УДК 621.642.39.03

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ СТАНДАРТА API-653 ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМОЙ ВЕЛИЧИНЫ ОСАДКИ ДНИЩА РЕЗЕРВУАРОВ

Тарасенко А.А., Чепур П.В., Гручeнкова А.А.

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

Проанализированы требования зарубежных и отечественных стандартов к предельно допускаемым величинам осадки центральной части днища. В конечно-элементном программном комплексе ANSYS разработана максимально детализированная модель центральной части днища и окрайки резервуара РВС-20000 в соответствии с реальными проектными, конструкционными, техническими характеристиками. С применением программных алгоритмов заданного нагружения выполнено моделирование развития осадки центральной части днища в широком диапазоне, учитывающем вертикальные и радиальные составляющие деформирования мембранной конструкции. Получены эпюры перемещений, деформаций и напряжений, возникающих в металле полотнища при развитии неравномерной осадки. Рассчитанные параметры изменения НДС металлоконструкции при развитии осадки позволили установить зависимости между размерами просадочных зон и возникающими при осадке напряжениями. Авторами предложена номограмма определения действующих эквивалентных напряжений в конструкции днища РВС-20000 при величине вертикальной составляющей осадки В от 0,1 до 1 м и размерах просадочной зоны с радиусами вписанной окружности от 0,45 до 5,85 м.

Ключевые слова: резервуар, РВС, НДС, основание, фундамент, МКЭ, API 653, НТД, днище

CRITERIA STANDARD API-653 FOR EVALUATION PERMISSIBLE SETTLEMENT OF TANKS BOTTOM

Tarasenko A.A., Chepur P.V., Gruchenkova A.A.

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

Analyze the requirements of foreign and domestic standards to the maximum permissible value of the bottom sediments of the central. In the finite element software package ANSYS developed finite element model of the central part of the bottom and selvages tank in accordance with the actual design, construction specifications. With the use of software algorithms specified loading simulated rainfall of the central part of the bottom of a wide range that takes into account the vertical and radial components of the deformation of the membrane structure. Diagrams obtained displacements, strains and stresses in the metal cloth in the development of differential settlement. The authors proposed a nomogram of determining the equivalent stresses in the structure of the tank bottom at the value of the vertical component of rainfall in the 0,1 to 1 m and the size of subsidence zone radius of the inscribed circle of 0,45 to 5,85 m. You must perform additional calculations stress-strain state design the central part of the bottom to obtain analytical dependence, which allows to determine the permissible parameters of rainfall for all sizes of domestic tanks.

Keywords: tank, aboveground tank, stress-strain state, base, foundation, FEM, API 653, standard, bottom

Разрывы днищ вертикальных стальных резервуаров (РВС) в результате больших прогибов нередко становятся причиной возникновения аварийных ситуаций. Наиболее часто разрушение днища резервуара происходит вследствие появления хлопунов полотнища в сочетании с коррозионными повреждениями вблизи сварных швов металлоконструкций. Эти дефекты являются концентраторами напряжений и существенно снижают прочность конструкции в целом. Многолетний опыт исследователей [2, 3–4] и эксплуатирующих организаций показал, что проблема исправления осадок центральной части днища РВС является актуальной, так как каждая возможная авария требует огромных материальных и временных затрат на ее ликвидацию, а при наихудшем исходе может приводить к угрозе жизни людей.

Для обеспечения безопасных условий эксплуатации все резервуары подлежат периодическому обследованию для определения их действительного технического состояния. В России контроль технического состояния резервуаров проводится на основании действующих государственных и отраслевых стандартов, регламентирующих документов, правил и другой нормативно-технической документации. Выполнение требований этих норм является обязательным для всех организаций. Авторами рассмотрены подходы зарубежных стандартов к предельным значениям осадки днищ резервуаров. Американские, европейские нормы носят рекомендательный характер в части оценки неравномерных осадок, поэтому окончательные управленческие решения о необходимости ремонта принимают эксплуатирующие организации. Анализируя положения стандартов API-653, BS, EN в части назначения допускаемых величин осадки днища, обобщенные в табл. 1, и сравнивая их с отечественными нормами, можно сказать, что российские стандарты имеют более жесткие требования.

