

УДК 624: 014.2.074.433

А.С. СОКОЛОВА, ассистент,  
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА В УТОРНОМ УЗЛЕ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ОДОСТОРОННЕЙ СВЯЗИ ДНИЩА С ОСНОВАНИЕМ И НАЛИЧИИ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ

Методом конечных элементов выполнен анализ напряженно-деформированного состояния уторного узла оболочки, по геометрическим параметрам (высота стенки и радиус) соответствующей резервуару объемом 100 тыс. м<sup>3</sup>. Расчет проводился с учетом односторонней связи днища с основанием. Рассматривались случаи установки резервуара на мягком ( $C1=0,05$  кН/см<sup>3</sup>) и жестком ( $C1=1$  кН/см<sup>3</sup>) основании. Расчет проводился с учетом гидростатической нагрузки при заполнении резервуара до отметки 17 м. Также учитывалось возникновение результирующей силы, возникающей от собственного веса стенки и кровли, веса снега и избыточного давления в паровоздушной среде. Такая сила может быть как догружающей, так и подъемной. Полученные результаты показали, что при определенных условиях работа узла сопряжения цилиндрической оболочки с плоским днищем может сопровождаться возникновением краевых и скрытых отрывов днища от основания, что в свою очередь приводит к изменениям напряженно-деформированного состояния и увеличению изгибающего момента.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** 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 исследований и 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 [3-10] 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 (НДС) 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.

Результаты исследований НДС уторного узла с использованием численных методов на основе ПК «Лири» приводятся в [11], но они не дают ответа на поставленные выше вопросы. В [12] рассмотрен вопрос влияния модели днища на точность расчета.

Попытка аналитического решения рассматриваемой задачи в [13] с учетом геометрической и физической нелинейности оказалась неудачной, поскольку автору не удалось перейти к зависимостям, приемлемым для инженерных расчетов.

**Постановка задачи.** В связи с вышесказанным представляется целесообразным выполнить анализ напряженно деформированного состояния уторного узла стального резервуара методом конечных элементов. Предполагается использовать численную модель конструкции, в которой устранены допущения, принятые в инженерных расчетах, такие как: представление днища в виде полу бесконечной балки и двухсторонняя связь днища с основанием.

**Изложение материала и результаты.** В данной статье приведены результаты исследований краевого эффекта, возникающего в уторной зоне ВЦР, полученные на основе метода конечных элементов (МКЭ) с использованием ПВК «ЛИРА».

Рассматривались случаи установки резервуаров на «мягких» и «жестких» основаниях. В качестве примера, в статье рассмотрены результаты расчетов, выполненных для цилиндрической оболочки высотой 18 м, радиусом 44,35 м, толщина оболочки в зоне крепления ее к днищу составляла 20 мм, толщина днища в месте сопряжения с оболочкой – 16 мм.

Принятые параметры оболочки соответствуют параметрам резервуара объемом 100 000 м<sup>3</sup>.

Конечно-элементная модель оболочки формировалась из прямоугольных элементов, имеющих в библиотеке конечных элементов ПВК «ЛИРА» тип КЭ 41 и КЭ 44 [14, 15]. 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 [1]. В итоге были приняты конечные элементы размерами 0,03 м по окружности и 0,03 м по высоте.

Расчетная схема днища строилась на основе модели «днище-пластинка», в которой основание задавалось одним коэффициентом жесткости  $C_1$ . Расчет с односторонней связью днища с основанием выполнялся с применением шагово-итерационного метода.

Для моделирования связи днища с основанием использовался двухузловой элемент двухсторонней связи, имеющийся в библиотеке конечных элементов ПВК «ЛИРА» тип КЭ 51 и двухузловой элемент односторонней связи КЭ 261.

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 резкий, 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  $m_0$ .

По результатам проведенных расчетов в зависимости от величины и направления силы  $q$  были построены графики изменения  $m_0$ .

Рассматривались варианты с коэффициентом основания  $C_1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$  (мягкое основание) и  $C_1 = 1 \text{ кН/см}^3$  (жесткое основание), рис. 1,2.

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.

