воздействии избыточного давления не применяется к РВС, у которых листовая настил крыши прикреплен ко всем элементам каркаса. Данная статья посвящена вопросам прочности уторного узла («днище – стенка») РВС в случае неограниченного роста внутреннего давления. Конструктивное исполнение крыши РВС в рамках данного исследования не рассматривалось.

Обобщенный подход к проектированию РВС при рассмотрении прочности уторного узла

На сегодняшний день главной аналитической работой, посвященной вопросу прочности уторного узла «днище – стенка» в случае неограниченного возрастания

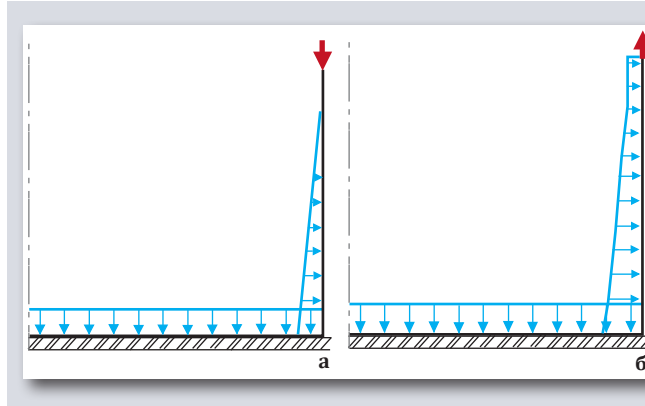


Рис. 1
Расчетная схема:
а – 1-й этап нагружения;
б – 2-й этап нагружения.

внутреннего давления, является статья [3]. По мнению авторов статьи, понятие РВС, запроектированного с учетом возможности воздействия ненормативного избыточного давления, должно формулироваться следующим образом: резервуар корректно функционирует до давления P_{max} , если при этом значении внутреннего давления происходит разрушение крыши резервуара (отрыв настила от каркаса либо разрушение узла сопряжения «стенка – крыша»), но не происходит разрушения уторного узла «днище – стенка». Такой подход представляется разумным. Он позволяет не только обобщить требования ГОСТ 31385-2008 и СТО-СА-03-002-2009, но и расширить трактовку понятия РВС, работающего при воздействии избыточного давления (в том числе взрывозащищенного РВС).

Поскольку работа [3] была выполнена с применением аналитических методов, ее авторам осознанно пришлось пойти на ряд допущений в силу математической сложности задачи: решение получено для балочного элемента в плоской постановке; в месте сопряжения днища со стенкой приложен момент, равный пластическому моменту в краевом листе. В настоящей статье применен метод конечных элементов, что позволяет получить решение при более строгой постановке задачи.

Конечно-элементная модель РВС, построенная для исследования напряженно-деформированного состояния уторного узла «днище – стенка» при помощи МК ANSYS, включала в себя:

- центральную часть днища;
- окрайку днища;

Табл. 1
Параметры исследуемых РВС

Объем, м³	Диаметр, м	Высота стенки, м	Масса стенки, т	Масса крыши, т	Толщина окрайки днища, мм	Толщина поясов, мм
2000	15,18	12	36,0	17,0	7	8...8
5000	22,8		60,3	36,0	9	9...9
10 000	34,2		107,0	85,7	9	11, 10...10
20 000	45,6		164,0	165,0	9	13, 12...12

