

УДК 621.642.39.03

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ КРЫШИ КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕЗЕРВУАРА ПРИ НЕРАВНОМЕРНЫХ ОСАДКАХ ОСНОВАНИЯ

Тарасенко А.А., Чепур П.В.

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

Разработана уточненная численная модель верхнего узла резервуара РВС-20000, отражающая реальные проектные геометрические и конструкционные параметры металлоконструкций кровли: опорного кольца, листов и балочного каркаса. Создана численная модель при помощи программных модулей продукта ANSYS, реализующего метод конечных элементов: EngineeringData, DesignModeller, StaticStructure. Установлены зоны деформирования металлоконструкций кровли РВС-20000 при различных величинах просадочной зоны: от 18 до 72 м по наружному контуру днища. Получены зависимости величин деформаций металлоконструкций стационарного покрытия от величины просадочной зоны для трех различных расчетных схем: с учетом несущих балок кровли, с учетом несущих и промежуточных балок кровли, с учетом всего каркаса и листов настила кровли. В модели получены значения деформаций кровли для трех типов расчетных схем: с несущими балками кровли, с несущими и промежуточными балками кровли, с балочным каркасом и листовым настилом. Авторами даны рекомендации по ужесточению требований действующей нормативно-технической документации (НТД) в части диагностики и оценки технического состояния конструкций кровли при обнаружении неравномерных осадок наружного контура днища.

**Ключевые слова:** резервуар, РВС, НДС, основание, фундамент, МКЭ, стационарное покрытие

## EXPLORATION OF STRAIN IN ROOF TANK WITH DIFFERENTIAL SETTLEMENTS OF FOUNDATION

Tarasenko A.A., Chepur P.V.

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

Developed a refined numerical model of the upper reservoir unit RVS-20000, which reflects the actual design geometric and structural parameters of metal roofing: a support ring, sheets and beam frame. A numerical model using the software modules of the product ANSYS, implementing the finite element method: EngineeringData, DesignModeller, StaticStructure. Established zones of deformation of metal roofing RVS-20000 at different values of subsidence zones from 18 to 72 m along the outer contour of the bottom. The dependences of the steady-state values of deformations of metal coating on the magnitude of subsidence zone for three different design schemes: with the support beams of the roof, with the bearing and intermediate beams of the roof, taking into account all the frame and roof decking sheets. In the model, the values of deformation of the roof for the three types of design models: with supporting beams of the roof, with bearing and intermediate beams of the roof, with beam frame and sheet flooring. The authors give recommendations for stricter enforcement of existing documentation in terms of diagnosis and evaluation of the technical state of the structures of the roof when it detects irregular outer contour of the bottom sediment.

**Keywords:** tank, aboveground tank, stress-strain state, base, foundation, FEM, roof

Исследованиям изменения напряженно-деформированного состояния крупногабаритных вертикальных стальных резервуаров (РВС) при неравномерных осадках основания посвящены работы [5–8, 11–13]. В большей части исследований рассматриваются вопросы деформирования оболочечной конструкции стенки РВС, при этом вносятся значительные упрощения и допущения, касающиеся учёта металлоконструкций кровли резервуара: кольца жесткости, балок и настила кровли. Использование численных методов позволяет создать модель, геометрия которой будет максимально приближена к реальным параметрам сооружения. В работе [6] с помощью применения методов конечно-элементного анализа, реализованных в программном пакете ANSYS, установлено, что при неосесимметричном

нагрузении РВС значения параметров НДС конструкции могут отличаться на 2 порядка для расчетных схем, учитывающих и не учитывающих особенности геометрии кровли.

В данной работе авторами предлагается исследовать деформационные свойства стационарной крыши резервуара при неравномерных осадках. Величину просадочной зоны планируется задавать при помощи безразмерного параметра  $n$  в соответствии с [14]. Также предполагается рассмотреть 3 различные расчетные схемы РВС, отличающиеся только геометрической конструкцией кровли:

- кровля моделируется только несущими балками без промежуточных балок-связей;
- кровля моделируется несущими и промежуточными балками-связями;
- кровля моделируется несущими и промежуточными балками-связями, а также

листовым настилом, имеющим контактное взаимодействие с несущими балками.

