# УДК 621.642.39.03 СОЗДАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ РЕЗЕРВУАРА РВСПК-50000

## Чепур П.В., Тарасенко А.А.

Тюменский государственный нефтегазовый университет, Тюмень, e-mail: chepur@me.com, a.a.tarasenko@gmail.com

Разработана и верифицирована модель резервуара РВСПК-50000, созданная авторами в программном комплексе ANSYS, реализующем алгоритмы автоматизированного составления и решения систем линейных алгебраических уравнений методом конечных элементов. Учтены конструктивные параметры ветрового кольца на верхнем поясе резервуара, построенные по деталировочным чертежам в соответствии с реальным проектом. Получены численные зависимости радиальных прогибов стенки и возникающих действующих напряжений в нейтральном слое от уровня хранимой нефти. Установлено, что зона максимальных напряжений и перемещений стенки находится на уровне 1-го горизонтального шва, соединяющего I и II пояса стенки резервуара. Выполненная модель может быть использована для получения достоверных значений НДС металлоконструкций РВСПК-50000, эксплуатируемого в осложненных условиях: непроектном неосесимметричном нагружении, вызванном развитием неравномерных осадок наружного контура днища, воздействием штормового ветра, сейсмических нагрузок и прочих факторов.

Ключевые слова: резервуар, РВСПК, РВС, РВСПК-50000, МКЭ, модель резервуара, ANSYS, НДС

## NUMERICAL MODELING AND VERIFICATION OF TANK RVSPK-50000

## Chepur P.V., Tarasenko A.A.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: chepur@me.com, a.a.tarasenko@gmail.com

Developed and verified model tank RVSPK-50000, created by the authors in the software package ANSYS, implements the automated preparation and solving systems of linear algebraic equations by finite element method. It takes into account the design parameters of the wind at the top of the ring zone of the tank, built on detailed drawings in line with the actual project. Numerical depending radial deflection wall and emerging operating voltages in the neutral layer on the level of the stored oil. It was established that the zone of maximum stresses and displacements wall is located at the 1 st horizontal seam joining zone I and II the vessel wall. Completed model can be used to obtain reliable values of stress-strain state metalworks RVSPK-50000 operated under complicated conditions: nonproject axisymmetrical loading caused by the uneven development of the outer contour of the bottom sediment, the impact of hurricane winds, seismic loads and other factors.

#### Keywords: tank, tank with floating roof, aboveground tank, aboveground tank 50000 m3, FEM, model of tank, ANSYS, stress-strain state

Согласно ГОСТ 27751-88 и ГОСТ Р 52910-2008 резервуары объемом от 50000 м<sup>3</sup> и более относятся к сооружениям I повышенного уровня ответственности и I или II (в зависимости от расположения) класса опасности, это налагает особые требования к техническому состоянию конструкций, работающих в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС). Зачастую расчетная схема нагружения включает в себя не только проектные эксплуатационные нагрузки (гидростатическое, избыточное и вакуумметрическое давления, снеговая и ветровая нагрузки, вес оборудования), но и непроектные, вызванные труднопрогфакторами: изменениями нозируемыми гидрогеологических условий площадки объекта, повышением интенсивности перекачки вследствие технологических нужд, а также возможными ошибками на стадиях проектирования и монтажа объекта. Всевозможные комбинации неосесимметричных нагрузок могут приводить к появлению и развитию неравномерных осадок наружного контура днища РВС и просадочных зон его центральной части, отклонениям

стенки и конструкций кровли от правильной геометрической формы и т.д. В настоящий момент не разработано универсальных аналитических моделей и зависимостей, позволяющих с достаточной точностью и достоверностью определить НДС конструкции крупногабаритных резервуаров в нестандартных условиях работы. Однако развитие численных методов и программных способов их реализации позволяет по-новому взглянуть на существующую проблему.

