

УДК 621.642.39.03

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ СО СТАЦИОНАРНОЙ КРЫШЕЙ ПРИ НЕОСЕССИММЕТРИЧНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

Чепур П.В., Тарасенко А.А.

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

В современной НТД принято задавать ветровую нагрузку в виде равномерно распределенного давления по площади и стенке резервуара. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе для различных конструкций РВС, выполненные под руководством профессоров В.Е. Шутова и В.Л. Березина, показали, что при воздействии ветра на оболочку возникают зоны разрежения, которые необходимо учитывать при расчетах деформаций резервуаров. Разработана конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 для расчета ветровой нагрузки в неосесимметричной постановке с учетом массива дифференцированных значений аэродинамического коэффициента. Получено распределение напряжений и деформаций металлоконструкций РВС-20000 при воздействии неравномерно распределенного ветрового давления с нормативным значением  $Q_n = 600$  Па. Установлено, что наибольшие деформации и напряжения возникают в узле сопряжения стенки и стационарного настила.

**Ключевые слова:** резервуар, РВС, ветровая нагрузка, РВС-20000, МКЭ, ANSYS, НДС, прочность, напряжения

## FEATURES OF FIXED ROOF TANKS DEFORMATION EFFECTS IN AXISYMMETRIC WIND LOAD

Chepur P.V., Tarasenko A.A.

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

In today's normative documents it is decided to ask the wind load as evenly distributed pressure on the area and the tank wall. Experimental studies in the wind tunnel for the different designs of the tank, performed under the supervision of Professors V.E. Shutov and V.L. Berezin showed that under the influence of wind on the shell having zones vacuum that must be considered when calculating the deformation of tanks. Finite element model of the tank AST-20000 to calculate wind loads in non-axisymmetric formulation, taking into account the array of differentiated values of aerodynamic coefficients. The distribution of the stress and strain of metal structures AST-20000 under the influence of unevenly distributed wind pressure from the standard value  $Q_n = 600$  Pa. It has been established that the greatest deformation and stresses occur in the node interface and the stationary wall planks.

**Keywords:** tank, AST, wind load, RVS-20000, FEM, ANSYS, stress-strain state, strength, stress

В настоящий момент разветвленная сеть магистральных нефтепроводов России связывает районы с различными физико-географическими характеристиками. Инфраструктура магистрального транспорта нефти распространена от полярных районов добычи сырья до южных районов, где осуществляется отгрузка на морской транспорт. Неотъемлемыми сооружениями в технологической цепочке являются крупногабаритные стальные резервуары (РВС), получившие большое распространение. В процессе эксплуатации резервуары испытывают сложное сочетание действующих нагрузок: гидростатическую (от веса продукта); собственный вес корпуса и покрытия; вакуум и избыточное давление (охлаждение/нагревание или слив/налив продукта соотв.); снеговая и ветровая нагрузки – в наибольшей степени обусловлены природно-климатическим фактором. Многолетний опыт проектирования резервуаров показал, что учёт ветровой нагрузки, представляющей собой случайное поле аэродинамических давлений,

неосесимметрично распределенного по поверхности сооружения, имеет ряд нюансов. Поскольку РВС представляет собой сочленение различных металлоконструкций с разной кривизной, имеющих к тому же несовершенства геометрической формы, то для каждого резервуара распределение аэродинамического коэффициента ветрового потока по поверхности корпуса и кровли уникально, несмотря на однотипность резервуарных конструкций: отношения высоты к диаметру H/D, тип покрытия (стационарное, плавающее и др.), установленное технологическое оборудование на стенке и кровле (люки, патрубки, трубопроводы), рельеф площадки и прилегающей территории (а также рядом стоящие сооружения) – все эти факторы имеют существенное значение для распределения ветрового потока по поверхности конкретного резервуара. Поэтому авторами поставлена задача оценить НДС резервуара при воздействии ветровой нагрузки с учетом неравномерности распределения аэродинамического коэффициента,

а также определить действующие напряжения и деформации корпуса и стационарной крыши распространённого резервуара РВС-20000, построенного по типовому проекту 704-1-60.