По данным [2] известны случаи эксплуатации резервуаров со следующими отклонениями в конструкции покрытия:

- нарушение, повреждение узлов и соединений балок-связей с несущими балками;
- выпучивание листов настила с повреждением контактного узла «балка – лист»;
- ненормативное состояние узла сопряжения опорного кольца и балочного каркаса.

Исследования [5] позволили определить подходы к исследованию деформаций стационарной крыши при неравномерных осадках. Резервуар РВС-20000 является сооружением с относительно большой конечной жесткостью, поэтому для получения адекватных зависимостей деформаций крыши от величины неравномерной осадки предлагается рассматривать модель резервуара при величинах просадочной зоны от  $n = 4$  до  $n = 1$  (18–72 м).

Авторами предлагается следующая расчетная схема:

- геометрическая модель создается по типовому проекту РВС-20000, ТП-704-1-60,

в модели учитываются: стенка, днище, окрайка, кольцо жесткости, листовой и балочный настил;

- граничные условия определяются упругим контактным взаимодействием фундаментного кольца с грунтовым основанием, заданным с помощью коэффициента просадочной зоны моделируется вырезкой сегмента фундаментного кольца, создается полное провисание окрайки над грунтовым массивом;

- прикладываются все эксплуатационные нагрузки в соответствии с [8] (ветровая, снеговая, избыточное давление, вакуум) – кроме гидростатической;

- контакты металлоконструкций моделируются как «связанные» – bonded, исключая взаимное проникновение и разделение.

В общем случае при осадках наружного контура днища характер деформирования металлоконструкций стационарной кровли соответствует следующей схеме (рис. 1). При этом образуются 3 основные зоны: 1-я – центральная, зона проседания конструкций, 2-я и 3-я зоны выпирания конструкций, расположенные по краям относительно просадочной зоны.

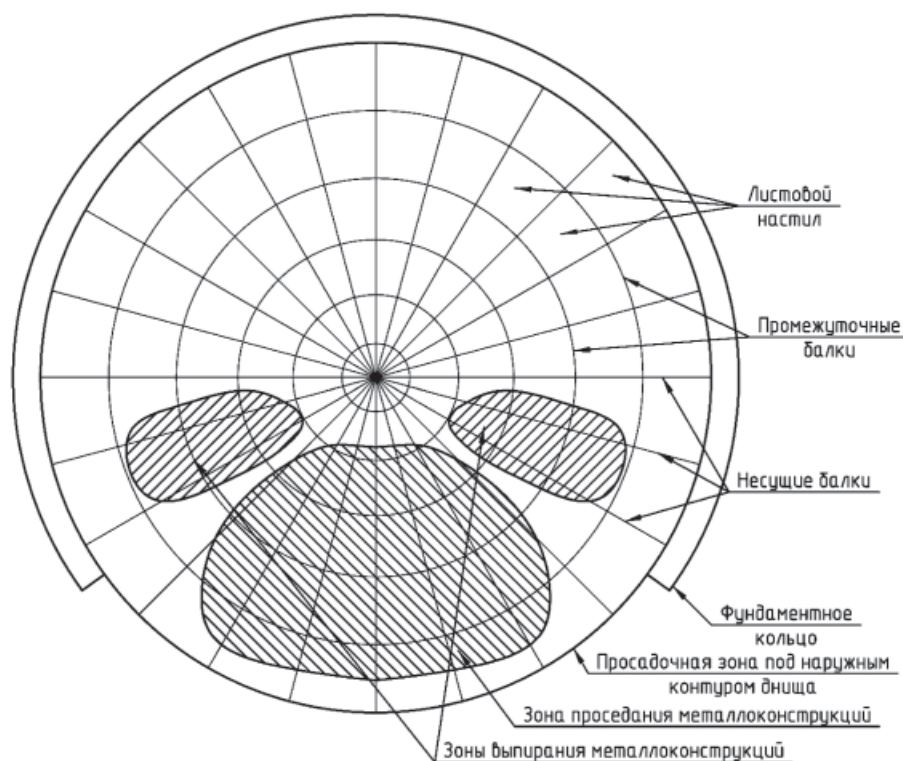


Рис. 1. Зоны деформирования металлоконструкций кровли РВС-20000

Всего выполнено 12 расчетов: для 3-х расчетных схем (с различной геометрией кровли) рассмотрены 4 варианта осадки –  $n = 1, n = 2, n = 3, n = 4$ .

