

УДК 621.642.39.03-025.71-034.14: 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ПРИ РАЗВИТИИ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСАДКИ НАРУЖНОГО КОНТУРА ДНИЩА

¹Тарасенко А.А., ¹Чепур П.В., ²Чирков С.В.

¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com;

²ОАО «Гипротрубопровод», Москва, e-mail: chirkov0210@mail.ru

В статье рассмотрены основные труды, посвященные неравномерным осадкам оснований резервуаров. Приведен обзор основных методов расчета НДС резервуара при неосесимметричных деформациях. Авторами статьи предложена расчетная схема для определения НДС вертикального стального резервуара при неравномерных осадках наружного контура днища в соответствии с геометрическими параметрами реального резервуара РВС-20000 м³. Представлен и спланирован эксперимент, включающий в себя схему с двумя влияющими факторами: геометрическая модель резервуара и величина безразмерного коэффициента n . Влияющие факторы имеют 3 и 5 комбинаций соответственно, что представлено в матрице эксперимента. В статье приведены эпюры перемещений, напряжений конструкций резервуара, а также графически изображены зависимости перемещений оболочек от величин просадочных зон. Сделаны выводы о влиянии рассмотренных факторов на НДС резервуара при неравномерных осадках наружного контура днища.

Ключевые слова: резервуар, неравномерные осадки наружного контура днища, ANSYS, САПР

THE RESEARCH OF CHANGES IN STRESS-STRAIN STATE VERTICAL STEEL STORAGE TANKS WITH DEVELOPMENT OF DIFFERENTIAL SETTLEMENT OUTDOOR CIRCUIT BOTTOM

¹Tarasenko A.A., ¹Chepur P.V., ²Chirkov S.V.

¹Tyumen State Oil and Gas Institute, Tyumen, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com;

²OJSC «Giprotruboprovod», Moscow, e-mail: chirkov0210@mail.ru

The article describes the main issues on the differential settlement of steel storage tank bases. The main methods of stress-strain state calculation with differential deformations of storage steel tanks are overviewed. The authors proposed analytical model for determining the stress-strain state of vertical steel tank with irregular outer contour of the bottom sediments in accordance with the geometric parameters of the real tank RVS-20000 m³. The experiment is transmitted and planned, that includes a scheme with two influencing factors: geometric model of the tank and the dimensionless coefficient n . These influencing factors have 3 and 5 combinations respectively, that presented in the matrix of the experiment. The article presents the diagrams of displacement, stress of tank constructions, as well as graphically depicted dependences values of shell displacements from subsidence zones. The conclusions about the impact of the considered factors on the stress-strain state differential settling tank at the outer contour of the bottom are performed.

Keywords: steel storage tank, differential settlement of outdoor circuit bottom, ANSYS, CAD

Неравномерные осадки наружного контура днища являются одной из причин снижения эксплуатационной надежности резервуара. Обычно разрушение происходит в сварных швах днища в окрестной зоне и стыке стенки с днищем [4]. Вопрос о влиянии неравномерных осадок оснований на напряженно-деформированное состояние резервуаров до конца не исследован, а полученные результаты иногда противоречат друг другу [1, 2, 3, 6, 7]. На рис. 1 продемонстрированы примеры недопустимой осадки наружного контура днища РВС.

В работе [1] автор рассчитал напряженно-деформированное состояние нижнего узла резервуара при неравномерных осадках. Для этого был использован программный комплекс ЛИРА. Как выяснилось впоследствии, решение в «упругой» постановке, без учета жесткости крыши и кольца жесткости, привело к серьезным ошибкам в расчетах. Нами

предлагается учитывать влияние центральной части днища, окрайки, колец жесткости, кровли на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара при неравномерных осадках. Ранее перечисленные выше элементы не учитывались в расчетных схемах большинства авторов.

В [8] была проверена адекватность предлагаемой модели путем решения известной аналитической осесимметричной задачи в линейной постановке. Результаты численного решения, реализованного в программном комплексе ANSYS, и аналитического отличаются на величину не более 2%, что говорит о возможности применения предложенной модели для более сложных расчетов в неосесимметричной постановке.

