

Экспериментальные исследования влияния расслоений металла на работоспособность трубопроводов

А.Э. Толстов

главный инженер¹

Ekos.tolstov@mail.ru

А.Е. Зорин

д.т.н., главный научный сотрудник²

Zorinae86@rambler.ru

Е.Е. Зорин

д.т.н., профессор кафедры материаловедения³

zenacenter@yandex.ru

¹ООО «Газприбортехнология», Москва, Россия

²ООО «ЭКСИКОМ», Москва, Россия

³Московский политехнический университет, Москва, Россия

В статье представлены результаты проведенной серии натурных испытаний, целью которых являлось изучение влияния расслоений металла труб на работоспособность трубопроводов. Показано, что в случае действия непроектных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации нефтегазопроводов, а также когда возникновение расслоений обусловлено деградацией свойств металла, подобные дефекты могут оказать негативное влияние на сопротивляемость трубопровода разрушению.

Материалы и методы

Исследования проводились на газопроводных трубах различного диаметра. Для нагружения труб совместным действием внутреннего давления и кручения был изготовлен специальный стенд. Для оценки несущей способности трубы с расслоением изготавливалась трубная плеть. Для лабораторных исследований металла труб выполнялась электронная микроскопия.

Ключевые слова

расслоения металла, натурные испытания, старение металла, кручение

Введение

В рамках сопровождения эксплуатации нефтегазопроводов одним из ключевых вопросов, определяющих, с одной стороны, надежность и безопасность данных опасных производственных объектов, а с другой — эффективность их обслуживания, являются нормы оценки качества труб с дефектами. Как правило, принятию подобных норм предшествуют многочисленные экспериментальные и аналитические исследования, в рамках которых изучается поведение той или иной группы дефектов под действием различных нагрузок и факторов, характерных для рассматриваемой конструкции.

Указанный подход в полной мере был реализован применительно к таким группам дефектов, как «потеря металла», «трещины» и «вмятины», что привело к принятию достаточно обоснованных и справедливых норм оценки качества труб с указанными повреждениями [1].

Однако, для дефектов типа «расслоение металла» ситуация несколько иная. Образование подобных дефектов является достаточно распространенным явлением не только на стадии производства трубной продукции, но и на этапе эксплуатации нефтегазопроводов. Так, в частности, в работе [2] при анализе выявления расслоений металла труб в рамках последовательных трехкратных

пропусков внутритрубных дефектоскопов с периодичностью в 5 лет установлено увеличение числа эксплуатационных расслоений. В среднем на длине в тридцать километров за пятилетний период эксплуатации число дефектов увеличивается на 12 штук. По данным исследований, представленных в [3], на 1 км нефтепровода приходится около 20–120 расслоений. По газопроводам подобная статистика отсутствует, поскольку в силу технологических особенностей при их диагностировании применяются магнитные внутритрубные снаряды, которые имеют низкую чувствительность к обнаружению расслоений. Однако, учитывая схожую номенклатуру труб, используемых при сооружении нефте- и газопроводов, а также во многом схожие условия их эксплуатации, следует ожидать на газопроводах аналогичной распространенности расслоений.

При этом, существующие нормы либо практически не ограничивают присутствие расслоений в стенке труб [1], либо рассматривают их как эквивалентную поперечную трещину, снижающую несущую способность трубы [4], что наделяет опасностью только наклонные расслоения.

Такая ситуация объясняется несколькими моментами. Во-первых, исследователями, занимавшимися данной проблемой как в рамках аналитических, так и в рамках экспериментальных работ [3, 5–9], выбиралась упрощенная постановка задачи с точки зрения нагружения дефектного участка — рассматривалось действие исключительно внутреннего давления, без учета всей полноты реальных условий эксплуатации нефтегазопроводов. Во-вторых, несмотря на схожие методические подходы при постановке экспериментов, полученные результаты демонстрировали неоднозначную картину влияния расслоений на работоспособность анализируемых объектов, что говорит о наличии неучтенных факторов, таких, к примеру, как природа расслоения. Все это, очевидно, не позволило сформировать четких представлений об опасности данных дефектов как у научного сообщества, так и у эксплуатирующих нефтегазопроводы организаций.

Учитывая обозначенные обстоятельства, ниже представлены результаты проведенных натурных испытаний и лабораторных исследований, демонстрирующие необходимость более глубокого и разностороннего изучения проблемы расслоений нефтегазопроводных труб.