Для получения зависимостей параметров напряженно-деформированного состояния металлоконструкций кровли от величины просадочной зоны была выполнена

постпроцессинговая обработка результатов конечно-элементного силового анализа. На рис. 2–4 представлены эпюры деформаций

конструкций РВС для трех рассматриваемых расчетных схем. Для визуализации использован масштабный коэффициент  $\times 20$ .

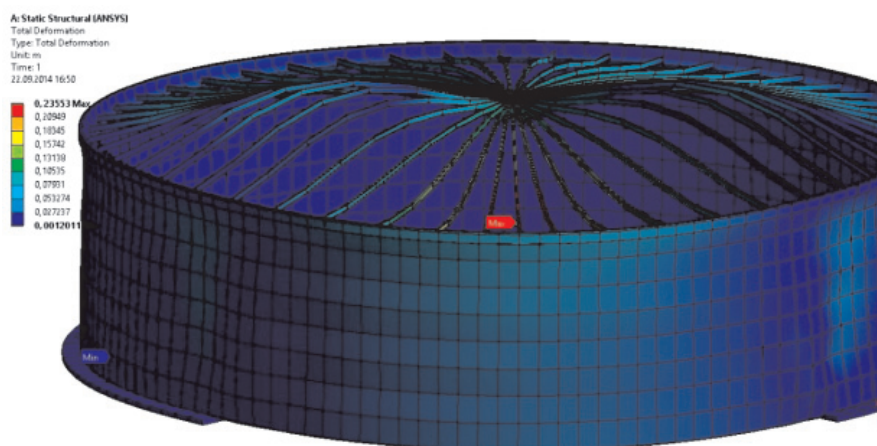


Рис. 2. Деформации металлоконструкций для расчетной схемы с несущими балками кровли и величиной просадочной зоны  $n = 2$

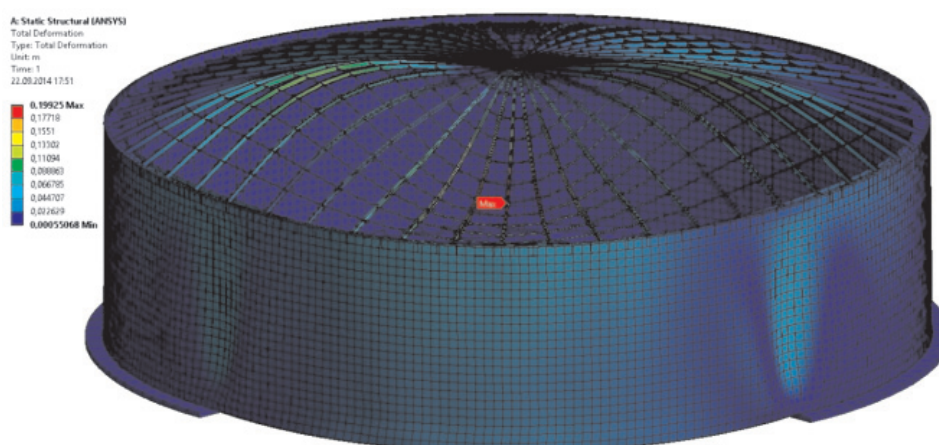


Рис. 3. Деформации металлоконструкций для расчетной схемы с несущими и промежуточными балками кровли величиной просадочной зоны  $n = 2$

