

УДК 621.642.39.03-025.71

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА С УСИЛИВАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ ЕГО ПОДЪЕМЕ ГИДРОДОМКРАТАМИ

¹Чирков С.В., ²Тарасенко А.А., ²Чепур П.В.¹ОАО «Гипротрубопровод», Москва, e-mail: chirkov0210@mail.ru;²ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com; chepur@me.com

В статье рассмотрен вопрос создания конечно-элементной модели резервуара РВС-20000 при его подъеме гидродомкратами. Предложена расчетная схема для случая равномерного подъема резервуара на величину 100 мм. Смоделированы дополнительные усиливающие металлоконструкции РВС для подъема: вертикальные рамы жесткости, усиливающее кольцо жесткости, косынки и подкосы для предотвращения возникновения предельных деформаций. Определена величина усилия от 1 гидродомкрата при равномерном подъеме РВС-20000 на величину 100 мм. Выполнен расчет НДС резервуара при равномерном подъеме всего корпуса РВС. Установлены участки с максимальными напряжениями, проанализированы действующие эквивалентные напряжения в различных конструкциях РВС. Доказано, что полученная модель может быть использована в качестве расчетно-теоретической основы для создания методики оценки НДС резервуара при подъемных операциях. При этом модель позволяет производить расчет в неосесимметричной постановке с различными величинами приложения нагрузки от гидродомкратов, например при исправлении крена или неравномерной осадки резервуара.

Ключевые слова: резервуар, подъем резервуара, ремонт фундамента, ANSYS, МКЭ, РВС, модель резервуара, НДС

FINITE ELEMENT MODEL OF VERTICAL STEEL STORAGE TANK WITH REINFORCING ELEMENTS FOR LIFTING WITH HYDRAULIC JACKS

¹Chirkov S.V., ²Tarasenko A.A., ²Chepur P.V.¹Giprotruboprovod, Moscow, e-mail: chirkov0210@mail.ru;²Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com; chepur@me.com

In the article the question of creating a finite element model of the tank RVS-20000 with its hydraulic jacks. Proposed a design scheme for the case of uniform lifting the tank to the value of 100 mm. Modeled additional reinforcing metal RVS for head: vertical frame stiffness, rigidity reinforcing ring, scarves and struts to prevent the occurrence of limit strains. The magnitude of the efforts of one hydraulic jack with a uniform rise of RVS-20000 to the value of 100 mm. The calculation of the stress-strain state rise tank with uniform whole body of RVS. Established areas with maximum voltage analyze current equivalent stress in various designs RVS. It is proved that the resulting model can be used as of the theoretical basis for a methodology for assessing stress-strain state tank with lifting operations. In this model allows the calculation of a non-axisymmetric formulation with different values of load application of hydraulic jacks, for example, when correcting roll or irregular precipitation tank.

Keywords: aboveground oil tank, tank lifting, ANSYS, FEM, RVS, tank model, stress-strain state

Вертикальные стальные резервуары (РВС) для хранения товарной нефти являются неотъемлемым звеном в технологической цепочке магистрального трубопроводного транспорта. Резервуар с момента строительства и сдачи в эксплуатацию испытывает неосесимметричные нагрузки, которые часто не предусмотрены проектом, например вызванные неидеальным фундаментом, работой приемо-раздаточных устройств, действием неравномерно распределенной ветровой и снеговой нагрузки и др. Наиболее опасным случаем неосесимметричного нагружения является неравномерная осадка РВС [4–6, 13]. Причинами развития неравномерной осадки могут быть: ошибки в проектировании, брак строительного-монтажных работ, изменение гидрологических условий на площадке эксплуатируемого РВС. Нередко на определенных этапах эксплуатации резервуа-

ра возникает необходимость исправления проектного положения наружного контура днища резервуара, что нашло отражение как в нормативно-технической документации, так и в научных исследованиях [10]. Другой важной задачей является возможность поднять или переместить резервуар при ремонте его фундамента. Для исправления проектного положения наружного контура днища РВС используют способ подъема РВС с применением системы гидродомкратов. Существует проблема оценки напряженно-деформированного состояния конструкций резервуара при подъеме [2–3, 12, 14]. Во-первых, не всегда известна достоверная история нагружения, т.е. не велись или утеряны многолетние наблюдения за развитием осадки [7], что не позволяет точно вычислить массив точек высотных отметок для подъема. Во-вторых, в отечественной практике усилия от домкратов не

всегда синхронизируются, что также вызывает изменение общего НДС конструкции.