Расчетная схема (рис. 2) включает в себя действие нагрузки от веса стационарного покрытия и оборудования, снегового покрова и собственного веса стенки

резервуара. Фундаментное кольцо является абсолютно жестким и опирается на основание со значением коэффициента постели 200 МПа/м^3 . В [3] указано, что железобетонное фундаментное кольцо не получает угловых деформаций с изменением жесткости основания, а лишь испытывает плоскопараллельное вертикальное смещение. Поэтому выбор значения коэффициента постели не влияет на результаты расчетов в рамках предложенной расчетной схемы. Контактное взаимодействие требует назначения контактной пары (contactpair) поверхностей или твердых тел, где один

из объектов – контактный (contact), а другой – целевой (target). Зона контакта фундаментного кольца и грунтового основания, а также контакта центральной части днища и основания задается условием «упругое закрепление» (elasticsupport). Контакты стенки и крайки (manual contact region «surface body to edge»), крайки и фундаментного кольца (manual contact region «surface body to solid»), крайки и фундаментного кольца (manual contact region «surface body to solid»), крайки и центральной части днища (manual contact region «surface body to surface body») моделируются конечными элементами CONTA175 и TARGE170. На рис. 2 представлена расчетная схема.

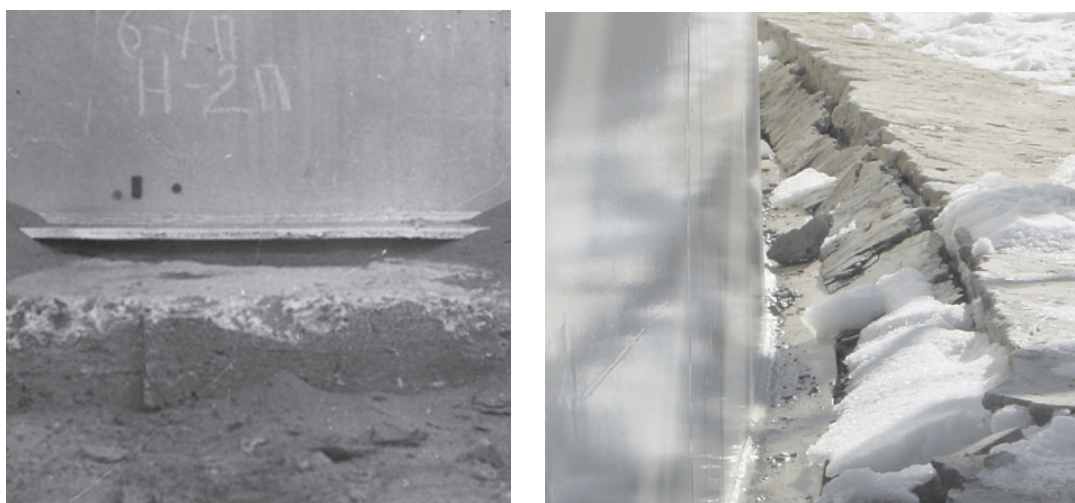


Рис. 1. Примеры недопустимой неравномерной осадки наружного контура днища РВС

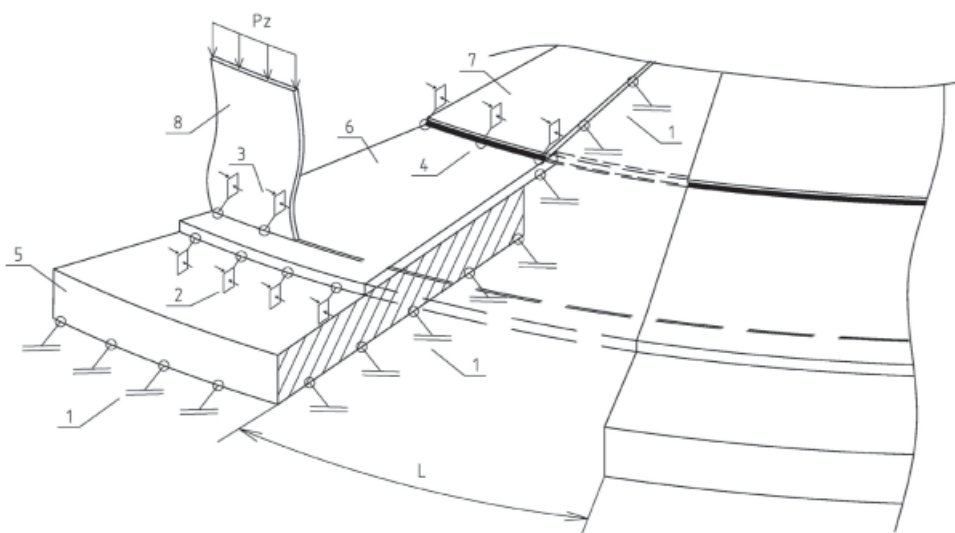


Рис. 2. Расчетная схема:

1 – упругое закрепление «elastic support»; 2 – контакт фундаментного кольца и крайки (manual contact region «surface body to solid»); 3 – контакт листов стенки и крайки (manual contact region «surface body to edge»); 4 – контакт крайки и центральной части днища (manual contact region «surface body to surface body»); 5 – кольцевой фундамент; 6 – крайка; 7 – центральная часть днища; 8 – стенка; P_z – суммарная нагрузка от веса стационарного покрытия и оборудования, снегового покрова и собственного веса стенки резервуара; L – дуговой размер зоны просадки

Геометрическая модель резервуара построена в соответствии со значениями, принятыми в типовом проекте для РВС-20000 (ТП 704-1-60). Радиус резервуара составляет 22,85 м, высота стенки 11,92 м. Толщина стенки для первого пояса – 13 мм, для 2–8 поясов – 11 мм. Листы стенки выравниваются по внутреннему краю. В предлагаемой модели стенка, окрайка, днище, кольцо жесткости представлены оболочечными конечными элементами SHELL181. Кровля моделируется балочными конечными элементами BEAM4 и состоит из 48 двутавров, профиль I35Б1 по ГОСТ 8239-89.

Материал металлоконструкций – сталь конструкционная низколегированная 09Г2С с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 300$ МПа.

Рассмотрим 3 случая деформирования стенки РВС-20000 вследствие действия нагрузок, обусловленных неравномерной осадкой фундаментного кольца резервуара. В первом случае рассмотрим деформацию стенки резервуара без кольца жесткости и стационарной крыши. Во втором – с кольцом жесткости. В третьем – со стационарной крышей и кольцом жесткости. Неравномерная осадка резервуара моделируется путем вырезки сегмента фундаментного кольца размером L (рис. 3).

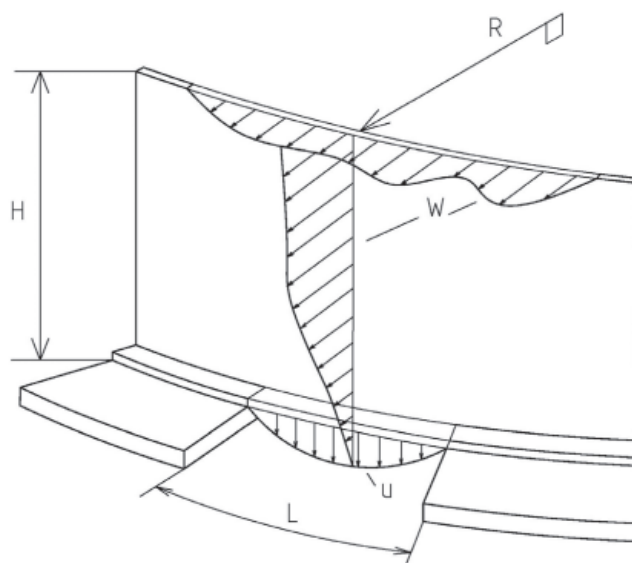


Рис. 3. Схема нагружения оболочек:

L – дуговой размер зоны просадки; R – радиус резервуара; H – высота резервуара; W – радиальные перемещения стенки; u – вертикальные перемещения стенки и окрайки

Автором предлагается расчет НДС резервуара при значениях $n = 2...6$.