Таблица 1

Допускаемые значения неравномерной осадки днища согласно требованиям НТД

Нормативный документ	Требования
API-653	B_B = 0,37·R (в футах)
РД-23.020.00-КТН-283-09	ΔS = 0,003·R (в метрах)
BS-2564	не регламентируется (назначается организацией-проектировщиком)
EN-14015:2004	

Необходимо отметить, что конструкции резервуаров российских типоразмеров и способы их строительства существенно отличаются от западных стандартов, что оказывает значительное влияние на характер работы металлоконструкций при неосесимметричных нагрузках. Проблема гармонизации отечественных стандартов с зарубежными сформулирована в [4, 13–14]. В этой статье на примере РВС-20000 авторами предлагается проанализировать возможность распространения требований стандарта API-653 при определении допустимых осадок центральной части днища резервуаров отечественных типоразмеров. Для достижения этой цели необходимо произвести проверочные расчеты напряженно-деформированного состояния центральной части днища резервуара при заданных параметрах неравномерной осадки, установить значения действующих напряжений в конструкции центральной части днища резервуара, а затем сравнить их с максимально допустимыми значениями для марки стали 09Г2С по отечественной нормативной документации.

В стандарте API-653 максимально допустимая глубина местной вогнутости или высота местной выпуклости цетральной части днища резервуара рассчитывается отдельно для каждого дефекта по формуле (*). Для этого необходимо знать радиус вписанной окружности в местную выпуклость или местную вогнутость.

$$B_B = 0{,}37 \cdot R, \qquad (*)$$

где B_B – максимальная высота выпуклости или глубина местной вогнутости (в футах); R – радиус вписанной окружности в выпуклом месте или местной вогнутости (в футах).

Для выполнения проверочного расчета РВС объемом 20000 м^3 выбраны значения радиуса вписанной окружности R в пределах от 0,18 до 1,27 м. Это связано с тем, что в отечественной НТД локальные просадки с площадью вписанной окружности более 5 м^2 являются недопустимыми. По формуле (*) были получены предельные значения глубины местной вогнутости и высоты местной выпуклости центральной части днища в зависимости от величины радиуса вписанной в них окружности. Все значения подставлялись в Американской системе мер, т.к. в формулах заложены коэффициенты, размерность которых нигде не указывается, и перевод единиц измерений в другую систему может привести к ошибочным результатам. На рис. 1 данные зависимости представлены графически.

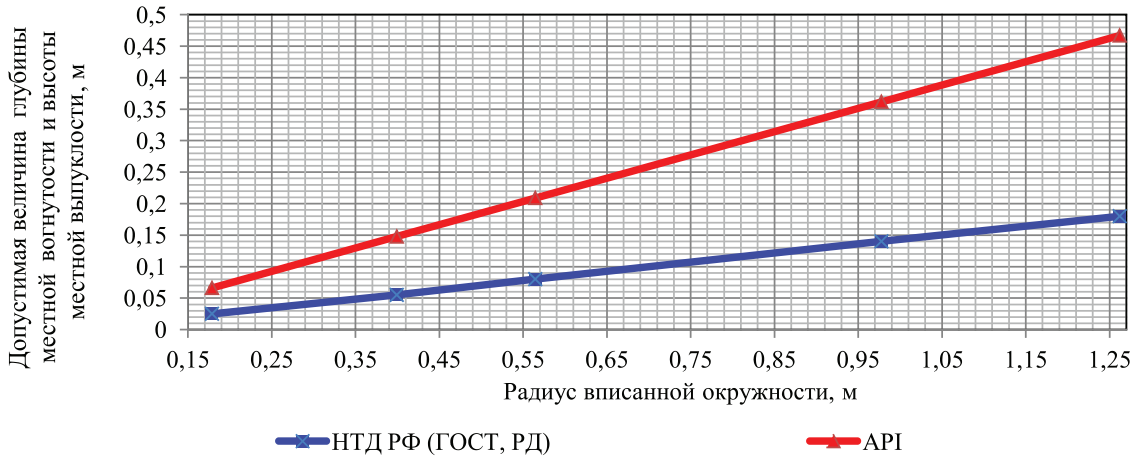

Рис. 1. Требования российских (РД) и американских (API) стандартов к предельным значениям депланации участков центральной части днища в зависимости от величины радиуса вписанной в них окружности