Для того чтобы исследовать сформулированные актуальные вопросы изменения НДС резервуара при подъемных операциях, авторами предлагается воспользоваться численными методами [1, 8] для создания максимально реалистичной модели наиболее распространенного резервуара РВС-20000. Программный комплекс ANSYS, реализующий метод конечных элементов, выбран в качестве инструмента для создания модели.

Для создания адекватной модели была составлена расчетная схема, в которой авторы учли максимальное количество элементов металлоконструкций. Предлагаемая расчетная схема включает в себя действие неравномерно распределенной снеговой нагрузки по стационарному покрытию, ветровой нагрузки по стенке, веса стационарного оборудования. Величины нагрузок приняты в соответствии с действующей НТД для

самых невыгодных условий. В геометрической модели учитываются реальные размеры и конструктивные особенности основных элементов РВС-20000 по типовому проекту 704-1-60: оболочечная конструкция стенки, листового настила кровли, опорного кольца жесткости; балочная конструкция каркаса кровли. Также для рассматриваемого случая подъема РВС смоделированы усиливающие конструкции в соответствии с реальным рабочим проектом: вертикальные рамы жесткости с приварными пластинами для крепления к стенке, дополнительное усиливающее кольцо жесткости на 4 поясе РВС, усиливающие элементы окрайки – косынки и подкосы.

На рис. 1 представлена расчетная схема, на которой приведены действующие нагрузки, граничные условия, основные конструктивные элементы резервуара, подготовленного к подъему. На рис. 2–4 укрупненно приведены основные узлы элементов РВС-20000.

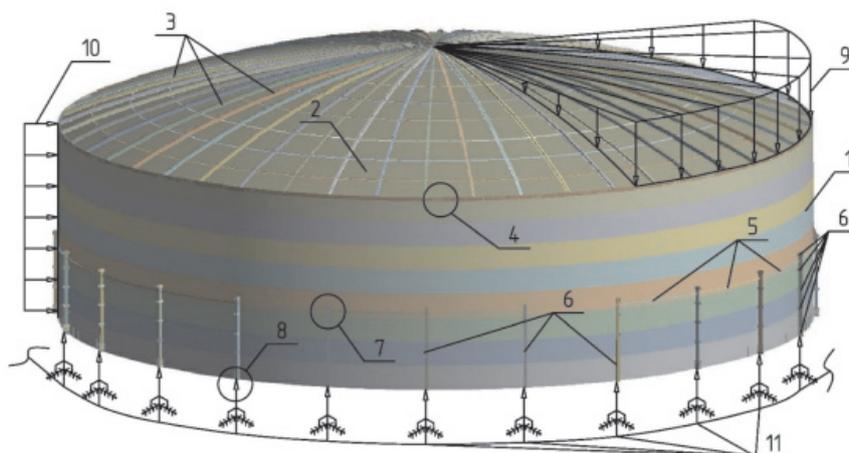


Рис. 1. Расчетная схема РВС-20000 при подъеме:

1 – стенка; 2 – настил кровли; 3 – продольные и поперечные балки настила кровли (изображены для визуализации, балки находятся под настилом кровли); 4 – опорное кольцо; 5 – усиливающее (дополнительное) кольцо жесткости; 6 – вертикальные рамы жесткости под домкраты; 7 – узел сопряжения усиливающего кольца жесткости и вертикальной рамы; 8 – узел приложения нагрузки гидродомкрата; 9 – снеговая нагрузка с учетом «снежных мешков»; 10 – ветровая нагрузка; 11 – заданное перемещение вдоль вертикальной оси Z с ограничением степеней свободы по осям X, Y (лежащим в плоскости, перпендикулярной стенке)

Для назначения граничных условий используется функция заданного перемещения – «displacement». Во время подъема резервуар в 24 узлах опирается на установленные гидродомкраты, которые передают нагрузку на плоскость нижних граней вертикальных рам жесткости прямоугольного профиля (рис. 4). В предложенной авторами расчетной схеме величина заданного перемещения равна 100 мм в вертикальном направлении Z для каждого узла приложения