Работы авторов [5-9; 11-14] посвящены исследованиям НДС резервуара РВС-20000 при развитии неравномерных осадок. В работах впервые определены предельные величины деформаций металлоконструкций резервуара данного типоразмера, которые могут появиться при развитии осадки (параметры конструктивной жесткости); выполнена оценка влияния стационарной крыши и кольца жесткости при неосесимметричных нагрузках; определено влияние элементов дополнительной жесткости (трубопроводы ГУС, СППТ, ПРП и аварийного сброса) на НДС стенки резервуара при раз-

витии осадки и т.д. Полученные результаты и зависимости позволили получить аналитические выражения, ограничивающие предельно допустимые величины осадки PBC-20000 с учетом перечисленных выше факторов.

Распространить полученные авторами в [8-9] результаты исследований на другие типоразмеры крупногабаритных резервуаров, построенных по различным проектам, не представляется возможным, поскольку их конструкции имеют существенные различия, что определяет конструктивную жесткость сооружения. Рассмотрим создание модели резервуара с плавающей крышей РВСПК-50000. Конструкция данного сооружения имеет принципиальные отличия от модели РВС-20000, созданной в [3]: стационарная крыша отсутствует, имеется внешнее ветровое кольцо с распорками и два дополнительных кольца жесткости. Предлагается рассмотреть расчетную схему конечно-элементной модели РВСПК-50000.

1. Пространственное геометрическое моделирование и характеристики конструкций:

– геометрическая модель построена по проекту РВСПК-50000 «ЦНИИПРОЕКТ-СТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ», диаметр составляет 60,7 м, высота – 17,95 м;

 толщина стенки варьируется от 8 до 17 мм с выравниваем по внутренней поверхности, толщина листов окрайки и центральной части днища составляет 6 мм;

 – на V и VIII поясах стенки предусмотрены кольца жесткости из гнутого профиля – уголка 100х300 толщиной 8 мм;

– ветровое кольцо представляет собой L-образную конструкцию сопряженных листовых и балочных элементов, подкрепленную распорками с интервалом 2,5 м, приваренными к XII поясу стенки через промежуточные монтажные пластины;

 – резервуар опирается на железобетонный кольцевой фундамент прямоугольного профиля с размерами 1,5х0,4 м;

– для нижних 9 поясов стенки и окрайки задаются свойства стали  $16\Gamma 2 \Pi \Phi$ -15 и 09Г2С для других конструкций (с гарантированным пределом текучести  $\sigma_{\rm T} = 345$  МПа).

2. Граничные и контактные условия:

 – резервуар свободно опирается на основание и передает нагрузку на грунт через центральную часть днища и фундаментное кольцо;

– для моделирования грунта используется Винклеровская линейно-упругая теория деформаций. Свойства грунта характеризуются коэффициентом постели: C = p/s, где p – давление на основание, Па; s – осадка основания, м. Для искусственно уплотненного грунта (по проекту) принимается коэффициент постели C = 2x10<sup>8</sup> MH/м<sup>3</sup>;

 верхняя кромка не защемляется, деформации стенки, кольца жесткости и других элементов не ограничены по направлению;

– промежуточные кольца жесткости на V и VIII поясах стенки имеют связанный контакт типа «bonded», моделирующий сварное соединение, что отражает их реальную жесткость; сварные контакты всех металлоконструкций имеют связанные контакты, исключающие возможность из разъединения вплоть до разрушения. Алгоритм реализации таких контактов – расширенный метод Лагранжа, позволяющий определить относительный экстремум непрерывной функции, являющейся максимумом или минимумом при выполнении дополнительных условий в форме уравнений связи.

3. Действующие нагрузки:

– нагрузка от гидростатического давления хранимой нефти  $\rho = 865 \text{ кг/м}^3$  приложена по внутренней поверхности стенки, высота взлива хранимой жидкости  $H_{_{B37}} = 17 \text{ м}$ ;

 – снеговая нагрузка приложена к верхней грани полки ветрового кольца и составляет 4000 Па, что соответствует VI снеговому району;

– ветровая нагрузка прикладывается к наружной поверхности стенки и составляет 480 Па, что соответствует IV ветровому району.

