

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.953.04:519.6

А. С. СОКОЛОВА

Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепропетровск, Украина, 49600, эл. почта aspen88@mail.ua

ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ЛИРА

Цель. В данной статье рассматривается применение численного метода решения для задачи осесимметричного нагружения идеальной цилиндрической оболочки гидростатическим давлением с односторонней связью днища с основанием без учета физически нелинейной работы материала конструкции, с целью верификации предложенной автором численной модели. **Методика.** Рассматривался резервуар объемом 100 тыс. м³. Геометрическая модель резервуара строилась в соответствии с типовыми значениями габаритов конструкции. Цилиндрическая стенка представлялась в виде гладкой оболочки с равномерным разбиением сетки конечных элементов. Использовалась модель основания Винклера с одним коэффициентом постели ($C1 = 0,05$ кН/см³) с односторонней связью днища с основанием. Дискретизация рассчитываемого объекта выполнялась таким образом, чтобы удовлетворять двум требованиям: точности расчета, которая требует большого количества расчетных узлов (т. е. большой плотности расчетной сетки), и практическому решению задачи, которое накладывает ограничение на число расчетных узлов. **Результаты.** Проведено сравнение основных компонентов напряженно-деформированного состояния уторного узла резервуара, полученных в результате расчета численным методом с применением ПК Лира и аналитически с использованием известных зависимостей теории оболочек. Выявлено, что характер распределения значений изгибающих моментов и перемещений в цилиндрической стенке и плоском днище резервуара, полученные численным методом и аналитически, качественно схожи. Обнаружено возникновение скрытого отрыва днища от основания. **Научная новизна.** В модели резервуара устранены допущения, принятые в инженерных расчетах, такие как: представление днища в виде полу бесконечной балки; двухсторонняя связь днища с основанием. **Практическая значимость.** Предложена численная модель резервуара, позволяющая выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния уторного узла в нелинейной постановке.

Ключевые слова: стальной резервуар; конечно-элементная модель; уторный узел; напряженно-деформированное состояние

Введение

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) относятся к разряду массовых конструкций, широко применяемых в нефтяной промышленности для хранения нефти и нефтепродуктов. 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 РВС и уточнение методики их расчета по-прежнему остаются весьма актуальными. Одним из наиболее ответственных узлов таких конструкций является уторный узел – узел сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем.

Исследованиям напряженно-деформированного состояния (НДС) уторного узла посвящено большое количество работ, но, несмотря на это, целый ряд вопросов, связанных с работой узла в различных условиях, и по сегодняшний день остаются открытыми. Для типовых конструктивных решений РВС (в основном здесь важно соотношение высоты и диаметра) общее напряженное состояние в окрестности данного конструктивного узла в подавляющем большинстве случаев было далеко от предельного. Однако в последнее время все чаще становится необходимым проектирование резервуаров рассматриваемого типа с существенно большей высотой стенки и с существенно большей величиной внутреннего давления. В этих случаях появляется реальная

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

опасность возникновения ранее не анализируемых видов предельных состояний (ПС). К таким видам ПС можно, прежде всего, отнести переход уторного узла из упругой стадии работы в упругопластическую, а также возникновение внутреннего или внешнего отрывов днища от основания. Можно отметить, что последние два вида ПС уже анализировались в технической литературе [1, 3, 5-8], однако во всех этих работах анализ имел сугубо принципиальный (по сути, доказывалась принципиальная возможность реализации таких явлений) характер и один из важнейших вопросов о количественной оценке деформаций оставался за пределами внимания авторов. Все это говорит о том, что проблема остается открытой и требует проведения дополнительных исследований. По-видимому, это связано с тем, что формирование инженерных методов расчета этого узла осуществлялось на основе аналитических зависимостей теории оболочек и практическая реализация их могла быть осуществлена только при условии введения определенных допущений, влияние которых на результат для многих случаев остается неопределенным. Результаты исследований НДС уторного узла с использованием численных методов на основе ПК «Лира» приводятся в [3, 4, 7], но они не дают ответа на поставленные выше вопросы.