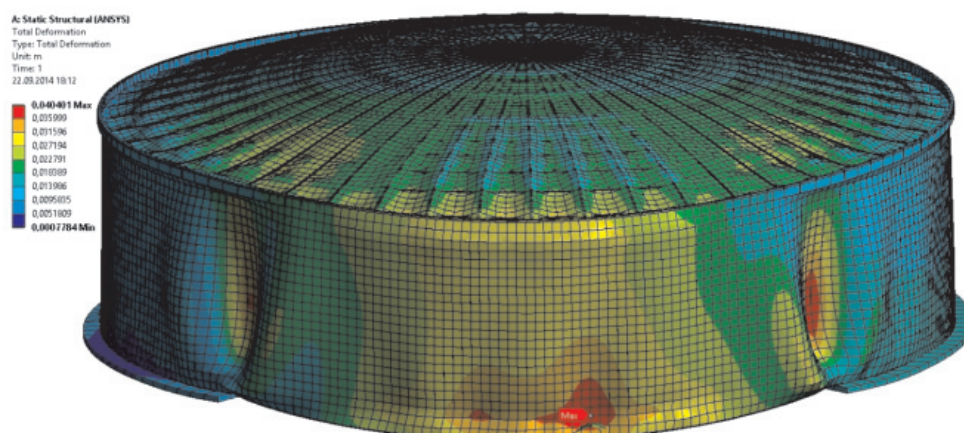


Рис. 4. Деформации металлоконструкций для расчетной схемы с балочными и листовыми конструкциями кровли величиной просадочной зоны  $n = 2$



Анализируя деформации металлоконструкций кровли РВС для различных расчетных схем, выявили, что совместная работа балочных и оболочечных элементов кровли обеспечивает высокие параметры жесткости конструкции. При том, что листы настила имеют толщину всего 4 мм, их жесткое соединение с балочным кар-

касом уменьшает прогибы балок до 5 раз при появлении просадочных зон. На рис. 5 представлены зависимости максимальных перемещений несущих балок от величины просадочной зоны, полученные по результатам численного моделирования в программе ANSYS. Графики построены для трех рассматриваемых расчетных схем.

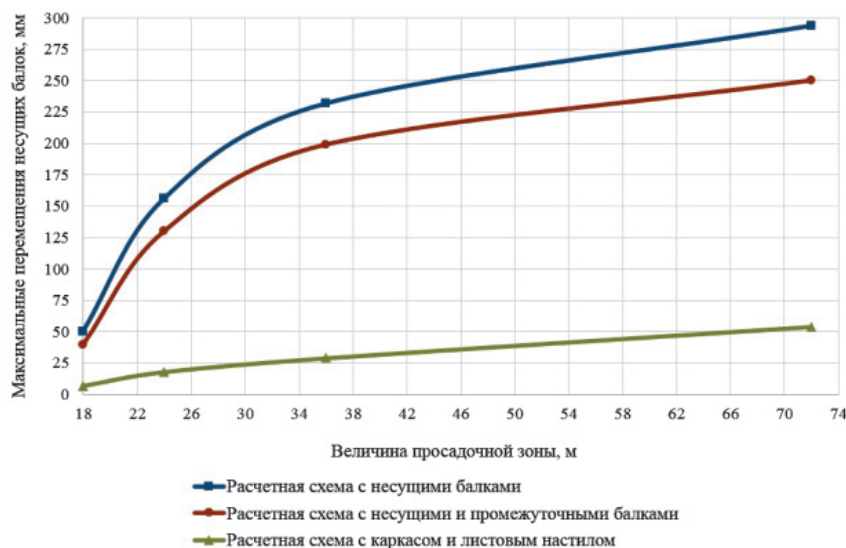


Рис. 5. Зависимости максимальных перемещений несущих балок от величины просадочной зоны для различных расчетных схем конструкции кровли

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для получения достоверных значений уровня НДС конструкций резервуара в случае неосесимметричного нагружения при конечно-элементном анализе необходимо учитывать не только балочный каркас, но и листовые элементы. С другой стороны, необходимо разрабатывать новые подходы к диагностике и проверке технического состояния металлоконструкций стационарной кровли, т.к. только совместная работа балочных и оболочечных элементов обеспечивает эксплуатационную надежность всей конструкции кровли, что особенно проявляется при неосесимметричных нагрузках.

Наиболее опасными участками верхнего узла РВС являются узлы сопряжения балочного каркаса с опорным кольцом. Большое количество сварных соединений, обеспечивающих жесткий контакт оболочки – кольца жесткости и пространственных несущих балок – испытывают нагрузки, которые могут привести к возникновению предельных состояний в металле. При моделировании неравномерной осадки РВС-20000 установлены участки с высокими концентрациями напряжений, значения которых превышают 300 МПа. Такие напряжения возникают в металлических монтажных пластинах, соединяющих несущие балки кровли и опор-

ное кольцо. При действии неосесимметричных нагрузок на корпус резервуара опорное кольцо и балочный каркас испытывают изгибные напряжения, однако их пространственные схемы деформирования не лежат в одной плоскости: конструкции кровли перемещаются вдоль вертикальной оси РВС, а деформирование кольца жесткости характеризуется кручением относительно стыкового соединения со стенкой на 8 поясе. Поэтому оценка технического состояния конструктивных элементов верхнего узла РВС – кровли, опорного кольца, стенки и их сварных соединений должна быть обязательной, в особенности при выявлении неравномерных осадок наружного контура днища резервуара.