В работе [1] предложена гипотеза представления турбулентного потока ветра, заключающаяся в том, что на некоторую, в среднем установившуюся скорость потока воздуха накладываются скорости порывов, т.е. на установившееся в среднем давление, которое практически постоянно, накладывается пульсация давления, носящая случайный характер. Пульсации скоростного напора, вызванные порывами ветра, оказывают на сооружение динамическое воздействие, которое учитывается путем умножения скоростного напора на коэффициент  $\beta$ :

$$q_b = \beta K Q_b, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент увеличения скоростного напора, зависящий от пульсации ветрового потока и динамических характеристик сооружения;  $K$  – аэродинамический коэффициент;  $Q_b$  – расчетный скоростной напор, Па.

Коэффициент увеличения скоростного напора определяется по формуле

$$\beta = 1 + \varepsilon m, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент динамичности, зависящий от периода собственных колебаний сооружения  $T$  и логарифмического декремента затухания колебаний сооружения;  $m$  – коэффициент пульсации скоростного потока ветра.

Поскольку определение аэродинамического коэффициента по всей поверхности резервуара является сложной экспериментальной задачей, для расчета параметров НДС сооружения нами были использованы результаты исследований работ [1, 14–15], полученных путём экспериментов на уменьшенной геометрически подобной модели РВС-20000 (масштаб 1:100) в аэродинамической трубе ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. Значение аэродинамического коэффициента  $K$  есть отношение избыточного давления  $p$  на поверхности резервуара к нормативному скоростному напору  $Q_n$ , назначаемому по СП 20.13330.2011:

$$K = \frac{p}{Q_n}. \quad (3)$$

Величины аэродинамического коэффициента  $K$  для РВС-20000 со стационарной крышей представлены в табл. 1.

Для определения напряжений и деформаций металлоконструкций РВС-20000 авторами предложена расчетная схема, представленная на рис. 1. Её реализация осуществлялась в конечно-элементной программе ANSYS, основные параметры представлены в табл. 2.

Использование предложенной авторами расчетной схемы позволило получить распределение деформаций и напряжений в металлоконструкциях РВС-20000 с учетом неосесимметричного воздействия ветровой нагрузки в соответствии с экспериментально полученными в [1] значениями аэродинамического коэффициента. На рис. 2 представлена эпюра перемещений листов стенки резервуара. Для визуализации применен масштабный коэффициент деформаций  $\times 100$ ; видно, что для заданных параметров ветровой нагрузки максимальные радиальные прогибы стенки ( $\delta_{ст} = 1,19$  мм) расположены на 8 поясе заветренной части сооружения. При этом резервуар имеет характерный наклон по направлению воздействия ветра.

При расчете НДС резервуара оказалось, что наибольшую опасность ветровая нагрузка представляет для конструкции кровли, в частности, узла сопряжения опорного кольца с балочным и листовым настилом, расположенного на наветренной части РВС, где возникает срыв ветрового потока. Ввиду особенностей геометрической формы РВС-20000 весь настил кровли находится под разрежением. В местах соединения несущих балок с кольцом жесткости возникают напряжения до 58 МПа при нормативном ветровом давлении 600 Па. Так как такие напряжения возникают только от действия ветра, они вносят большой вклад в общее напряженно-деформированное состояние резервуара, поскольку суммируются с напряжениями от столба жидкости, снега, вакуума. Еще большую опасность представляют собой ситуации, когда имеются отклонения геометрической формы металлоконструкций от проектных значений. В таком случае недопустимые напряжения могут концентрироваться в самых непредсказуемых местах, в особенности если деформации элементов конструкций вызваны развитием неравномерной осадки основания РВС [4]. На рис. 3 и 4 представлены полученные

**Таблица 1**

Значения аэродинамического коэффициента  $K$  для РВС-20000 со стационарной крышей

	Координаты точек вдоль образующей стенки РВС-20000, м								
	0	2,8	5,6	7	8,4	9,8	10,5	11,25	11,95
$K$	1	0,97	0,9	0,82	0,65	0,5	0,185	-0,2	-1,56

авторами распределение деформаций и напряжений в металлоконструкциях 8-го пояса стенки и стационарной кровли РВС-20000 при воздействии ветровой нагрузки в соответствии с принятой расчетной схемой на рис. 1.