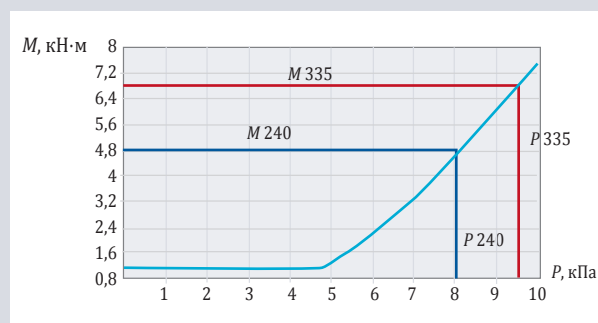
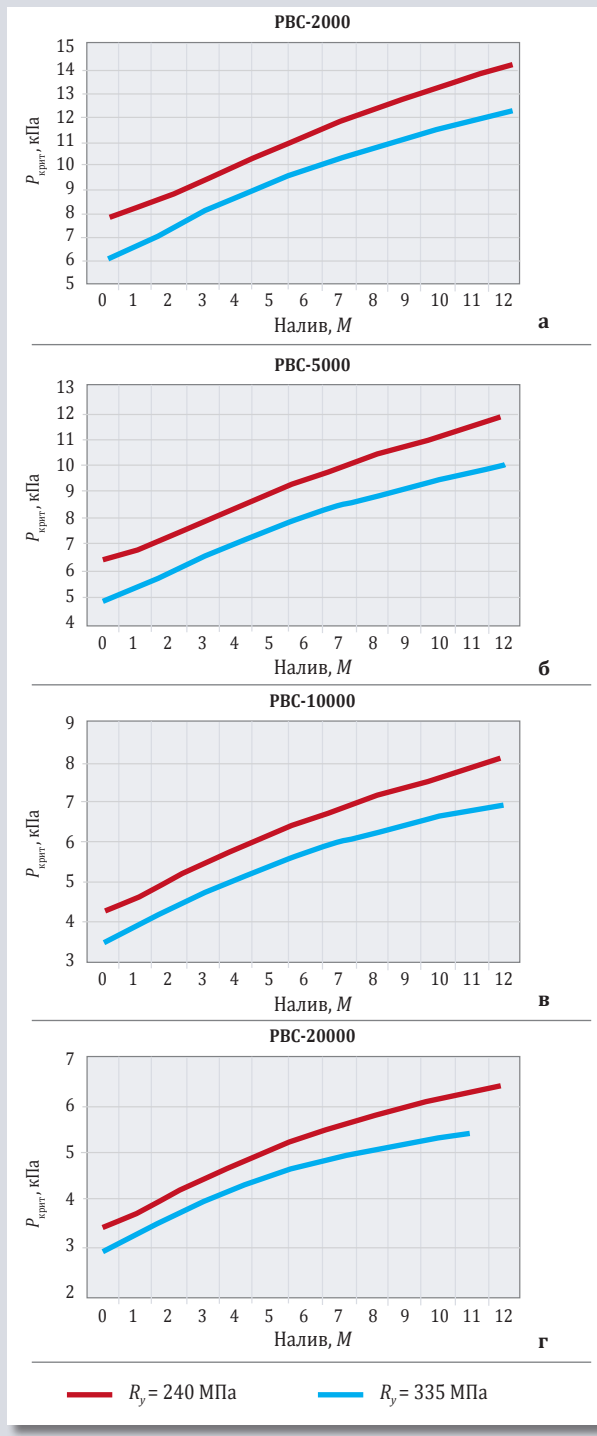


Рис. 2
Зависимость изгибающего момента в уторном узле M от внутреннего давления P для РВС-5000 при уровне налива $H = 6$ м

Рис. 3

Зависимость предельно допустимого давления P_{\max} при $R_y = 240$ МПа, $R_y = 335$ МПа от уровня налива продукта для: а – РВС-2000; б – РВС-5000; в – РВС-10000; г – РВС-20000.



• стенку резервуара на всю ее высоту.

Металлоконструкции резервуара задавались при помощи осесимметричных оболочечных элементов SHELL208. Это обосновано тем, что цилиндрический резервуар является конструкцией с осью симметрии, а гидростатическое давление продукта и избыточное давление в газовой среде распределяются

относительно нее равномерно. Вес крыши учитывался при помощи внешней нагрузки W_{Rr} приложенной к верху стенки РВС. Для решения контактной задачи «днище – фундамент» использовались конечные элементы CONTAC178. Расчет выполнялся с учетом геометрической нелинейности.

Нагружение модели проводилось в два этапа. На первом

этапе прикладывались собственный вес конструкций, учтенных в модели, вес крыши, а также гидростатическое давление продукта при наливе до заданной величины (рис. 1а). Обеспечивалась сходимость решения контактной задачи. На втором этапе к модели с учетом решения, полученного на первом шаге, прикладывалось необходимое значение избыточного давления. Воздействие подъемной силы учитывалось путем задания равнодействующей силы $F = 2\pi r^2 p_{изб} - W_{Rr}$ приложенной к верху стенки (здесь r – радиус резервуара, $p_{изб}$ – избыточное давление) (рис. 1б). Корректность приложения нагрузки на втором этапе нагружения обеспечивалась применением команды SFCUM.

В качестве критерия потери несущей способности уторного узла «днище – стенка» было принято достижение изгибающим моментом значения полного пластического момента $M_{pl} = R_y t_b^2 / 4$ (здесь R_y – предел текучести стали, t_b – толщина окрайки днища).

С целью определения влияния налива продукта на зависимость величины изгибающего момента в уторном узле M от внутреннего давления P расчеты для всех РВС выполнялись для уровней налива от 0 до 12 м с шагом 1 м. Плотность хранимого продукта была принята равной $\rho = 1$ т/м³. Величина давления, при котором изгибающий момент в уторном узле достигал предельного значения M_{pr} , принималась за предельно допустимое давление P_{\max} . При этом учитывались два возможных варианта материального исполнения РВС – из стали С240 и из стали С335.

Полученное в результате значение предельно допустимого давления P_{\max} должно быть использовано при дальнейшем проектировании покрытия резервуара.

Расчеты были выполнены для следующих типоразмеров резервуаров: РВС-2000, РВС-5000, РВС-10000, РВС-20000.

Параметры исследуемых РВС приведены в табл. 1.

График зависимости M от P для РВС-5000 при уровне налива

$H = 6$ м приведен на рис. 2. Дополнительными линиями на графике показаны точки достижения величиной M значений M_{pl} при $R_y = 240$ МПа и $R_y = 335$ МПа. Как видно из графика, используемая модель позволяет выполнить расчет НДС уторного узла резервуара при давлении P , существенно превышающем P_{max} .