Если высота наблюдаемой выпуклости или глубина вогнутости выходит за пределы допускаемых значений, то необходимо провести дополнительную оценку технического состояния днища резервуара. Из графика видно, что максимально допустимые значения высоты местной выпуклости или глубины местной вогнутости центральной части днища в отечественной НТД намного меньше, чем в стандарте API-653. Это объясняется более жесткими требованиями, предъявляемыми при строительстве резервуаров по американскому стандарту API. Авторами предлагается оценить НДС конструкции днища РВС-20000 при предельно допустимых значениях, которые определены в американском стандарте. Для этого был использован программный продукт ANSYS, реализующий метод конечных элементов. В [13] представлена модель, используемая при расчетах НДС конструкции днища РВС-20000 в неосесимметричной постановке. Данная модель верифицирована в [15], что позволяет использовать ее при решении различных задач в нелинейной постановке. При моделировании процесса деформации днища под воздействием неравномерной осадки варьировались вертикальные составляющие В (от 0 до 1 м) и радиус просадочной зоны (от 0,45 до 6 м). Результаты постпроцессинга в программе ANSYS представлены на рис. 2–4.

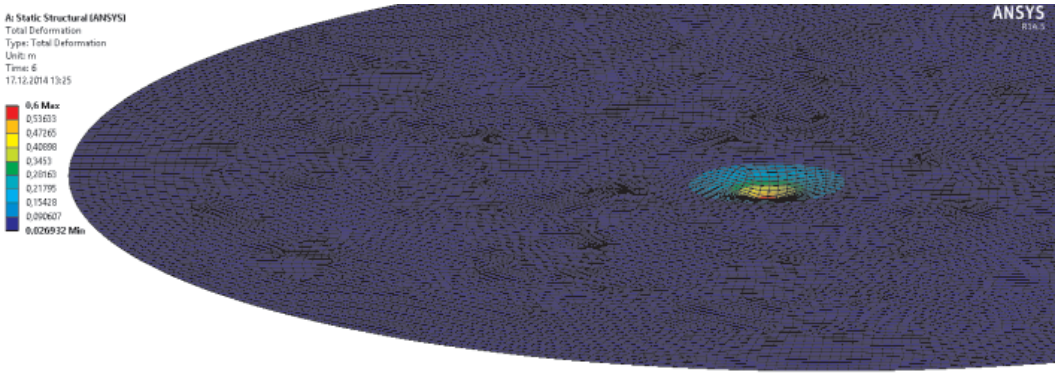

Рис. 2. Эпюра перемещений днища при величине вертикальной составляющей осадки В = 0,6 м и радиусе просадочной зоны R = 2,1 м

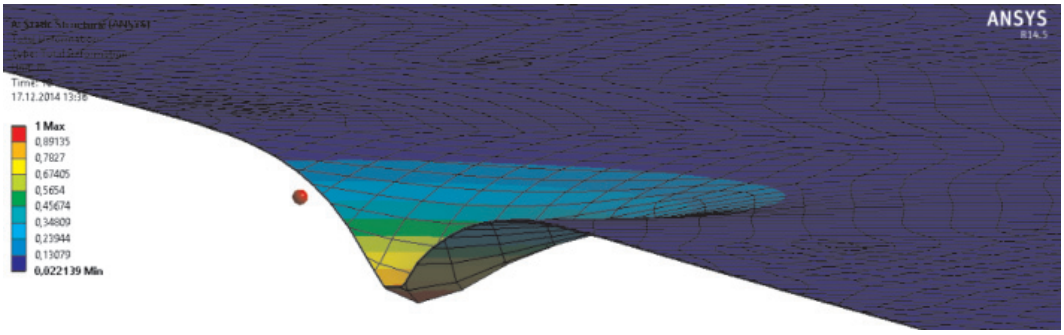

Рис. 3. Эпюра перемещений днища при величине вертикальной составляющей осадки В = 1 м и радиусе просадочной зоны R = 2,1 м