Испытания на стенде

Задачей первого этапа экспериментальных исследований являлась оценка поведения расслоений металла от действия нагрузок типа кручение. Подобные нагрузки не являются проектными, не регламентируются какими-либо нормами или расчетными моделями, однако могут возникать в условиях морозных пучений, подвижек грунтов, сейсмической активности и других явлений,

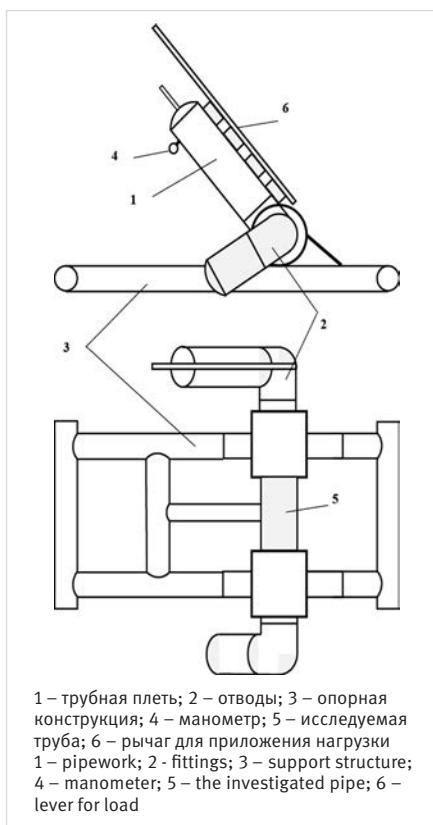


Рис. 1 — Схематическое изображение испытательного стенда
Fig. 1 — Schematic representation of the test bench



а

б

Рис. 2 — Проведение испытаний

а — положение плети до проведения испытаний; б — положение плети после проведения испытаний

Fig. 2 — Testing

a — the position before the test; b — the position after the test

приводящих к изменению проектного положения трубопровода.

В качестве объекта исследований была выбрана цельнотянутая труба Ду 325 мм, толщиной стенки 12 мм, демонтированная с обвязки линейного крана Ду 1400 при капитальном ремонте магистрального газопровода «Уренгой-Новопсков» 3007–3040 км после 30 лет эксплуатации. Причиной выбора указанной трубы послужило обнаруженное в ней по результатам ультразвукового контроля расслоение, оценочным размером 180 мм в продольном направлении и 110 мм в кольцевом, расположенное на глубине 5,5 мм от внешней поверхности.

Определение химического состава в лабораторных условиях позволило установить, что труба изготовлена из стали 17ГС.

Методика проведения исследований предусматривала сооружение испытательного стенда, на котором можно было бы воспроизвести совместное действие нагрузок от внутреннего давления и от кручения.

Схема указанного стенда представлена на рис. 1.

Стенд представлял собой трубную плеть (1), сваренную с использованием отводов (2), закрепленную системой опор (3), обеспечивающих фиксацию горизонтальной части плети, в которой расположена исследуемая труба.

Благодаря предложенным конструктивным решениям удалось реализовать требуемое двухсоставное нагружение плети. Внутреннее давление задавалось посредством

гидравлического насоса, подсоединенного к плети через патрубок на торцевой заглушке, а кручение — путем приложения нормального усилия через рычаг (6) к части плети, ориентированной перпендикулярно к исследуемой трубе.

Программа испытаний заключалась в создании внутреннего давления воды в плети на уровне 3,43 МПа, при котором с использованием трубоукладчика выполнялась тяга рычага в направлении, обратном направлению его наклона.

Поскольку нагрузки кручения не регламентируются действующей нормативно-технической документацией в области эксплуатации нефтегазопроводов, степень кручения заранее не выбиралась, а определялась технической возможностью трубоукладчика, устойчивостью стенда и поведением трубной плети в процессе приложения нагрузки. В данном случае такой подход был признан допустимым, поскольку главной целью запланированного эксперимента являлась качественная оценка поведения трубы с расслоением от действия нехарактерной при эксплуатации трубопровода нагрузки.

В результате, после проведения испытаний наклонная катушка в плети была повернута на угол закручивания $\varphi \approx 40^\circ$ (рис. 2).

Отсюда был вычислен угол сдвига γ исследуемой катушки с расслоением по формуле:

$$\gamma = \frac{\varphi D}{2l}, \quad (1)$$



а

б

Рис. 3 — Фотографии содержащихся на плети дефектов

а — дефект №2 из таблицы; б — дефект №3 из таблицы; в — дефект №4 из таблицы

Fig. 3 — Photos of the defects, contained in the pipework

a — defect №2 from table; b — defect №3 from table; c — defect №4 from table

Обозначение коррозионной зоны	Длина l, мм	Ширина b, мм	Максимальная глубина d, мм
№1	430	270	2,6
№2	670	220	3,1
№3	420	310	3,0
№4	520	370	2,5
№5	620	480	2,2
№6	310	150	2,9

Таблица — Размеры коррозионных зон, содержащихся в трубной плети

Table — Dimensions of corrosion zones, contained in the pipework

где φ — угол закручивания катушки, град; D — диаметр катушки, мм; l — длина катушки, мм.