нагрузки. Свобода перемещения по осям X, Y (лежащим в плоскости, перпендикулярной стенке) полностью ограничена. Сила реактивного отпора на плоскость одного домкрата составляет 191,1 кН в точке конечного подъема РВС балочных (BEAM4, BEAM188), оболочечных (SHELL181, SURF156), твердотельных (SOLID186) и контактных конечных элементов (CONTA175, TARGE170). В статьях [9, 11, 15] подробно представлены этапы построения модели РВС-20000

по типовому проекту 704-1-60 в условиях нормального эксплуатационного состояния (резервуар установлен на фундаментное основание), поэтому авторами предлагается

рассмотреть особенности моделирования усиливающих конструкций для подъема: вертикальной рамы, кольца жесткости, козынок и подкосов окрайки.

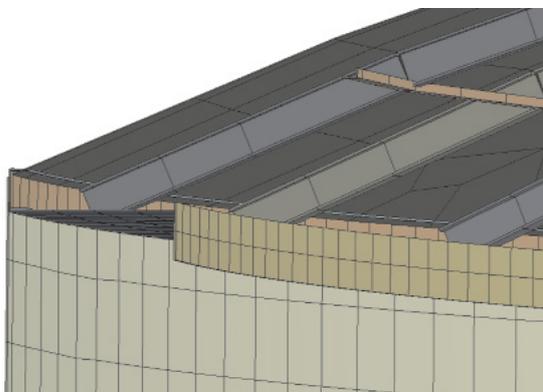


Рис. 2. Узел сопряжения стационарной кровли и кольца жесткости (поз. 4 на рис. 1)

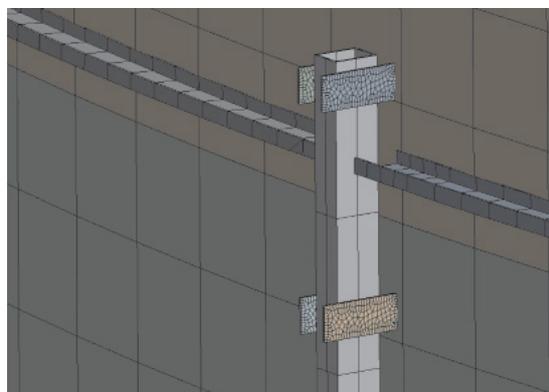


Рис. 3. Узел сопряжения кольца жесткости и вертикальной рамы (поз. 7 на рис. 1)

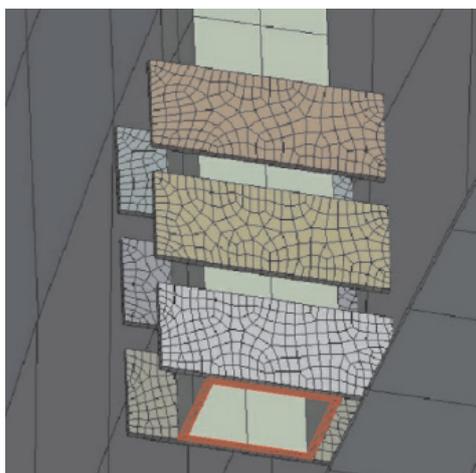
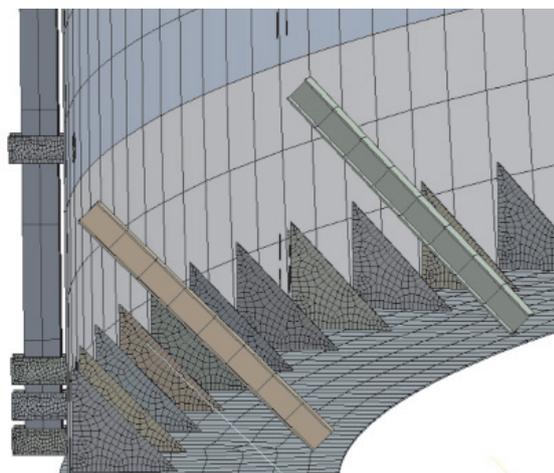