В случае  $C1=0,05 \text{ кН/см}^3$  при  $q \approx -110 \text{ кН/м}$  (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 наблюдается резкое увеличение изгибающего момента в точке сопряжения стенки и днища резервуара. Кроме того, в случае  $C1=0,05 \text{ кН/см}^3$  при односторонней связи днища с основанием может возникать скрытый отрыв (образование внутренней волны поверхности днища).

В рассмотренном примере он имеет место в диапазоне значений  $q$  от -50 до -100 кН/м.

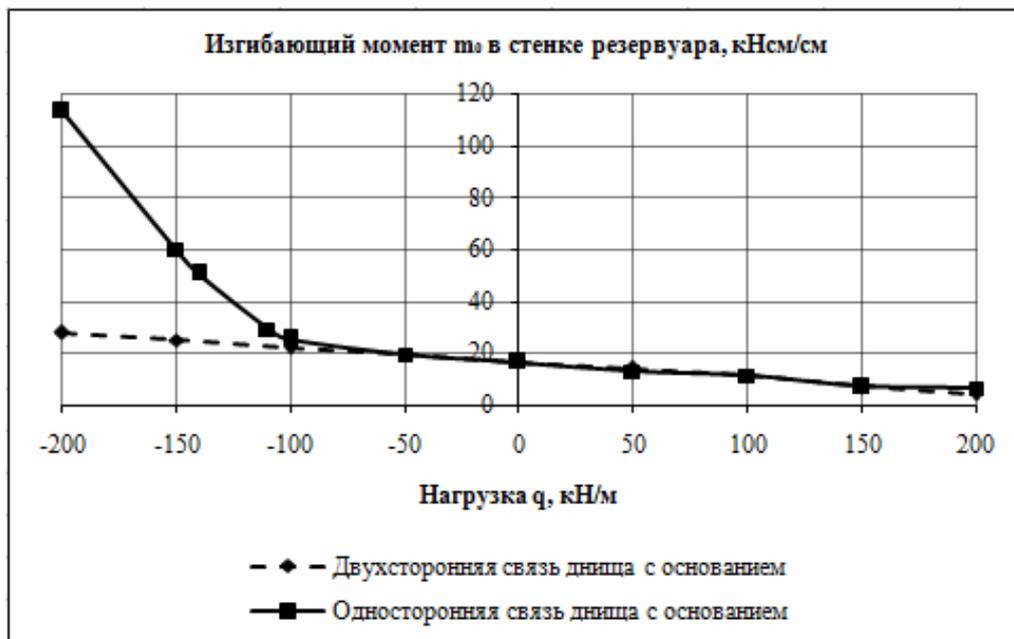


Рис. 1. Зависимость  $m_0$  от величины нагрузки  $q$  при коэффициенте постели  $C1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$