Цель

В данной статье рассматривается применение численного метода решения для задачи осесимметричного нагружения идеальной цилиндрической оболочки гидростатическим давлением с односторонней связью днища с основанием без учета физически нелинейной работы материала конструкции, с целью верификации предложенной автором численной модели. Таким образом, будет проверена предлагаемая конечно-элементная модель, которую можно будет использовать в дальнейшем для решения более сложных задач в физически нелинейной постановке.

Материалы и методы

Рассматривался резервуар объемом 100 тыс. м³. Геометрическая модель резервуара строилась в соответствии с типовыми значениями габаритов конструкции. Радиус резервуара составляет 44,35 м, высота стенки – 18 м. Гид-

ростатическое давление соответствовало заполнению резервуара до 17 м. Материалом конструкции принята сталь С235. Цилиндрическая стенка представлялась в виде гладкой оболочки. Для построения модели использовались универсальные элементы оболочки КЭ 41 и КЭ 44 с равномерным разбиением сетки конечных элементов, а также одноузловой элемент односторонней связи КЭ 261 для моделирования связи днища резервуара с основанием. Использовалась модель основания Винклера с одним коэффициентом постели ($C1 = 0,05 \text{ кН/см}^3$). Дискретизация рассчитываемого объекта выполнялась таким образом, чтобы удовлетворять двум требованиям: точности расчета, которая требует большого количества расчетных узлов (т. е. большой густоты расчетной сетки), и практическому решению задачи, которое накладывает ограничение на число расчетных узлов. Для принятого разбиения выполнялся расчет, определялась величина максимального изгибающего момента в уторной зоне стеки резервуара. На следующем этапе сетка конечных элементов сгущалась, и вновь выполнялся расчет. Таким образом, был выполнен ряд последовательных расчетов с постепенным сгущением сетки на каждом этапе. Расчеты были прекращены, когда расхождение между двумя соседними решениями не превысило 5 %, т. е. решение стабилизировалось. Полученные при этом размеры конечных элементов оболочки, приблизительно равные 3×3 см, были приняты как эффективные. Для удовлетворения практического требования решения задач МКЭ в силу симметрии рассматривалась часть конструкции. При этом в узлах расчетной схемы накладывались граничные условия по локальным направлениям Y, UX и UZ, соответствующим связям симметрии на плоскости отсечения.

Результаты

В результате расчета получены значения изгибающих моментов и перемещения в цилиндрической стенке и плоском днище резервуара. Распределение изгибающих моментов по высоте стенки представлено на графике (рис. 1).

При этом для сравнения был проведен расчет в инженерной постановке для резервуара на упругом основании с учетом двухсторонней связи днища с основанием. Характер распределения изгибающих моментов по высоте зоны

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

краевого эффекта, полученных численным методом, оказывается качественно схожим с распределением моментов, полученных аналитически.

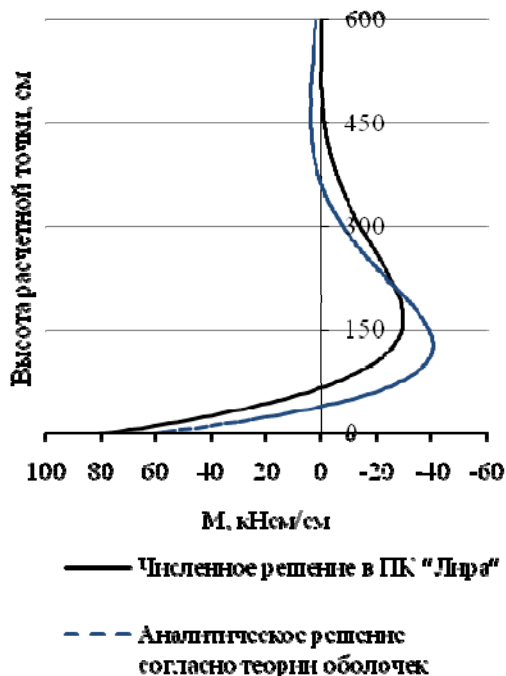


Рис. 1. Изгибающие моменты в стенке резервуара при действии гидростатического давления