Для удобства представления результатов расчетов предлагается использовать безразмерный, принятый в теории оболочек параметр n , который учитывает размер зоны нагружения (осадки резервуара):

$$n = \pi R / L, \quad (1)$$

где L – дуговой размер зоны просадки; R – радиус резервуара.

В табл. 1 представлена схема планирования эксперимента. Опыт предполагает наличие двух факторов. Первым фактором (a) является геометрическая модель резервуара с тремя комбинациями: без кольца жесткости и стационарной крыши (a_1), с кольцом жесткости без стационарной крыши (a_2), с кольцом жесткости и стационарной крышей (a_3). Вторым фактором (b) является значение коэффициента n , при

этом автором предлагается 5 возможных комбинаций: $n = 2$ (b_1), $n = 3$ (b_2), $n = 4$ (b_3), $n = 5$ (b_4), $n = 6$ (b_5).

Таблица 1

| | | Фактор b | | | | |
|------------|-----|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | I | II | III | IV | V |
| Фактор a | I | $a_1 b_1$ | $a_1 b_2$ | $a_1 b_3$ | $a_1 b_4$ | $a_1 b_5$ |
| | II | $a_2 b_1$ | $a_2 b_2$ | $a_2 b_3$ | $a_2 b_4$ | $a_2 b_5$ |
| | III | $a_3 b_1$ | $a_3 b_2$ | $a_3 b_3$ | $a_3 b_4$ | $a_3 b_5$ |

На рис. 4 изображена эпюра перемещений конструкций резервуара в случае $a_3 b_1$ (с учетом кольца жесткости и стационарной крыши). Обозначена зона наибольших перемещений балок, которая находится над просадочной зоной.

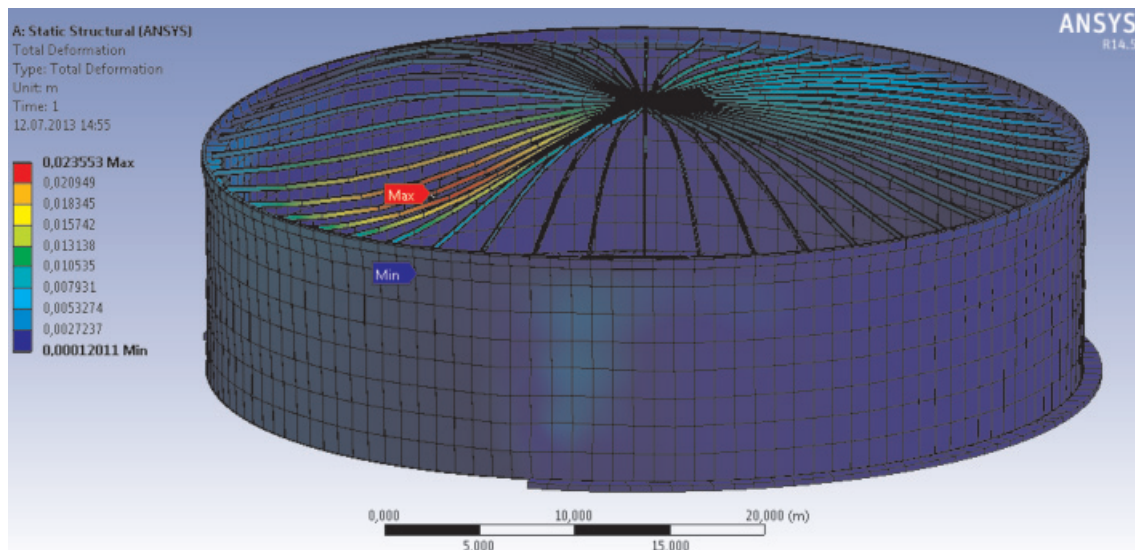


Рис. 4. Эюра перемещений конструкций РВС

Для РВС-20000 зависимость безразмерного параметра n от величины зоны просадки будет выглядеть следующим образом (табл. 2):