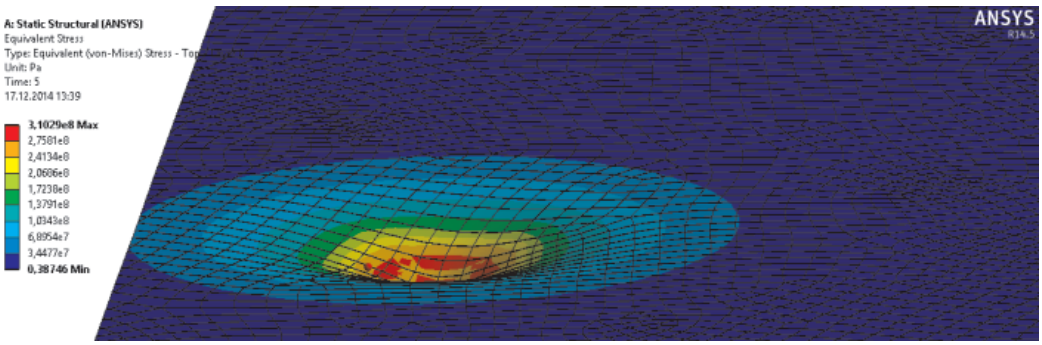

Рис. 4. Эпюра эквивалентных напряжений в днище при величине вертикальной составляющей осадки В = 0,7 м и радиусе просадочной зоны R = 2,85 м

В расчетах учитывалась максимально точно смоделированная геометрическая конструкция днища РВС-20000, имеющая уклон конической формы в отношении 1:100 от центра резервуара и диаметром 46 м. Толщина листов полотнища составляет 9 мм в соответствии с актуальными отраслевыми регламентами по проектированию и ремонту вертикальных стальных резервуаров.

По результатам постпроцессинговой обработки результатов в программе ANSYS были получены зависимости максимальных эквивалентных напряжений в центральной части днища РВС от величины просадочной зоны с различными геометрическими параметрами. Предложенная авторами номограмма представлена на рис. 5.