Изополя перемещений стенки в радиальном направлении представлены на рис. 2. Максимальные перемещения находятся на высоте 3 м и составляют 22,6 мм, что соответствует перемещениям, полученным аналитически на той же расчетной высоте (равным 21,8 мм).

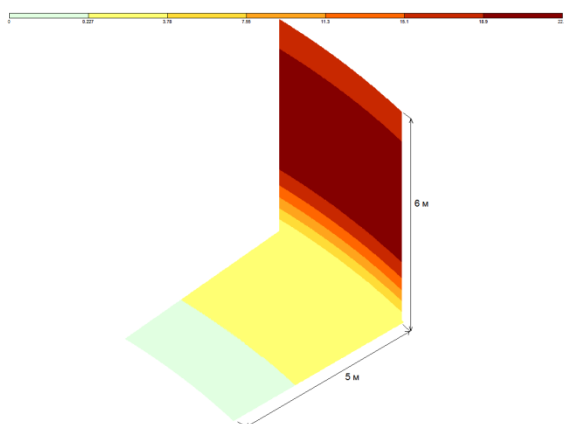


Рис. 2. Изополя перемещений резервуара в радиальном направлении

Надо также отметить, в днище резервуара возникает скрытый отрыв от основания (рис. 3).

Максимальная величина подъема днища составляет 1,2 мм, что соответствует аналитическим расчетам приведенным в [2].

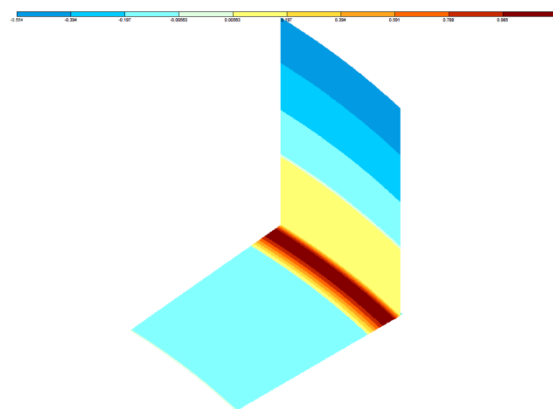


Рис. 3. Изополя перемещений резервуара в вертикальном направлении

Выводы

Предложена численная модель резервуара, позволяющая выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния уторного узла. В модели устранены допущения, принятые в инженерных расчетах, такие как: представление днища в виде полу бесконечной балки; двухсторонняя связь днища с основанием. Так как полученные численным методом результаты качественно схожи результатами, полученными аналитически, такую модель можно считать адекватной и использовать для более сложных расчетов, а именно для расчета в физически нелинейной постановке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галеев, В. Б. Расчет нижнего узла сопряжения корпуса и днища резервуаров [Текст] / В. Б. Галеев, Л. В. Короткова // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. — 1978. — № 6. — С. 38–39.
2. Егоров, Е. А. Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров на жестких фундаментах [Текст] / Е. А. Егоров, Н. И. Братусь // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. — 1983. — № 5. — С. 17–18.
3. Егоров, Е. А. Исследование краевого эффекта в уторном узле стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при односторонней связи днища с основанием [Текст] / Е. А. Егоров, А. С. Соколова // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. При-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- днепр. гос. акад. стр-ва и архит. – Вып. № 69. – Днепропетровск, 2013. – С. 187–191.
4. Егоров, Е. А. Исследование краевых эффектов в уторном узле стальных вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Е. А. Егоров, А. С. Соколова // Вісник Придніпр. Держ. акад. буд-ва та архіт. – Дніпропетровськ, 2012 – № 11. – С. 16–21.
 5. Иштиряков, М. С. Напряженно-деформированное состояние днища вертикального цилиндрического резервуара [Текст] / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1977. – № 2. – С. 28–29.
 6. Иштиряков, М. С. Расчет днища и стенки вертикальных цилиндрических резервуаров большой вместимости [Текст] / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 8–9.
 7. Муцанов, В. Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния уторного узла в вертикальных цилиндрических резервуарах объемом 10000...50000 м³ [Текст] / В. Ф. Муцанов, Д. И. Роменский // Металлические конструкции. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 61–71.
 8. Шапиро, Г. А. Действительная работа плоских днищ стальных тонкостенных цилиндрических резервуаров [Текст] / Г. А. Шапиро // Материалы по стальным конструкциям. – 1958. – № 3. – С. 185–215.