Таблица 2

| n | L , дуговой размер зоны просадки | |
|-----|------------------------------------|-------------------------------|
| | м | рад |
| 2 | 36,11 | $(1/2)\pi R \approx 90^\circ$ |
| 3 | 24,07 | $(1/3)\pi R \approx 60^\circ$ |
| 4 | 18,05 | $(1/4)\pi R \approx 45^\circ$ |
| 5 | 14,44 | $(1/5)\pi R \approx 35^\circ$ |
| 6 | 12,03 | $(1/6)\pi R \approx 30^\circ$ |

В табл. 3 приведены результаты вертикальных, радиальных перемещений стенки резервуара в трех рассматриваемых случаях, а также максимальные эквивалентные напряжения. Максимальные радиальные перемещения (а также эквивалентные напряжения) стенки во всех случаях достигаются на максимальной высоте $h = 11,92$ м, причем точка наибольшего отклонения лежит на образующей, проходящей через середину вырезанного сегмента. Наибольшие вертикальные перемещения достигаются в уторном шве посередине вырезанного сегмента.

Таблица 3

| n | Без кольца жесткости и стационарной крыши | | | С кольцом жесткости без стационарной крыши | | | Со стационарной крышей и кольцом жесткости | | |
|-----|---|----------|---|--|----------|---|--|----------|---|
| | W , мм | u , мм | Мах $\sigma_{\text{экв}}$ по Фон-Мизесу | W , мм | u , мм | Мах $\sigma_{\text{экв}}$ по Фон-Мизесу | W , мм | u , мм | Мах $\sigma_{\text{экв}}$ по Фон-Мизесу |
| 2 | 594 | 142,6 | 195 | 10,86 | 5,21 | 40,3 | 5,67 | 3,22 | 28,8 |
| 3 | 658 | 84,8 | 138,8 | 4,91 | 1,97 | 22,5 | 3,51 | 1,56 | 23,67 |
| 4 | 366 | 29,4 | 88,3 | 2,86 | 1,15 | 20,6 | 2,47 | 1,06 | 20,29 |
| 5 | 136 | 8,26 | 39,5 | 1,38 | 0,64 | 20 | 1,84 | 0,66 | 17,12 |
| 6 | 91 | 5,02 | 26,8 | 1,09 | 0,55 | 19,8 | 1,7 | 0,58 | 16,55 |

Выводы

– Получены результаты расчета НДС вертикального стального резервуара при неравномерных осадках наружного контура днища с учетом жесткости таких конструктивных элементов, как кольцо жесткости, окрайка, центральная часть днища, кровля. Авторами учтена физическая и геометрическая нелинейность модели.

– В случае отсутствия кольца жесткости и стационарной кровли максимальные

прогибы составляют 658 мм в радиальном направлении и 142,6 мм в вертикальном направлении. При учёте кольца жесткости максимальные значения радиальных прогибов уменьшаются в 60 раз, а вертикальных – в 40 раз. При учете стационарной крыши и кольца жесткости значения радиальных прогибов уменьшаются в 120 раз, а вертикальных – в 50 раз, при этом замечены относительно большие перемещения балок кровли над просадочной зоной (до 25 мм в вертикальном направлении).

– Наличие кольца жесткости и стационарной крыши обеспечивают наименьшие значения вертикальных и горизонтальных перемещений. Даже при значении $n = 2$ значения радиальных прогибов не превышают бмм, а вертикальных – 4 мм. Таким образом, для получения адекватных результатов при расчете влияния неосесимметричных нагрузжений на НДС резервуара необходимо учитывать приведенные выше элементы в расчетной схеме.

– Предложенная авторами модель позволяет в неосесимметричной постановке моделировать различные случаи неравномерной осадки с учетом конкретных технико-эксплуатационных условий.

– Возникает вопрос об изменении подходов к диагностике, а именно об ужесточении требований к техническому состоянию кольца жесткости и стационарной крыши, жесткость и геометрические характеристики которых значительно влияют на надежность конструкции всего резервуара в целом.