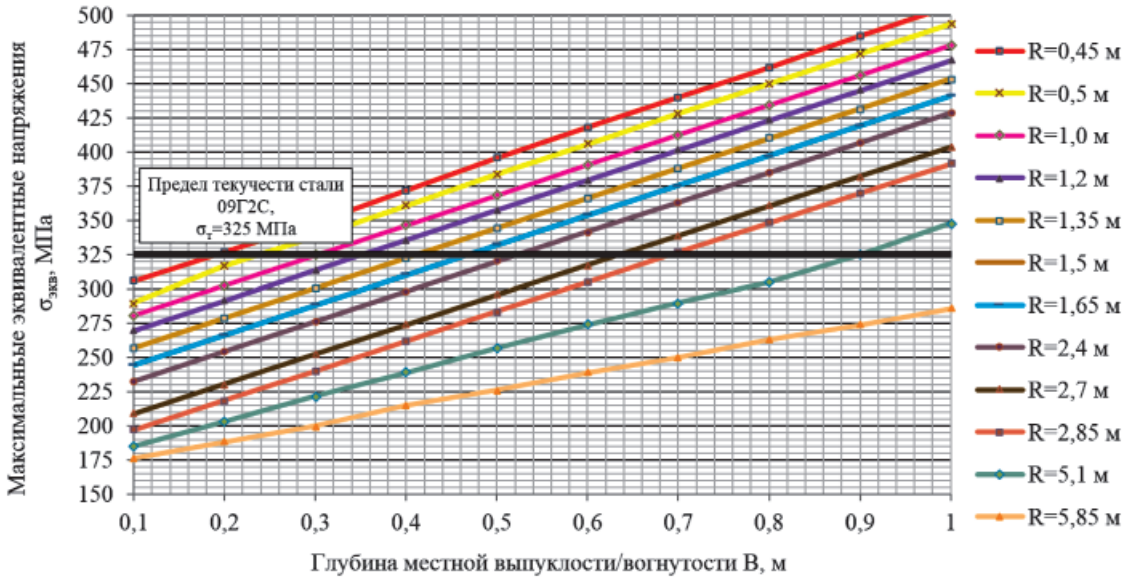

Рис. 5. Зависимости между максимальными эквивалентными напряжениями в центральной части днища РВС-20000 и величиной неравномерной осадки

На графике горизонтальной линией обозначена граница наступления предельного состояния для конструкции днища РВС-20000. Этой границе соответствует момент наступления пластических деформаций – предел текучести стали 09Г2С, $\sigma_т$ = 325 МПа. Из графика на рис. 5 видно, что наибольшие напряжения возникают при малых значениях радиуса просадочной зоны и при больших величинах вертикальных отклонений В более 0,2 м.

Выводы

1. Проанализированы требования зарубежных и отечественных стандартов к предельно допускаемым величинам осадки центральной части днища.

2. В программном комплексе ANSYS разработана максимально детализированная конечно-элементная модель центральной части днища и окрайки резервуара РВС-20000 в соответствии с реальными проектными, конструкционными, техническими характеристиками.

3. С применением программных алгоритмов заданного нагружения выполнено моделирование развития осадки центральной части днища в широком диапазоне, учитывающем вертикальные и радиальные составляющие деформирования мембранной конструкции. Максимальная величина осадки при расчетах составила 1 м, максимальная площадь просадочной зоны – 107 м^2 при радиусе вписанной окружности 5,85 м.

4. Получены эпюры перемещений, деформаций и напряжений, возникающих в металле полотнища при развитии неравномерной осадки. Рассчитанные параметры изменения НДС металлоконструкции при развитии осадки позволили установить зависимости между размерами просадочных зон и возникающими при осадке напряжениями.

5. Авторами предложены зависимости, позволяющие определять значения действующих эквивалентных напряжений в конструкции днища РВС-20000 от величины вертикальной составляющей осадки В от 0,1 до 1 м при различных размерах просадочной зоны – с радиусами вписанной окружности от 0,45 до 5,85 м.

6. Установлено, что при размере просадочной зоны площадью 0,63 м (R = 0,45 м) предельное состояние возникает уже при величине вертикальной составляющей депланации – B = 0,2 м, напряжения при этом составляют 325 МПа, что соответствует пределу текучести стали 09Г2С. При величине B = 1 м предельное состояние в металле возникает даже при площади просадки 80 м^2.

7. Авторами сделан вывод о том, что для оценки допустимой осадки центральной части днища отечественного резервуара РВС-20000 недопустимо использовать представленную в стандарте API-653 формулу (*). Расчеты показали, что допуск по такой методике дает коэффициент запаса по пределу текучести не более 1,1, а при некоторых размерах просадочных зон (с радиусом вписанной окружности более 2 м) запас прочности менее 1. Это связано с отличиями в конструкциях днищ и различными характеристиками применяемых сталей. Необходимо выполнить дополнительные расчеты НДС конструкции центральной части днища для получения аналитической зависимости, позволяющей определять допустимые параметры осадки для всех типоразмеров отечественных РВС.