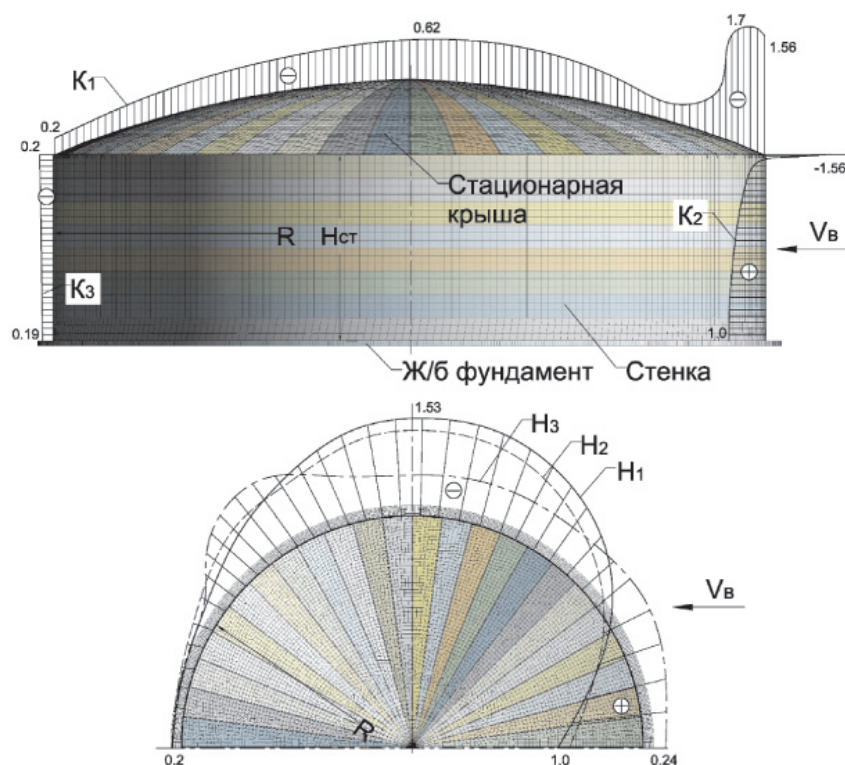


Рис. 1. Расчетная схема:

- $R$  – радиус резервуара;  $H_{ст}$  – высота стенки;  $V$  – направление ветрового потока;
- $K_1$  – разрежение воздуха по поверхности кровли;  $K_2$  – избыточное давление по поверхности передней стенки;  $K_3$  – разрежение воздуха по поверхности стенки в законтурной зоне;
- $H_1$  – распределение коэффициента  $K$  в плоскости уточного шва;
- $H_2$  – распределение коэффициента  $K$  на высоте 7,5 м;
- $H_3$  – распределение коэффициента  $K$  в плоскости верхней кромки стенки

Таблица 2

Параметры расчетной схемы РВС-20000 при анализе воздействия ветровой нагрузки, несимметрично распределенной по корпусу и стационарной крыше