Список литературы

1. Слепнев И.В. Напряженно-деформированное упруго-пластическое состояние стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при неравномерных осадках оснований: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1988. – 228 с.
2. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... д-ра. техн. наук. – Тюмень, 1999. – 254 с.
3. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние вертикальных стальных резервуаров при ремонтных работах. – М.: ОАО Изд-во «Недра», 1999. – 271 с.
4. Тарасенко А.А. Результаты статистической обработки измерений неравномерных осадок наружного контура днища вертикальных стальных резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – 1999. – № 1. – С. 92.
5. Хоперский Г.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния стенки резервуара при неравномерных осадках основания. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1998. – 197 с.
6. Хоперский Г.Г. Тарасенко А.А., Овчар З.Н., Николаев Н.В. Определение неравномерной составляющей осадки резервуаров, вызывающей неосесимметричную деформацию // Известия вузов «Нефть и газ». – 1997. – № 5. – С. 104.
7. Хоперский Г.Г. Тарасенко А.А. Экспериментальное исследование деформаций стенки резервуара при неравномерных осадках оснований // Известия вузов «Нефть и газ». – 1997. – № 6. – Тюмень. С. 12.
8. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Построение конечно-элементной модели резервуара в программном комплексе ANSYS // Т1. Нефть и газ Западной Сибири: тезисы докл. Междунар. конф. – Тюмень, 2013. – С. 21–25.

References

1. Slepnev I.V. Naprjazhenno-deformirovannoe uprugoplasticheskoe sostojanie stal'nyh vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov pri neravnomernyh osadkah osnovanija. Diss. kand. tehn. nauk [Stress-strain elastic-plastic state steel vertical cylindrical tanks with irregular settlement base. Candidate technical sciences dissertation]. Moscow, MISI im. V.V. Kujbysheva, 1988. 228 p.
2. Tarasenko A.A. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie krupnogabaritnyh rezervuarov pri remontnyh rabotah: dis. dokt. tehn. nauk [Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Doctor technical sciences dissertation]. Tyumen, 1999. 254 p.
3. Tarasenko A.A. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov pri remontnyh rabotah [Stress-strained state of storage steel tanks during repairs]. Moscow. OAO Izdatel'stvo «Nedra». 1999. 271 p.
4. Tarasenko A.A. Rezul'taty statisticheskoy obrabotki izmerenij neravnomernyh osadok naruzhnogo kontura dnishha vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov [The results of the statistical analysis of the measurements of differential settlement outer contour of the bottom vertical steel tanks] Tyumen: Izvestija vuzov. 1999. no. 1. pp. 92.
5. Hoperskiy G.G. Issledovanie napryajenno-deformirovannogo sostoyaniya stenki rezervuara pri neravnomernih osadkah osnovaniya: dis. cand. tehn. nauk [Stress-strained state of storage steel tanks with differential settlements of outer counter of the bottom. Doctor technical sciences dissertation]. Tyumen, 1998. 197 p.
6. Hoperskiy G.G. Tarasenko A.A., Ovchar Z.N., Nikolaev N.V. Opredelenie neravnomernoj sostavljajushhej osadki rezervuarov, vyzyvajushhej neosesimmetrichnuju deformaciju [The definition of non-uniform component of precipitation of oil steel storage tanks, causing non-axisymmetric deformation] Tyumen: Izvestija vuzov. 1997. no. 5. pp. 104.
7. Hoperskiy G.G. Tarasenko A.A. Jeksperimental'noe issledovanie deformacij stenki rezervuara pri neravnomernyh osadkah osnovanij [Experimental study of the tank walls deformation at non-uniform sediments of foundations] Tyumen: Izvestija vuzov. 1997. no. 6. pp. 12.
8. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvjashhennoj 50-letiju Tjumenskogo industrial'nogo instituta. T.1 «Nef't' i gaz Zapadnoj Sibiri» [International scientific conference «Oil and gas of West Siberia»]. Tyumen, 2013, pp. 21–25.

Рецензенты:

Обухов А.Г., д.ф-м.н., профессор кафедры «Высшая математика», 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», Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 05.12.2013.