Рис. 4. Узел приложения нагрузки от гидродомкрата (поз. 8 на рис. 1) и усиливающие элементы окрайки



Численная модель резервуара состоит из вертикальной рамки жесткости, которая состоит из профиля прямоугольного сечения и пластин крепления к стенке. Профиль моделируется с использованием конечных элементов SOLID186, а пластины – SHELL181. Физическое взаимодействие пластин, вертикальной рамы и стенки определяется связанным контактом «bonded», моделирующим жесткое соединение сваркой. Аналогичные условия контактного взаимодействия имеют узлы сопряжения оболочечной конструкции усиливающего кольца жесткости и стенки; козынок, стенки и окрайки; а также балочной конструкции подкосов со стенкой и окрайкой. Подкосы, представляющие собой двутавр № 16 длиной 1,5 м моделиру-

ются балочным элементом BEAM188. Для козынок и дополнительного кольца жесткости выбран тип элемента SHELL181.

При разбиении на конечно-элементную сетку авторами заданы ограничения на минимальный и максимальный размер конечных элементов (КЭ). В зависимости от типа конструкции размер КЭ варьируется от 0,05 до 0,3 м.

Постпроцессинговая обработка результатов позволила получить градиенты перемещений, деформаций, эквивалентных напряжений для всех конструкций модели резервуара. Распределение действующих эквивалентных напряжений по Фон – Мизесу для оболочечной конструкции стенки и узла вертикальной рамы в месте взаимодействия с домкратом представлено на рис. 5.

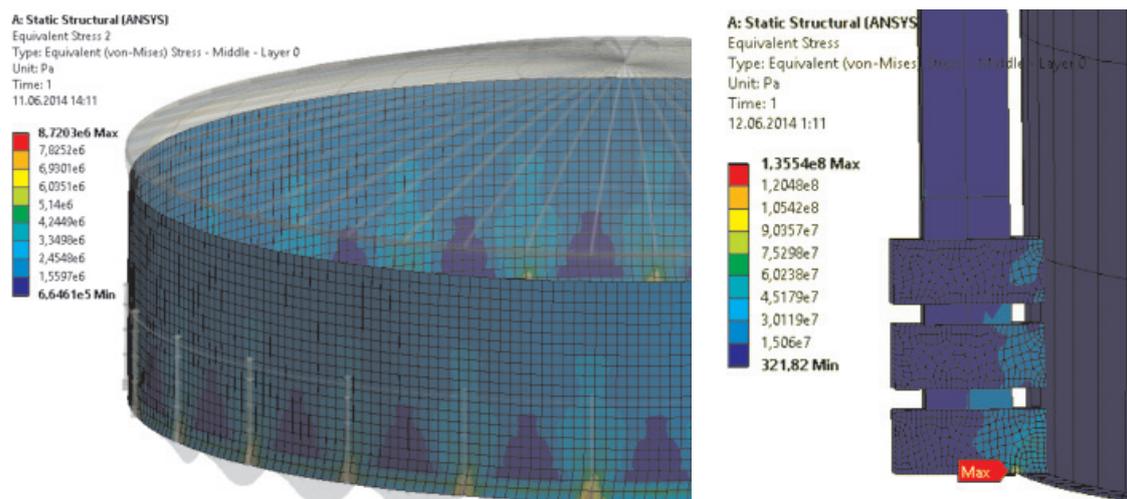


Рис. 5. Действующие эквивалентные напряжения в стенке и конструкциях вертикальной рамы жесткости

Анализ результатов постпроцессинга позволил определить, что наибольшие напряжения (до 140 МПа в нейтральном слое), действующие при подъеме РВС, возникают в нижнем узле вертикальной рамы жесткости, а именно в нижней пластине крепления к стенке и на боковых гранях прямоугольного профиля (в местах приварки к пластинам). В стенке же действующие напряжения не превышают 10 МПа. Это объясняется особенностью приложения нагрузки от гидродомкратов: значительные усилия распределяются неравномерно по усиливающей раме, при этом возникают моменты и изгибные напряжения в нижних пластинах. Это может привести к пластическим деформациям элементов вертикальной рамы в случае неравномерной работы домкратов, что на практике может проявиться при подъеме РВС с целью исправления неравномерной осадки, либо ремонта фундамента.

