

УДК 624:014.2.074.433

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА В УТОРНОМ УЗЛЕ
СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ
ПРИ ОДОСТОРОННЕЙ СВЯЗИ ДНИЩА С ОСНОВАНИЕМ**

*д. т. н., проф., Егоров Е. А., асп. Соколова А. С.
Приднепровская государственная академия строительства и
архитектуры*

Введение. Стальные резервуары для хранения различных жидкостей широко применяются на промышленных объектах. Такие конструкции большого объема относятся к категории особо ответственных объектов, разрушения или аварии которых влекут за собой не только материальный ущерб, во много раз превышающий себестоимость, но и проблемы экологического характера. Поэтому более глубокое изучение работы вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР) и уточнение методики их расчета по-прежнему остаются весьма актуальными.

Анализ публикаций. Результаты многочисленных исследований и наблюдений за работой ВЦР для хранения жидких продуктов говорят о том, что действительная работа конструктивных узлов этих сооружений во многих случаях существенно отличается от физических представлений и соответствующих расчетных предпосылок, принимаемых на этапе проектирования. Одним из наиболее ответственных узлов таких конструкций является уторный узел – узел сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем. В этом узле, кроме мембранных усилий, определяемых по безмоментной теории, возникают дополнительные краевые усилия и изгибающие моменты, распределение которых имеет характер краевого эффекта.

В инженерных расчетах [1, 2] указанный узел рассчитывается с применением традиционных методов строительной механики, принимая для основания модель Винклера с двухсторонней связью. Днище при этом рассматривается как балка а упругом основании. Все это упрощает расчет, но, как показывает практика, не всегда дает правильные результаты.

В [3 – 6] приводятся результаты теоретических исследований работы рассматриваемого узла с учетом односторонней связи днища с основанием, что в большинстве случаев и имеет место. Но все они имеют целый ряд существенных недостатков, главные из которых сводятся к следующему: во-первых, полученные в них аналитические зависимости не позволяют осуществить детальный анализ напряженно-деформированного состояния на участках оболочки и днища по всей зоне краевого эффекта; во-вторых, все приведенные в указанных работах зависимости получены на основе представления днища в виде балки на упругом основании и, в-третьих, в них никак не учитывается нелинейная работа узла, которая имеет место в действительности. Все это может существенно влиять на полученные

результаты и выводы. В [7] рассмотрен вопрос влияния модели днища на точность расчета. Попытка аналитического решения рассматриваемой задачи в [8] с учетом геометрической и физической нелинейности оказалась неудачной, поскольку автору не удалось перейти к зависимостям, приемлемым для инженерных расчетов.

Цель статьи. В данной статье приведены результаты исследований краевого эффекта, возникающего в уторной зоне ВЦР, полученные на основе метода конечных элементов (МКЭ) с использованием ПБК «SCAD». Рассматривались случаи установки резервуаров на «мягких» и «жестких» основаниях.

Материалы и методы. В качестве примера, в статье рассмотрены результаты расчетов, выполненных для цилиндрической оболочки высотой 18 м, радиусом 44,35 м, толщина оболочки в зоне крепления её к днищу составляла 25 мм, толщина днища в месте сопряжения с оболочкой – 20 мм. Принятые параметры оболочки соответствуют параметрам резервуара объемом 100 000 м³.

Конечно-элементная модель оболочки формировалась из прямоугольных элементов, имеющих в библиотеке конечных элементов ПБК «SCAD» тип 44 [9]. Тестирование конечно-элементной модели осуществлялось на задачах с абсолютно жестким креплением оболочки к основанию. В качестве базы сравнения применялось значение величины изгибающего момента в точках сопряжения оболочки с жестким основанием, определяемое известным аналитическим решением [8]. В итоге были приняты конечные элементы размерами 0,696 м по окружности и 0,0375 м по высоте.

Расчетная схема днища строилась на основе модели «днище-пластинка», в которой основание задавалось одним коэффициентом жесткости $C1$. Расчет с односторонней связью днища с основанием выполнялся с учетом геометрической нелинейности. Для моделирования односторонней связи днища с основанием использовался двухузловой элемент односторонней связи, имеющийся в библиотеке конечных элементов ПБК «SCAD» тип 352 [9].

Расчет проводился с учетом гидростатической нагрузки при заполнении резервуара до отметки 17 м и результирующей силы q , возникающей от собственного веса стенки и кровли, веса снега и избыточного давления в паровоздушной среде. Учитывалось, что в процессе эксплуатации сила q может быть как догружающей (направлена вниз – на рис. 1, 2 положительные значения), так и подъемной (направлена вверх – на рис 1, 2 отрицательные значения).