4. Конечно-элементная дискретизация модели с созданием сетки:

– разбиение модели производится на 2 типа геометрических примитивов: большая часть заполняется параллелепипедами, а где это невозможно, используются трехгранные призмы исходя из того, что любое ребро не должно превышать величины 1,5 м (для II–XI поясов стенки), 0,2 м – для I пояса стенки и 0,4 м для других элементов. При этих параметрах погрешность аппроксимации сетки не превышает 5 %;

 в контактных зонах и для малых элементов (пластины и балки крепления ветрового кольца) производится локальное измельчение сетки с размером элементов до 0,01 м.

На рис. 1 представлена расчетная схема РВСПК-50000 с учетом приведенных выше параметров. На рисунке изображена модель резервуара с выполненным разбиением на конечно-элементную сетку, обозначены основные конструктивные элементы, на разрезе (справа) показано упругое закрепление фундамента и днища, направления действия гидростатической и снеговой нагрузок.

FUNDAMENTAL RESEARCH № 7, 2015



Рис. 1. Расчетная схема РВСПК-50000



Рис. 2. Верификация модели. Расчет НДС оболочечной конструкции стенки РВСПК-50000 при нагружении гидростатической нагрузкой согласно расчетной схеме С.П. Тимошенко

Чтобы убедиться в адекватности разработанной модели выполнено сравнение результатов расчетов известной аналитической задачи С.П. Тимошенко для цилиндрической оболочки, нагруженной гидростатической нагрузкой (рис. 2). Для этого был проведен дополнительный расчет с упрощением созданной модели: поскольку аналитическая модель С.П. Тимошенко не учитывает наличие колец жесткости, распоров – эти элементы были скрыты в нашей верификационной модели, также была принята толщина стенки, равная 17 мм по всем поясам. Эти условия позволили сравнить численные результаты с аналитическими в полностью эквивалентных условиях. Установлено, что разница в результатах (для напряжений в стенке и её радиальных перемещений) не превысила 1,5%, что свидетельствует об удовлетворительной корре-

ляции результатов с проверенным аналитическим решением.

В работе Г.Е. Коробкова [2] представлены результаты численного расчета НДС РВСПК-50000 при осесимметричном нагружении столбом нефти. Авторы данного исследования для моделирования колец жесткости использовали так называемый «кольцевой» элемент, представляющий собой прямоугольник в сечении с вращением на 360° вокруг стенки, имеющий жесткий контакт со стенкой. Анализ полученных напряжений и перемещений позволил сделать вывод, что подобное упрощение в [2] снизило точность расчетов более чем на 15%, при этом учитывались только проектные осесимметричные нагрузки. Полученные результаты и опыт работ [3, 9] свидетельствуют о том, что при решении неосесимметричных задач деформирования РВСПК-50000 ветро-

вое кольцо и промежуточные усиливающие элементы будут вносить еще больший вклад в картину общего НДС конструкции. Поэтому учет данных элементов в разработанной модели является необходимым условием для определения адекватных значений конечной жесткости резервуара при неосесимметричных деформациях (от ветровой нагрузки, при развитии неравномерной осадки, подъеме домкратами и т.д.).

На рис. 3, а и 3, б представлены результаты постпроцессинга разработанной модели РВСПК–50000 в ПК ANSYS с учетом рассмотренных в п. 1–4 параметров расчетной схемы. Для визуализации полученных результатов был применен масштабный коэффициент х100 для перемещений элементов металлоконструкций и действующих напряжений.

Результаты расчетов сведены на графиках рис. 4 и 5, где приведены зависимости радиальных прогибов и действующих напряжений в стенке РВСПК-50000 от величины взлива нефти. В одной координатной плоскости показаны значения для упрощенной модели (по которой проводилась верификация путем сравнения с аналитическим решением С.П. Тимошенко), предлагаемой высокодетализированной модели и модели [2] с упрощенной конструкций ветрового кольца и дополнительных колец жесткости.