### Выводы

1. Разработана уточненная численная модель верхнего узла резервуара РВС-20000, отражающая реальные проектные геометрические и конструкционные параметры металлоконструкций кровли: опорного кольца, листов и балочного каркаса. Численная модель создана при помощи программных модулей продукта ANSYS, реализующего метод конечных элементов: EngineeringData, DesignModeller, StaticStructure.

2. Установлены зоны деформирования металлоконструкций кровли РВС-20000 при различных величинах просадочной зоны: от 18 до 72 м по наружному контуру днища.

3. Получены зависимости величин деформаций металлоконструкций стационарного покрытия от величины просадочной зоны для трех различных расчетных схем: с учетом несущих балок кровли, с учетом несущих и промежуточных балок кровли, с учетом всего каркаса и листов настила кровли. Наименьшие деформации получены в модели с каркасом и листовым настилом – от 7 до 54 мм (для просадочных зон от 18 до 72 м). Наибольшие деформации получены в модели, учитывающей только несущие балки – от 50 до 294 мм (для просадочных зон от 18 до 72 м).

4. Авторами рекомендуется ужесточить требования действующей НТД в части диагностики и оценки технического состояния конструкций кровли при обнаружении неравномерных осадок наружного контура днища.

#### Список литературы

1. 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.
2. Тарасенко А.А., Саяпин М.В. Результаты статистической обработки измерений неравномерных осадок наружного контура днища вертикальных стальных резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1999. – № 1. – С. 52–56.
3. Тарасенко А.А., Турин Д.В. Моделирование нефтяных стальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 2001. – № 4. – С. 65–69.
4. 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.
5. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Деформирование верхнего края оболочки при развитии неравномерных осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–3. – С. 485–489.
6. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3409–3413.
7. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Обоснование необходимости учета истории нагружения конструкции при ремонте фундамента с подъемом резервуара // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 60–63.
8. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В., Тарасенко Д.А. Модель резервуара в среде ANSYS Workbench 14.5 // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3404–3408.
9. Тиханов Е.А., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Оценка экономической эффективности капитального ремонта основания вертикального стального резервуара методом перемещения // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–2. – С. 330–334.
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. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–7. – С. 1560–1564.
13. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Методика определения необходимости ремонта резервуара при осадках основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–6. – С. 1336–1340.
14. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Тарасенко Д.А. Исследование влияния величины выступа окрайки на напряженно-деформированное состояние вертикального стального цилиндрического резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3441–3445.
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. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Sajapin M.V. Izvestijavuzov.Neft'igaz. 1998, no. 1, pp. 59–68.
2. Tarasenko A.A., Sajapin M.V. Izvestijavuzov.Neft'igaz. 1999, no. 1, pp. 52–56.
3. Tarasenko A.A., Turin D.V. Izvestijavuzov.Neft'igaz. 2001, no. 4, pp. 65–69.
4. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Kuzovnikov E.V., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2014, no. 9–7, pp. 1471–1476.
5. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2014, no. 6–3, pp. 485–489.
6. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. Fundamental research, 2013, no. 10–15, pp. 3409–3413.
7. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. Bezopasnost-trudavpromyshlennosti, 2014, no.5, pp. 60–63.
8. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2013, no. 10–15, pp. 3404–3408.
9. Tihanov E.A., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Fundamental research, 2014, no. 6–2, pp. 330–334.
10. Tarasenko M.A., Sil'nitskiy P.F., Tarasenko A.A. Izvestijavuzov. 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. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Fundamental research, 2014, no. 8–7, pp. 1560–1564.
13. Chepur P.V., Tarasenko A.A. Fundamental research, 2014, no. 8–6, pp. 1336–1340.
14. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2013, no. 10–15, pp. 3441–3445.
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 06.10.2014.