Угол сдвига γ составил $4,73^\circ$.

Испытания трубной плети

В рамках следующего этапа экспериментальных исследований выполнялась оценка сопротивляемости разрушению трубы с дефектами типа расслоение от внутреннего давления. Для этого была подготовлена трубная плеть из трубы стали К60 производства Италии ($\sigma_t = 461$ МПа, $\sigma_s = 589$ МПа), Ду 1200 мм, толщиной стенки 14,1 мм, вырезанной из МГ «Оренбург — Новопсков», 634-661 км после 32 лет эксплуатации по причине наличия коррозионных дефектов. Также, проведенный в рамках отбраковки ультразвуковой контроль показал наличие в трубе множественных расслоений на разной глубине по толщине стенки, расположенных, в том числе, в зоне коррозионных дефектов.

Размеры дефектов приведены в таблице. Фотографии некоторых содержащихся на ней коррозионных дефектов приведены на рис. 3.

Программа испытаний заключалась в статическом нагружении плети до рабочего (7,4 МПа), затем до испытательного (8,1 МПа) давления с целью контроля протекания пластической деформации в зоне коррозионных дефектов, а затем до разрушения.

Для контроля давления использовался манометр.

Одной из главных целей данных испытаний было сопоставление фактического разрушающего давления с расчетным.

Для аналитической оценки разрушающего давления испытанной плети использовалась регламентированная в ПАО «Газпром» методика, изложенная в [10]. В основу данной методики легли эмпирические выражения, выведенные по результатам обработки многочисленных экспериментальных исследований, проведенных в период с 60-х по 90-е годы в АО «ВНИИСТ», ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и других отраслевых научных институтах, а ее достоверность подтверждалась, в том числе, и независимыми исследователями [11].

Для расчета разрушающего давления p_p использовалось выражение [10]:

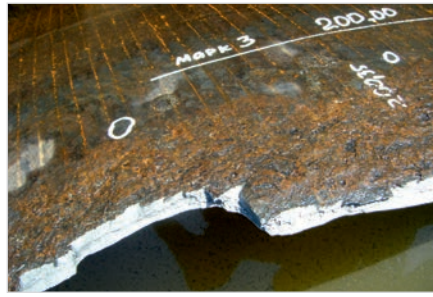


Рис. 4 — Разрушения трубной плети. а — общий вид; б — очаг разрушения
Fig. 4 — Destruction of the pipework. а — general view; б — the center of destruction

$$P_p = \frac{2\delta\sigma_s \left(1 - \frac{d}{\delta}\right)}{(D_n - \delta) \left(1 - \frac{d}{\delta Q}\right)}, \quad (2)$$

где

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{l}{\sqrt{D_n \delta}}\right)^2}, \quad (3)$$

σ_s — минимальное значение предела прочности, принимаемое по государственным стандартам и техническим условиям на трубы, МПа; D_n — номинальный внешний диаметр трубы, мм; δ — номинальная толщина стенки трубы, мм; l — длина дефекта в осевом направлении, мм; d — глубина дефекта, мм.

Также после проведения полигонных испытаний проводились электронно-микроскопические исследования металла в очаге разрушения. Для этой цели использовался электронный микроскоп Jeol JEM 200СХ с доступным ускоряющим напряжением в диапазоне от 20 до 200 кВ, что обеспечивает режим работы «на просвет». Анализ подвергался различные по толщине зоны металла, начиная от поверхности с шагом в 3 мм.

Для проведения электронной микроскопии требовалась подготовка образцов в виде сверхтонких пластинок. Заготовки толщиной около 0,3 мм вырезались электроэрозионным способом. Для оценки состояния поверхностного слоя металла заготовки вырезались на глубине около 0,1 мм от поверхности. Далее они механически утонялись до толщины в 0,1 мм, и окончательно готовились электролитической полировкой.

Итоги

Испытания на стенде

После приложения нагрузок от внутреннего давления и кручения выполнялся ультразвуковой контроль исследуемой трубы с целью определения параметров расслоения. Результаты диагностики показали изменение размеров расслоения как в продольном направлении — до 192 мм, так и в кольцевом направлении — до 176 мм. То есть, в поперечном направлении зафиксированный рост оказался существенно выше, что объяснимо, учитывая характер прилагаемой нагрузки.

Полигонные испытания

По достижению рабочего и испытательного давления пластического деформирования дефектных зон по показаниям манометра

зафиксировано не было, а разрушение плети произошло при давлении 13,6 МПа в дефектной зоне №3 (рис. 4а).

Осмотр излома после проведения испытаний показал, что очаг разрушения находился не в месте наиболее глубокого дефекта, а в зоне общей коррозии, по глубине, не превышающей $1,0 \div 1,3$ мм (рис. 4б).