1. Геометрическая модель
В геометрической модели учитываются конструкции РВС-20000 согласно ТП-704-1-60: – железобетонного фундаментного кольца толщиной 0,3 м и шириной 1,5 м; – 8 поясов стенки толщиной от 13 до 11 мм, выравненные по внутреннему краю; – кровли, состоящей из 24 сегментов, сопряженных листами толщиной 6 мм и балками; – опорного кольца жесткости. Геометрическая модель резервуара использовалась при расчете НДС конструкции РВС-20000 при неравномерных осадках основания в [2, 5–7, 10-13] и прошла верификацию
2. Действующие нагрузки
– Расчеты выполнялись для опорожненного резервуара. – Распределенная нагрузка от стационарного оборудования кровли $F_{кр} = 100$ кН. – Снеговая нагрузка не учитывалась. – Ветровая нагрузка принята для V ветрового района (Новороссийск, Приморье) согласно СП 20.13330.2011 с учетом приведенных в табл. 1 и на рис. 1 значений аэродинамического коэффициента по поверхности стенки и кровли РВС, нормативный скоростной напор для этого района равен $Q_n = 600$ Па. К V ветровому району относятся нефтебазы и морские терминалы на Черноморском побережье и Дальнем Востоке, где расположены резервуарные парки, наиболее сильно подверженные воздействию ветра в РФ, что обусловлено физико-географическим положением



Окончание таблицы

**3. Граничные и контактные условия**

– Железобетонное фундаментное кольцо и центральная часть днища упруго закреплены по нижней грани, для чего использована линейно-упругая модель Винклера. Коэффициент постели грунтового основания  $k = 2 \cdot 10^8$  МН/м<sup>3</sup> принят для искусственно уплотненного песчано-глинистого грунта.

– Контакт «окрайки» и фундаментного кольца учитывает абсолютно жесткую связь (связанный контакт «bonded») без возможности разъединения и проскальзывания.

– Соединения металлоконструкций кровли с опорным кольцом неразъемные, сварные – связаны контактом типа «bonded». Кровля не защемлена, учитывается её реальная конструктивная жесткость

**4. Дискретизация модели КЭ-сеткой**

– Стенка, листовая настил кровли, окрайка, днище, кольцо жесткости смоделированы с помощью восьмиузловых оболочечных КЭ-элементов SHELL181 с 6-ю степенями свободы для каждого узла (вращение и перемещение по осям  $X, Y, Z$ ).

– Балки каркаса кровли смоделированы с помощью двухузлового КЭ-элемента BEAM188 с 7-ю степенями свободы для каждого узла (вращение и перемещение по осям  $X, Y, Z$ ).

– Ветровая нагрузка смоделирована восьмиузловым поверхностным КЭ-элементом SURF154, имеющим нулевую толщину с задаваемым контактным давлением по поверхности (в соответствии с величиной ветровой нагрузки).

– Всего сгенерировано 123906 узлов, 191307 контактных узлов, 102562 твердотельных элементов, 335248 – общее число всех типов КЭ-элементов.