A. C. СОКОЛОВА

Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, ел. пошта aspen88@mail.ua

БУДУВАННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ СТАЛЕВОГО РЕЗЕРВУАРА В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЛІРА

Мета. У даній статті розглядається застосування чисельного методу розв'язання задачі вісесиметричного навантаження ідеальної циліндричної оболонки гідростатичним тиском з одностороннім зв'язком днища з основою без урахування фізично нелінійної роботи матеріалу конструкції, з метою верифікації запропонованої автором чисельної моделі. **Методика.** Розглядався резервуар об'ємом 100 тис. м³. Геометрична модель резервуару будувалася згідно з типовими значеннями габаритів конструкції. Циліндрична стінка моделювалася у вигляді гладкої оболонки з рівномірним розбиттям сітки скінченних елементів. Використовувалася модель основи Вінклера з одним коефіцієнтом постелі ($C1 = 0,05$ кН/см³) з одностороннім зв'язком днища з основою. Дискретизація розраховуваного об'єкта виконувалася таким чином, щоб задовольняти двом умовам: точності розрахунку, яка вимагає великої кількості розрахункових вузлів (тобто великої густоти розрахункової сітки), і практичному розв'язанню задачі, яке накладає обмеження на кількість розрахункових вузлів. **Результати.** Проведено порівняння основних компонентів напружено-деформованого стану уторного вузла резервуара, отриманих в результаті розрахунку чисельним методом із застосуванням ПК Ліра та аналітично із застосуванням відомих залежностей теорії оболонок. Виявлено, що характер розподілення згинаючих моментів та переміщень в циліндричній стінці та плоскому днищі резервуара, отримані чисельно та аналітично, якісно схожі. Також виявлено виникнення прихованого відриву днища від основи. **Наукова новизна.** В моделі резервуара усунуті припущення, які були прийняті в інженерних розрахунках: уявлення днища напів скінченною балкою; двосторонній зв'язок днища з основою. **Практична значимість.** Запропонована чисельна модель резервуара, яка дозволяє виконувати розрахунки напружено-деформованого стану уторного вузла у нелінійній постановці.

Ключові слова: стальний резервуар; скінченно-елементна модель; уторний вузол; напружено-деформований стан

A. S. SOKOLOVA

Department of Metal, wooden and plastic construction, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24a, Chernishevskogo str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49600, e-mail aspen88@mail.ua