Список литературы

1. Иванов И.А, Кушнир С.Я., Пульников С.А. Геотехнические проблемы трубопроводного транспорта: учебное пособие. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 208 с.
2. Кушнир С.Я., Пульников С.А., Мерданова З.Ш. Особенности расчётов естественных грунтовых оснований резервуаров большой ёмкости по предельным состояниям // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – 2012. – С. 245–247.
3. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 1991. – 254 с.
4. Тарасенко А.А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 1999. – 299 с.
5. Тарасенко А.А., Николаев Н.В., Хоперский Г.Г., Овчар З.Н., Саяпин М.В. Исследование влияния приемораздаточных патрубков на напряженно-деформированное состояние стенки вертикальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1998. – № 1. – С. 59–68.
6. Тарасенко А.А., Николаев Н.В., Хоперский Г.Г., Саяпин М.В. Напряженно-деформированное состояние стенки резервуара при неравномерных осадках основания // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1997. – № 3. – С. 75–79.
7. Тарасенко А.А., Тюрин Д.В. Моделирование нефтяных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 2001. – № 4. – С. 65–69.
8. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Деформирование стационарной крыши крупногабаритного резервуара при неравномерных осадках основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–2. – С. 296–300.
9. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Кузовников Е.В., Тарасенко Д.А. Расчет напряженно-деформированного состояния приемо-раздаточного патрубка с дефектом с целью обоснования возможности его дальнейшей эксплуатации // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–7. – С. 1471–1476.
10. Тарасенко М.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко А.А. Анализ результатов дефектоскопии коррозионных повреждений резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 2010. – № 5. – С. 78–82.
11. Хоперский Г.Г., Саяпин М.В., Тарасенко А.А. Расчет прочности фундаментного кольца резервуара при воздействии сосредоточенной нагрузки от подъемного устройства // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1998. – № 2. – С. 60–64.
12. Хоперский Г.Г., Овчар З.Н., Тарасенко А.А., Николаев Н.В. Определение неравномерной составляющей осадки резервуаров, вызывающей неосесимметричную деформацию // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1997. – № 5. – С. 80–85.
13. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–7. – С. 1560–1564.
14. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Методика определения необходимости ремонта резервуара при осадках основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–6. – С. 1336–1340.
15. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Конечно-элементная модель вертикального стального резервуара с усиливающими элементами при его подъеме гидродомкратами // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–5. – С. 1003–1007.

References

1. Ivanov I.A, Kushnir S.Ja., Pul'nikov S.A. Geotechnical problems of pipeline transport: a tutorial. Tyumen: TSOGU, 2011. 208 p.
2. Kushnir S.Y, Pulnikov S.A, Merdanova Z. Features calculations natural groundwater reservoir base large capacity limit state // Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists «Problems of functioning transport systems». 2012. pp. 245–247.
3. Tarasenko A.A. Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Candidate technical sciences dissertation. Tyumen, 1991. 254 p.
4. Tarasenko A.A. Razrabotka nauchnyh osnov metodov remonta vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov: dis. doct. tehn. nauk. Tyumen, 1999. 299 p.
5. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Sajapin M.V. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz. 1998, no.1, pp. 59–68.
6. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Sajapin M.V. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz. 1997, no. 3, pp. 75–79.
7. Tarasenko A.A., Turin D.V. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz. 2001, no. 4, pp. 65–69.
8. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Fundamental research, 2014, no. 11 part 2, pp. 296–300.
9. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Kuzovnikov E.V., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2014, no. 9 part 7, pp. 1471–1476.
10. Tarasenko M.A., Sil'nickij P.F., Tarasenko A.A. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz. 2010, no. 5, pp. 78–82.
11. Hoperskij G.G., Sajapin M.V., Tarasenko A.A. Izvestijavuzov.Neft'igaz. 1998, no.2, pp. 60–64.
12. Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Tarasenko A.A., Nikolaev N.V. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz. 1997, no.5, pp. 80–85.
13. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Fundamental research, 2014, no.8 part 7, pp. 1560–1564.
14. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Fundamental research, 2014, no.8 part 6, pp. 1336–1340.
15. Chirkov S.V., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Fundamental research, 2014, no. 9–5, pp. 1003–1007.

Рецензенты:

Соколов С.М., д.т.н., профессор кафедры «ТУР», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

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

Работа поступила в редакцию 27.12.2014.