Анализ полученных эпюр распределения напряжений и перемещений, построенных зависимостей по результатам расчетов свидетельствует о том, что в местах монтажа колец жесткости со стенкой имеются скачки напряжений. Этот факт необходимо учитывать при решении как стандартных осесимметричных задач, так и при анализе сложного неосесимметричного напряженно-деформированного состояния, вызванного осложненными условиями эксплуатации.





Рис. 3. а) Распределение действующих эквивалентных напряжений в металлоконструкциях РВСПК-50000 при максимальном уровне взлива нефти (17 м), б) Распределение прогибов металлоконструкций РВСПК-50000 при максимальном уровне взлива нефти (17 м)

б)



20 25 30 35 40 Прогибы, м

Рис. 4. Зависимости радиальных прогибов стенки РВСПК-50000 от величины взлива нефти



Рис. 5. Зависимости действующих эквивалентных напряжений в стенке РВСПК-50000 от величины взлива нефти

### Выводы

2

0

0

5

10

15

1. Разработана и верифицирована модель резервуара РВСПК-50000, созданная авторами в программном комплексе ANSYS, реализующем алгоритмы автоматизированного составления и решения систем линейных алгебраических уравнений методом конечных элементов. Впервые учтены геометрические и конструктивные параметры ветрового кольца на верхнем поясе резервуара, построенные по деталировочным чертежам в соответствии с реальным проектом.

2. Получены численные зависимости радиальных прогибов стенки и возникающих действующих напряжений в нейтральном слое от уровня хранимой нефти. Установлено, что зона максимальных напряжений и перемещений стенки находится на уровне 1-го горизонтального шва, соединяющего I и II пояса стенки резервуара. На уровне высоты стенки  $H_{ct} = 1,5$  м максимальные прогибы составляют  $\omega_{cr} = 39$  мм, σ<sub>max</sub> = 253 МПа. 3. Выполненная модель может быть

использована для получения достоверных значений НДС металлоконструкций РВСПК-50000, эксплуатируемого в осложненных условиях: непроектном неосесимметричном нагружении, вызванном развитием неравномерных осадок наружного контура днища, воздействием штормового ветра и прочих факторов.

### Список литературы

1. Ильин Е.Г., Иванцова С.Г., Катанов А.А., Задумин А.Н. Нагрузки и методы расчета стационарных крыш вертикальных цилиндрических резервуаров // Наука и тех-

Аналитическое решение

С.П. Тимошенко для

верификации

нологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1 (17). – С. 36–42.

2. Коробков Г.Е., Зарипов Р.М., Шаммазов И.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов и резервуаров в осложненных условиях эксплуатации. – СПб.: Недра, 2009. – 410 с.

3. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Напряженно-деформированное состояние верхнего опорного кольца резервуара при неосесимметричных деформациях корпуса // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 525–529.

4. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение действующих напряжений от подъемных устройств при ремонте фундамента резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–11. – С. 2421–2425.

5. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Эволюция взглядов на вопросы определения величины допустимых осадок резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12– 1. – С. 67–84.

6. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А. Использование критериев стандарта АРІ-653 для оценки допустимой величины осадки днища резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–7. – С. 1418–1422.

7. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы подслойного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–8. – С. 1698–1703.

8. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Численное моделирование процесса деформирования резервуара при развитии неравномерных осадок // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 88–91.

9. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Исследование собственной жесткости вертикального стального цилиндрического резервуара // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 121–123.

10. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Шарков А.Е., Гретченко Д.А. Технология диагностики вертикальных стальных резервуаров без снятия антикоррозионного покрытия // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–8. – С. 1703–1708.

11. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Оценка воздействия приемо-раздаточного патрубка при развитии осадки резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11– 3. – С. 540–544.

12. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А. Анализ возможности использования критериев стандарта АРІ-653 для оценки неравномерной осадки резервуаров отечественных типоразмеров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–3. – С. 514–519.

 Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Антонов И.В. Численный анализ влияния жесткости газоуравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–6. – С. 1292–1296.

14. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы аварийного сброса на напряженное состояние конструкции резервуара при развитии осадок основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–4. – С. 804–808.

15. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение оптимального количества тросов поддержки днища при подъеме резервуара // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 72–78.

#### Referenes

1. Ilin E.G., Ivancova S.G., Katanov A.A., Zadumin A.N. Nagruzki i metody rascheta stacionarnyh krysh vertikalnyh cilindricheskih rezervuarov // Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov. 2015. no. 1 (17). pp. 36–42. 2. Korobkov G.E., Zaripov R.M., Shammazov I.A. Chislennoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija i ustojchivosti truboprovodov i rezervuarov v oslozhnennyh uslovijah jekspluatacii. SPb.: Nedra, 2009. 410 p.

3. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie verhnego opornogo kolca rezervuara pri neosesimmetrichnyh deformacijah korpusa // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–3. pp. 525–529.

4. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Opredelenie dejstvujushhih naprjazhenij ot podemnyh ustrojstv pri remonte fundamenta rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9–11. pp. 2421–2425.

5. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Jevoljucija vzgljadov na voprosy opredelenija velichiny dopustimyh osadok rezervuarov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 12–1. pp. 67–84.

6. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Gruchenkova A.A. Ispolzovanie kriteriev standarta API-653 dlja ocenki dopustimoj velichiny osadki dnishha rezervuarov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 12–7. pp. 1418–1422.

7. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Gruchenkova A.A., Sokolov S.S. Ocenka vlijanija truboprovodov sistemy podslojnogo pozharotushenija na naprjazhennoe sostojanie rezervuara pri osadke osnovanija // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–8. pp. 1698–1703.

8. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. Chislennoe modelirovanie processa deformirovanija rezervuara pri razvitii neravnomernyh osadok // Neftjanoe hozjajstvo. 2015. no. 4. pp. 88–91.

9. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. Issledovanie sobstvennoj zhestkosti vertikalnogo stalnogo cilindricheskogo rezervuara // Neftjanoe hozjajstvo. 2014. no. 10. pp. 121–123.

10. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Sharkov A.E., Gretchenko D.A. Tehnologija diagnostiki vertikalnyh stalnyh rezervuarov bez snjatija antikorrozionnogo pokrytija // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9–8. pp. 1703–1708.

11. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Ocenka vozdejstvija priemo-razdatochnogo patrubka pri razvitii osadki rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–3. pp. 540–544.

12. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Gruchenkova A.A. Analiz vozmozhnosti ispolzovanija kriteriev standarta API-653 dlja ocenki neravnomernoj osadki rezervuarov otechestvennyh tiporazmerov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 12–3. pp. 514–519.

13. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Gruchenkova A.A., Antonov I.V. Chislennyj analiz vlijanija zhestkosti gazouravnitelnoj sistemy pri razvitii osadok rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–6. pp. 1292–1296.

14. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Sokolov S.S. Ocenka vlijanija truboprovodov sistemy avarijnogo sbrosa na naprjazhennoe sostojanie konstrukcii rezervuara pri razvitii osadok osnovanija // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–4. pp. 804–808.

15. Chirkov S.V., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Opredelenie optimalnogo kolichestva trosov podderzhki dnishha pri podeme rezervuara // Izvestija vuzov. Neft i gaz. 2014. no. 5. pp. 72–78.

### Рецензенты:

Якубовский Ю.Е., д.т.н., заведующий кафедрой «Прикладная механика», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Мерданов Ш.М., д.т.н., заведующий кафедрой «Транспортные и технологические системы», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.