При использовании МКЭ определение величины изгибающего момента m_0 непосредственно в точках сопряжения осуществлялось с помощью аппроксимации кривой изменения изгибающего момента по высоте уторной зоны оболочки (стенки резервуара) и построения возможного ее продолжения к точкам сопряжения с днищем. Это вызвано тем, что градиент изменений изгибающих моментов по высоте оболочки (при удалении от точек

сопряжения) настолько резкой, что даже при принятых размерах конечных элементов значение изгибающего момента m в центре самого ближнего к утору элемента может существенно (на 20 – 25 %) отличаться от величины m_0 .

Результаты. По результатам проведенных расчетов в зависимости от величины и направления силы q были построены графики изменения m_0 . Рассматривались варианты с коэффициентом основания $C1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$ (мягкое основание) и $C1 = 1 \text{ кН/см}^3$ (жесткое основание), рис. 1 и рис. 2. В обоих случаях при двухсторонней связи днища с основанием изменение m_0 на всем диапазоне значений q имеет линейный характер, графики изменения m_0 при учете односторонней связи днища с основанием имеют ярко выраженный перелом, соответствующий возникновению краевого отрыва днища от основания.



Рис. 1. Зависимость m_0 от величины нагрузки q при коэффициенте постели $C1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$

В случае $C1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$ при $q \approx -145 \text{ кН/м}$ (подъемная сила) как при двухсторонней связи так и при односторонней связи днища с основанием возникает краевой отрыв днища. Однако, при односторонней связи его величина в 5 – 6 раз больше. При этом изгибающий момент увеличивается на 10 – 25 %. Кроме того, в этом случае ($C1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$) при односторонней связи днища с основанием может возникать скрытый отрыв (образование внутренней волны поверхности днища [3]). В рассмотренном примере он имеет место в диапазоне значений q от -100 до -135 кН/м.

В случае жесткого основания при двухсторонней связи днища с основанием краевого отрыва не возникает, но при любых значениях q наблюдается скрытый отрыв. При односторонней связи днища с основанием на участках сопряжения стенки с днищем возникает краевой отрыв и изгибающий момент в стенке резервуара то увеличивается до 25 %.



Рис. 1. Зависимость m_0 от величины нагрузки q при коэффициенте постели $C1 = 1 \text{ кН/см}^3$

Выводы. Там образом, при определенных условиях (односторонняя связь днища с основанием, возникновение подъемной силы, жесткость основания) работа узла сопряжения цилиндрической оболочки с плоским дном может сопровождаться возникновением краевых и скрытых отрывов днища от основания, что в свою очередь приводит к изменениям напряженно-деформированного состояния и увеличению величины краевого изгибающего момента m_0 (в рассмотренном случае до 25 %).

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Нехаев Г. А. проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления – М. : АСВ, 2005. – 216 с.
2. Кузнецов В. В. Металлические конструкции. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. Премии СССР В. В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н. П. Мельникова) – М. : АСВ, 1998. – 576 с.
3. Егоров Е. А., Братусь Н. И. Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров на жестких фундаментах // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М. : ВНИИОЭНГ, – 1983. – № 5. – С. 17 – 18.
4. Иноуэ Такаюсу Проектирование резервуаров для нефти // «Китай Секкей». – 1976. – Т. 20. – № 1. – С. 43 – 49.
5. Ашкиназ М. И., Кузенко Ю. В. Расчет днищ металлических резервуаров повышенного давления без анкеров для хранения нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М. : ВНИИОЭНГ, – 1969. – № 1. – С. 17 – 22.
6. Еленицкий Э. Я. Расчет узла сопряжения стенки и днища вертикальных цилиндрических стальных резервуаров // Материалы межд. Конференции «Новые решения конструкций, технологии сооружения и ремонта стальных резервуаров» 12 – 17 августа 2007 г. / Самара – Нижний Новгород. – 2007. – С. 146 – 151.
7. Егоров Е. А., Соколова А. С. Исследование краевых эффектов в уторном узле стальных вертикальных цилиндрических резервуаров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2012. - № 11. – С. 16 – 21. – рис. 3. – табл. 1. – Библиогр.: (10 назв.).
8. Ашкинази М,И., Кузенко Ю.В. Исследование напряженного состояния в зоне стыка корпуса и днища резервуаров системы «ДИСИ» без анкеров // Тезисы научно-технической конференции. – Д.: Проминь. – 1970.
9. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, М. А. Микитавренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, – М. :Издательство «СКАД СОФТ», 2009. – 656 с.