Зависимости значений P_{max} от величины налива для РВС-2000...20000 при $R_y = 240$ МПа, $R_y = 335$ МПа приведены на рис. 3 соответственно.

Анализ приведенных графиков позволяет сделать следующие выводы.

Величина внутреннего давления, при которой достигается предельное состояние уторного узла «стенка – днище», возрастает с увеличением налива хранимого в РВС продукта. Таким образом, с точки зрения воздействия внутреннего давления наиболее опасным случаем является случай минимального уровня налива продукта в резервуаре.

Этот «странный» на первый взгляд вывод объясняется схемой деформирования уторного узла резервуара при различных уровнях налива. Распределение вертикальных перемещений элементов уторного узла для РВС-5000 при $P = 20$ кПа, $H = 1$ м и $H = 11$ м приведено на рис. 4 соответственно. Из приведенных результатов видно, что увеличение уровня налива продукта приводит к уменьшению зоны отрыва днища от фундамента и снижению вертикальных перемещений уторного узла. Это, в свою очередь, обуславливает более благоприятные условия работы конструкции, что и приводит к возрастанию предельного давления с увеличением уровня налива продукта.

Исходя из конструктивных и технологических ограничений при товарных операциях можно условно принять минимальный рассматриваемый уровень налива 1 м. Тогда для РВС-20000 с указанными в табл. 1 параметрами минимальное предельное давление при материальном исполнении из стали С240 составляет $P_{max} = 3,31$ кПа, при материальном исполнении из стали С335 – $P_{max} = 3,74$ кПа. Эти зна-

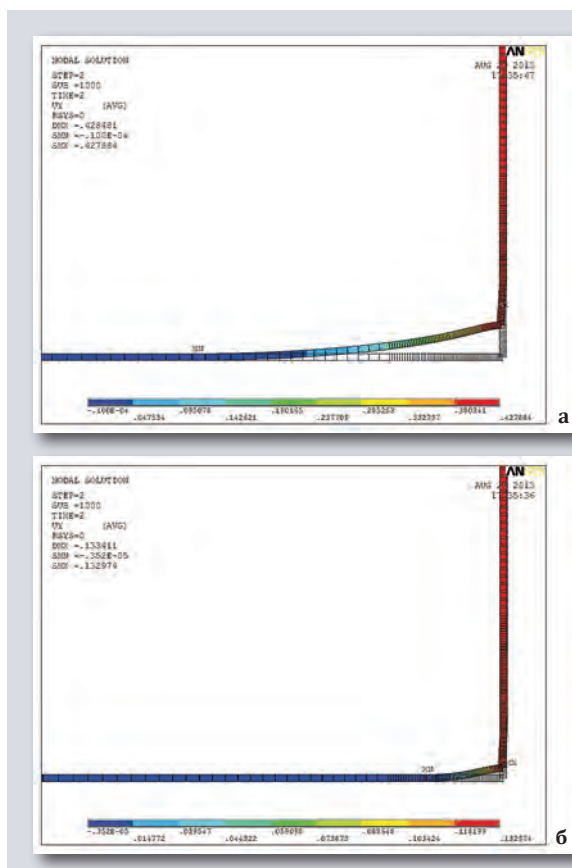


Рис. 4
Вертикальные перемещения уторного узла РВС-5000 при:
а – $P = 20$ кПа, $H = 1$ м;
б – $P = 20$ кПа, $H = 11$ м

Выводы

В данной статье разработана последовательность выполнения расчетов и построена конечно-элементная модель резервуара, позволяющая вычислить предельное давление, при котором наступает предельное состояние в уторном узле «стенка – днище».

Разработанная методика учитывает следующие параметры:

- диаметр и высота стенки РВС(П);
- масса стенки и крыши РВС(П);
- толщина стенки и окрайки днища РВС(П);
- свойства материалов стенки и окрайки днища РВС(П);
- плотность и уровень налива хранимого продукта.

Получение величины предельного значения внутреннего давления должно являться первым шагом в проектировании резервуаров, в том числе при учете взрывозащиты, так как без данных о несущей способности уторного узла «стенка – днище» проектирование покрытия резервуара и технологического оборудования, предназначенного для защиты от избыточного давления, не может быть выполнено корректно.

Чения достаточно близки к нормативному максимальному внутреннему давлению $P = 2$ кПа, что указывает на адекватность полученных результатов.

Полученная методика позволяет определить величины предельных давлений для РВС(П) в широком диапазоне параметров, что приводит к возможности корректного проектирования резервуаров в случае неограниченного роста внутреннего давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31385-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия.
2. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
3. Обеспечение несущей способности узла сопряжения стенки и днища взрывозащищенных вертикальных цилиндрических стальных резервуаров / И.С. Холопов [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 7. С. 52–54.