STEEL STORAGE TANK SIMULATING USING BUNDLED SOFTWARE LIRA

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Purpose. In this article application for analysis of steel storage tank loaded with hydrostatic presser and with unilateral bottom-base constraint is observed. Linear work of construction material was considered in order to verify offered finite-element model. **Methodology.** Geometrical model of steel tank with a capacity of 100 000 m³ was built in compliance with standardized tank dimensions. Cylindrical shell was modeled with uniform mesh layout. Winkler's foundation model with one coefficient of soil reaction ($C1 = 0,05 \text{ kN/sm}^3$) was used. Two conditions: computational accuracy, which requires a big amount of nodes; applied analysis, which limit node quantity - were taken into account while shell model discretization. **Findings.** Comparison of principal deflected mode components, defined by numerical computing and the known analytical method was carried out. It was found that bending moment and displacement distribution character in cylindrical shell, defined by numerical computing and by the known analytical method are qualitatively similar. Undetected bottom uplift was revealed. **Originality.** Assumptions, which are used in analytical methods, such as: half-infinite beam bottom modeling and bidirectional bottom-base connection - were eliminated in this tank model. **Practical value.** A numerical tank model applicable for deflected mode analysis of plate-sell junction in nonlinear formulation was suggested.

Keywords: steel tank; finite-element models; plate-sell junction; deflected mode

REFERENCES

1. Galeev V. B., Korotkova L. V. Raschet nizhnego uzla sopryazheniya korpusa i dnishcha rezervuarov [Calculation of the lower node interface shell and tank bottoms]. *Transport i khraneniye nefii i nefteproduktov – Transportation and storage of oil and petroleum products*, 1978, no. 6, pp. 38-39.
2. Yegorov Ye. A., N. I. Bratus Raschet vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov na zhestkikh fundamentakh [Calculation of vertical cylindrical tanks on rigid foundations]. *Transport i khraneniye nefii i nefteproduktov – Transportation and storage of oil and petroleum products*, 1983, no. 5, pp. 17-18.
3. Yegorov Ye. A., Sokolova A. S. Issledovanie kraevogo effekta v utornom uzle stalnykh vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov pri odnostoronney svyazi dnishcha s osnovaniem [A study of the regional effects of steel vertical cylindrical tanks in TESDA node at the bottom of the one-way communication with the base]. *Sbornik nauchnykh trudov Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arkhitektury "Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye"* [Proc. of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture "Construction, materials science, mechanical engineering"], 2013, issue 69, pp. 187-191.
4. Yegorov Ye. A., Sokolova A. S. Issledovanie kraevykh effektov v uzle stalnykh vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov [Investigation of plate-sell junction edge effect of vertical cylindrical tanks]. *Visnyk Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2012, no. 11, pp. 16-21.
5. Ishtiryakov M. S., Galeev V. B. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye dnishcha vertikalnogo tsilindricheskogo rezervuara [Stress-strain state of the bottom of the vertical cylindrical tank]. *Transport i khraneniye nefii i nefteproduktov – Transportation and storage of oil and petroleum products*, 1977, no. 2, pp. 28-29.
6. Ishtiryakov M. S., Galeev V. B. Raschet dnishcha i stenki vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov bolshoy vmestimosti [The calculation of the bottom and walls of vertical cylindrical tanks of large capacity]. *Transport i khraneniye nefii i nefteproduktov – Transportation and storage of oil and petroleum products*, 1978, no. 6, pp. 8-9.
7. Mushchanov V. F., Romenskiy D. I. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya utornogo uzla v vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarakh obemom 10000...50000 m³ [Researches of the stress-strain state unit of connection of walls with the bottom in vertical cylindrical tanks in volume 10 000-50 000 m³]. *Metallicheskie konstruksii – Metal constructions*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 61-71.
8. Shapiro G. A. Deystvitelnaya rabota ploskikh dnishch stalnykh tonkostennykh tsilindricheskikh rezervuarov [The actual work of the flat bottoms of steel thin-walled cylindrical tanks]. *Materialy po stalnym konstruksiyam – Materials for steel structures*, 1958, no. 3, pp. 185-215.

Статья рекомендована к публикации д-ром.физ.-мат.наук, проф. В. И. Гаврилюком (Украина), д.т.н., проф. Д. О. Банниковым (Украина).

Поступила в редколлегию 29.07.2015.

Принята к печати 28.09.2015.