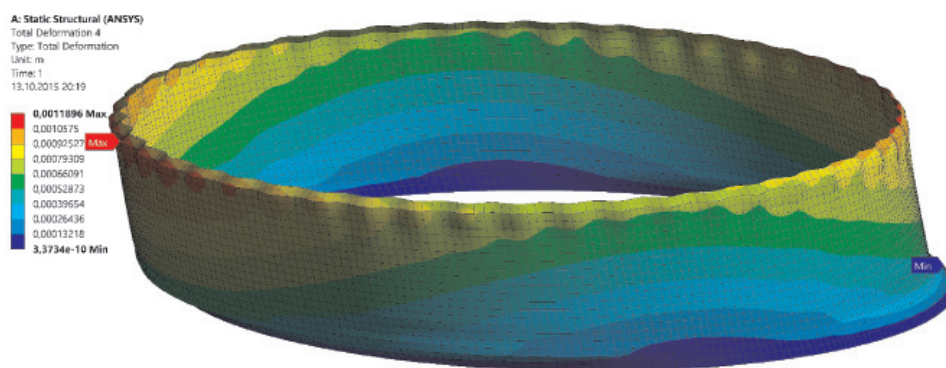


Рис. 2. Перемещения стенки PBC-20000 при воздействии ветровой нагрузки

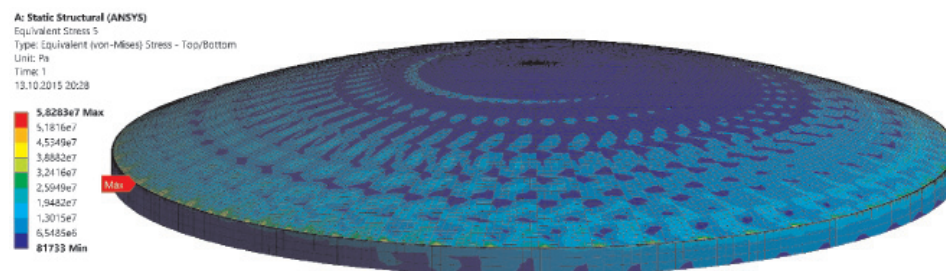


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в металлоконструкциях 8-го пояса стенки и стационарной кровли PBC-20000 при воздействии ветровой нагрузки

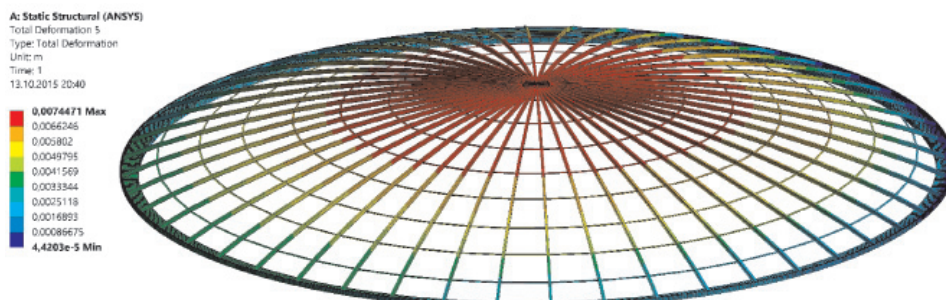


Рис. 4. Перемещения металлоконструкций опорного кольца и балок кровли PBC-20000 при воздействии ветровой нагрузки

**Выводы**

1. Разработана конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 для расчета влияния ветровой нагрузки на НДС резервуара с учетом массива дифференцированных значений аэродинамического коэффициента.

2. Получено распределение напряжений и деформаций металлоконструкций РВС-20000 при воздействии неравномерно распределенного ветрового давления с нормативным значением  $Q_n = 600$  Па (для V ветрового района). Установлено, что наибольшие деформации и напряжения возникают в узле сопряжения стенки и стационарного настила.

3. Несмотря на то, что действующие напряжения в стенке РВС не превышают 122 МПа при воздействии ветровой нагрузки с нормативным значением  $Q_n = 600$  Па, они складываются с напряжениями, возникающими от эксплуатационных и возможных непроектных нагрузок, что может привести к достижению предельных состояний металлоконструкций РВС-20000.

4. Результаты расчета и опыт работ [3, 9] показали, что отклонение геометрической формы РВС от проектных значений приводит к перераспределению значений аэродинамического коэффициента по поверхностям стенки и кровли. Эти значения можно определить только экспериментальным путем либо с помощью моделирования в КЭ-пакетах типа ANSYS «Fluent» на основании реальной 3D модели, «продуваемой» в виртуальной аэродинамической трубе. Учитывая, что большое количество существующих РВС эксплуатируются с отклонениями геометрической формы, возникает необходимость разработки универсальной методики и подходов, позволяющих рассчитывать воздействие ветровой нагрузки на конструкцию резервуаров с учетом несовершенств геометрии стенки, кровли и имеющегося технологического оборудования.

5. Сравнивая результаты расчета НДС резервуара РВС-20000 в случаях неосесимметрично и равномерно распределенного ветрового давления, установлено, что при учете неравномерного воздействия ветра действующие напряжения в узле сопряжения кровли и стенке на 55 процентов выше, чем в случае расчетной схемы с равномерной нагрузкой.