Выводы

1. Создана конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 для расчета общего НДС конструкции и отдельных элементов при подъемных операциях. В полученной модели учитываются реальные геометрические и конструктивные характеристики как основных элементов (стенки, кровли, окрайки, опорного кольца), так и усиливающих конструкций (вертикальные рамы, косынки, подкосы, дополнительное кольцо жесткости).

2. Расчетная величина усилия на 1 гидродомкрат при равномерном подъеме РВС-20000 на величину 100 мм составила: $F = 191,1$ кН.

3. Определено напряженно-деформированное состояние резервуара при равномерном подъеме корпуса резервуара на 100 мм. Максимальные напряжения возникают в усиливающих элементах РВС, а именно в пластинах крепления вертикальных рам жесткости к стенке – до 145 МПа (рис. 5). При этом действующие эквивалентные напряжения в стенке не превышают 10 МПа.

4. Полученная модель верифицирована методом, описанным в [9, 11], и может быть использована в качестве расчетно-теоретической основы для практического использования при ремонте фундаментов либо исправлении неравномерной осадки, связанной с подъемом резервуара. Предложенная модель использована при опытно-промышленном подъеме РВС-20000 ЛПДС «Торгили» для ремонта фундамента.

Список литературы

1. Семин Е.Е., Тарасенко А.А. Использование программных комплексов при оценке технического состояния и проектирование ремонтов вертикальных стальных резервуаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – М., 2006. – № 4. – С. 84–87.
2. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 1991. – 254 с.
3. Тарасенко А.А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 1999. – 299 с.
4. Тарасенко А.А. Решение контактной задачи об упругом взаимодействии подъемного устройства и стенки резервуара // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1998. – № 6. – С. 59–63.
5. 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.

6. 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.

7. Тарасенко А.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко Д.А. Противоречия в современной нормативно-технической базе при ремонте резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (часть 15). – С. 3400–3403.

8. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Деформирование верхнего края оболочки при развитии неравномерных осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 (часть 3). – С. 485–489.

9. 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 (часть 15). – С. 3409–3413.

10. 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. – М., 2014. – № 5. – С. 60–63.

11. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В., Тарасенко Д.А. Модель резервуара в среде ANSYS Workbench 14.5 // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (часть 15). – С. 3404–3408.

12. Тиханов Е.А., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Оценка экономической эффективности капитального ремонта основания вертикального стального резервуара методом перемещения // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 (часть 2). – С. 330–334.

13. 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.

14. 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.

15. 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 (часть 15). – С. 3441–3445.

References

1. Semin E.E., Tarasenko A.A. *Pipeline transport: theory and practice*, 2006, no. 4, pp. 84–87.

2. Tarasenko A.A. Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Candidate technical sciences dissertation. Tyumen, 1991. 254 p.

3. Tarasenko A.A. Razrabotka nauchnyh osnov metodov remonta vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov: dis. doct. tehn. nauk [Development of scientific bases of methods of repair of vertical steel tanks]. Tyumen, 1999. 299 p.

4. Tarasenko A.A. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1998, no.6, pp. 59–63.

5. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Sajapin M.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1997, no. 3, pp. 75–79.

6. Tarasenko A.A., Sajapin M.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1999, no.1, pp. 52–56.

7. Tarasenko A.A., Sil'nickij P.F., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no. 10 part 15, pp. 3400–3403.

8. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2014, no.6 part 3, pp. 485–489.

9. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Fundamental research*, 2013, no. 10 part 15, pp. 3409–3413.

10. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Bezopasnost' trudovp romyshlennosti*, 2014, no. 5, pp. 60–63.

11. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no.10 part 15, pp. 3404–3408.

12. Tihanov E.A., Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no.6 part 2, pp. 330–334.

13. Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Tarasenko A.A., Nikolaev N.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1997, no.5, pp. 80–85.

14. Hoperskij G.G., Sajapin M.V., Tarasenko A.A. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1998, no.2, pp. 60–64.

15. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no.10 part 15, pp. 3441–3445.

Рецензенты:

Захаров Н.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «САТМ», 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 15.07.2014.