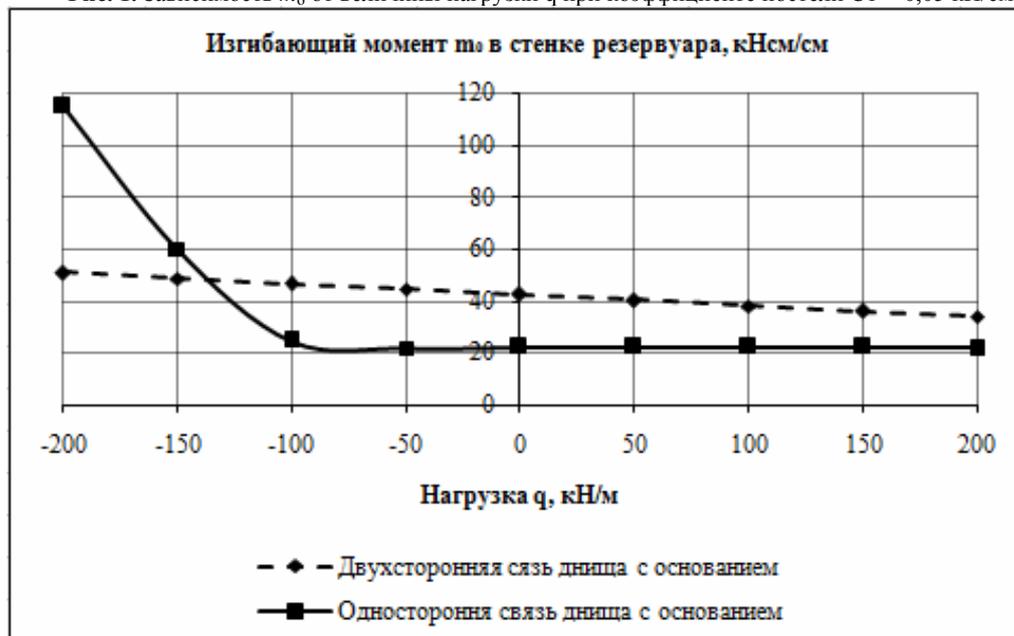


Рис. 2. Зависимость  $m_0$  от величины нагрузки  $q$  при коэффициенте постели  $C1=1 \text{ кН/см}^3$

В случае жесткого основания при двухсторонней связи днища с основанием краевого отрыва не возникает, но при отрицательных значениях  $q$  наблюдается скрытый отрыв.

При односторонней связи днища с основанием на участках сопряжения стенки с днищем скрытый отрыв возникает в диапазоне значений  $q$  от 0 до 100 кН/м.

Также нужно отметить, что при односторонней связи днища с основанием до момента возникновения краевого отрыва  $m_0$  в 1,5 – 2 раза меньше, чем при двухсторонней связи.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, при определенных условиях (односторонняя связь днища с основанием, возникновение подъемной силы, жесткость основания) работа узла сопряжения цилиндрической оболочки с плоским днищем может сопровождаться возникновением краевых и скрытых отрывов днища от основания, что в свою очередь приводит к изменениям напряженно-деформированного состояния и увеличению величины изгибающего момента.

В таком случае работа уторного узла резервуара может проходить в упругопластической стадии. В связи с этим в дальнейшем предполагается провести анализ напряженно-деформированного состояния узла сопряжения цилиндрической оболочки с плоским днищем с учетом физически нелинейной работы материала.

#### *Список литературы*

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 (ЦНИИ проекстальконструкция 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. **Галеев В. Б.** Расчет нижнего узла сопряжения корпуса и днища резервуаров / В. Б. Галеев, Л. В. Короткова // РНТС ВНИИОЭНГ Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 38 – 39.
5. **Иштиряков М. С.** Напряженно-деформированное состояние днища вертикального цилиндрического резервуара / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // РНТС ВНИИОЭНГ Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1977. – № 2. – С. 28 – 29.
6. **Иштиряков М. С.** Расчет днища и стенки вертикальных цилиндрических резервуаров большой вместимости / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // НТРС ВНИИОЭНГ Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 8 – 9.
7. **Иноуэ Такаюсу** Проектирование резервуаров для нефти // «Китай Секкей». – 1976. – Т. 20. – № 1. – С. 43 – 49.
8. **Ашкиназ М. И., Кузенко Ю. В.** Расчет днищ металлических резервуаров повышенного давления без анкером для хранения нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М. : ВНИИОЭНГ, – 1969. – № 1. – С. 17 – 22.
9. **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.
10. **Шапиро Г. А.** Действительная работа плоских днищ стальных тонкостенных цилиндрических резервуаров // Материалы по стальным конструкциям. – М. : ПСК, 1958. – № 3. – С. 185 – 215.
11. **Мущанов В. Ф.** Исследование напряженно-деформированного состояния уторного узла в вертикальных цилиндрических резервуарах объемом 10000...50000 м<sup>3</sup> / **В. Ф. Мущанов, Д. И. Роменский** // Металлические конструкции. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 61 – 71.
12. **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.).
13. **Ашкинази М. И., Кузенко Ю. В.** Исследование напряженного состояния в зоне стыка корпуса и днища резервуаров системы «ДИСИ» без анкером // Тезисы научно-технической конференции. – Д.: Проминь. – 1970.
14. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА. Руководство пользователя. Книга 1 / **А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров, Ю.Д. Гераймович, В.П. Максименко** и др.. – к. 6 НИИАСС, 2002. – 189 с.
15. **А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров.** Компьютерные модели конструкций. - Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009.-360 с.  
Рукопись поступила в редакцию 01.04.15