**Список литературы**

1. Березин В.Л., Шутов В.Е. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов. – М.: Недра, 1973. – 200 с.
2. 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.
3. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение действующих напряжений от подъемных устройств при ремонте фундамента резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–11. – С. 2421–2425.
4. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Эволюция взглядов на вопросы определения величины допустимых осадок резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–1. – С. 67–84.
5. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А. Использование критериев стандарта API-653 для оценки допустимой величины осадки днища резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–7. – С. 1418–1422.
6. 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.
7. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Исследование собственной жесткости вертикального стального цилиндрического резервуара // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 121–123.
8. 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.
9. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Особенности совместной работы резервуара и устройств размыва донных отложений винтового типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–8. – С. 1671–1675.
10. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Оценка воздействия приемо-раздаточного патрубка при развитии осадки резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 540–544.
11. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А. Анализ возможности использования критериев стандарта API-653 для оценки неравномерной осадки резервуаров отечественных типоразмеров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–3. – С. 514–519.
12. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Антонов И.В. Численный анализ влияния жесткости газоравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–6. – С. 1292–1296.
13. 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.
14. Шутов В.Е. Оптимизация резервуарных конструкций для хранения нефтепродуктов: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – М., МИНХиГП, 1983. – 37 с.
15. Шутов В.Е., Копейкин Ю.Д., Сафарян М.К., Щербakov А.Г. Патент 0049451. Резервуар для хранения нефтепродуктов 05.12.1975 г.

**References**

1. Berezin V.L., Shutov V.E. Prochnost' i ustojchivost' rezervuarov i truboprovodov. M.: Nedra, 1973. 200 p.
2. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Naprijazhenno-deformirovannoe sostojanie verhnego opornogo kol'ca rezervuara pri neosesimmetrichnyh deformacijah korpusa // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–3. pp. 525–529.

3. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Opredelenie dejstvujushih naprjazhenij ot podemnyh ustrojstv pri remonte fundamenta rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9–11. pp. 2421–2425.
4. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Jevoľucija vzgljadov na voprosy opredelenija velichiny dopustimyh osadok rezervuarov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 12–1. pp. 67–84.
5. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Gruchenkova A.A. Ispolzovanie kriteriev standarta API-653 dlja ocenki dopustimyj velichiny osadki dnishha rezervuarov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 12–7. pp. 1418–1422.
6. 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.
7. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. Issledovanie sobstvennoj zhestkosti vertikalnogo stalnogo cilindricheskogo rezervuara // Neftjanoe hozjajstvo. 2014. no. 10. pp. 121–123.
8. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Sharkov A.E., Gretchenko D.A. Tehnologija diagnostiki vertikalnyh stalnyh rezervuarov bez snjatija antikorroziionnogo pokrytija // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9–8. pp. 1703–1708.
9. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Osobennosti sovmestnoj raboty rezervuara i ustrojstv razmyva donnyh otlozhenij vintovogo tipa // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 2–8. pp. 1671–1675.
10. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Ocenka vozdejstvija priemo-razdatochnogo patrubka pri razvitii osadki rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–3. pp. 540–544.
11. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Gruchenkova A.A. Analiz vozmozhnosti ispolzovanija kriteriev standarta API-653 dlja ocenki neravnomernej osadki rezervuarov otechestvennyh tiporazmerov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 12–3. pp. 514–519.
12. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Gruchenkova A.A., Antonov I.V. Chislennyj analiz vlijanija zhestkosti gazouravitelnoj sistemy pri razvitii osadok rezervuara // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–6. pp. 1292–1296.
13. 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.
14. Shutov V.E. Optimizacija rezervuarnyh konstrukcij dlja hranenija nefteproduktov: avtoreferat dis. ... d-ra tehn. nauk. M., MINHiGP, 1983. 37 p.
15. Shutov V.E., Kopejkin Ju.D., Safarjan M.K., Shherbakov A.G. Patent 0049451. Rezervuar dlja hranenija nefteproduktov 05.12.1975 g.