В целом квазихрупкий излом разрушения характеризовался крайней неоднородностью. По всей длине наблюдались участки хрупких сколов, отрыва слоев металла и расслоений.

При выполнении аналитических расчетов согласно [10] дефекты потери металла могут рассматриваться как одиночными, так и во взаимодействии друг с другом. Дефектная зона №3, явившаяся очагом разрушения плети, представляла собой питинговое коррозионное поражение сложной конфигурации глубиной от 0,5 до 3 мм. Однако, поскольку в очаге разрушения, а также по линии его распространения глубина коррозионного повреждения не превышала 1,3 мм, для проведения расчетов были приняты следующие параметры одиночного дефекта: длина — 420 мм; глубина — 1,3 мм.

Подставив в формулы (2) — (3) вышеуказанные параметры дефекта, а также нормативные свойства испытанной трубы, было получено расчетное разрушающее давление плети, равное 14,12 МПа.

Как видно, теоретическое и реальное значение разрушающего давления достаточно близки, однако, полученный результат следует признать неожиданным. Во-первых, это связано с тем, что фактическое давление разрушения все же оказалось ниже расчетного, при том, что расчетная методика из [10] отличается консервативностью, то есть показывает заниженные результаты, а параметры дефекта, подставляемые в формулы (2) и (3), были округлены в большую сторону. Во-вторых, разрушение произошло не в зоне многочисленных коррозионных каверн, достигавших глубины 3,1 мм, а в зоне общей коррозии.

Объяснение такого поведения трубной плети было получено при проведении электронно-микроскопических исследований. В металле, содержащем расслоение, вырезанном из очага разрушения, обнаружались следы старения, характеризовавшиеся образованием карбидных выделений на границах зерен (рис. 5). По всей видимости, указанный процесс деградации металла стал не только причиной снижения несущей способности трубы, но и причиной образования расслоения в металле. Справедливость



Рис. 5 — Структура металла в зоне разрушения плети (x15 000)
Fig. 5 — The structure of the metal in zone of pipework destruction (x15 000)

данного заключения подтверждается тем, что представленная на рис. 5 картина характерна не только для поверхностных слоев, но и для центральных — где и образовалось расслоение.

Полученные результаты позволили с уверенностью говорить о том, что при оценке опасности труб с расслоениями недостаточно рассматривать данные дефекты только как концентратор напряжения от действия внутреннего давления. Учитывая конфигурацию расслоений, наибольшую опасность для них представляют нагрузки другого типа — кручения и изгибы, действие которых может приводить к развитию данных дефектов не только в плоскости трубы, но и в направлении, обеспечивающем выход дефекта на поверхность, переводя его в более опасную категорию с точки зрения влияния на несущую способность трубопровода.

Также чрезвычайно важным фактором, определяющим степень опасности расслоений труб, является природа их возникновения. Если она, как в представленном случае, обусловлена деградационными процессами в металле, это требует принципиально другого подхода к оценке таких дефектов.

Резюмируя можно отметить целесообразность проведения соответствующих фундаментальных исследований, направленных на формирование дифференцируемых норм оценки качества труб с расслоениями, учитывающих характер и величину действующих проектных и непроеekтных нагрузок на трубопровод, а также тип, размеры и природу возникновения данных дефектов.

Литература

1. Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов: нормативный документ ПАО «Газпром». М.: ПАО «Газпром», 2013. 117 с.
2. Кушнарeнко В.М., Чирков Ю.А., Швеc А.В., Щепинов Д.Н. Изменение дефектности металла трубопроводов при длительной эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №9. С. 7–10.
3. Колотовский А.Н., Яковлев А.Я., Бирилло И.Н., Теплинский Ю.А. Работоспособность трубопроводов высокого давления при наличии внутренних расслоений металла. М.: ЦентрЛитНефTeГаз, 2009. 222 с.
4. РД-23.040.00-КТН-011-16 Руководящий документ. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами.

5. Фокин М.Ф., Никитина Е.А. Особенности оценки опасности труб магистральных трубопроводов с «расслоениями», обнаруживаемых при внутритрубной диагностике // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. №2. С. 81–84.
6. Комаров А.В. Оценка работоспособности нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок труб. Ухта, 2012. 161 с.
7. Бирилло И.Н., Комаров А.В. Методика отбраковки труб с внутренним расслоением стенок на стадии эксплуатации объекта // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2011. №2. С.12–15.
8. Олешко В.Д. Разработка методов расчетного остаточного ресурса нефтегазопроводов с расслоениями в стенках труб. Уфа, 2001. 135 с.
9. Кершенбаум В.Я., Гумеров К.М., Ямуров Н.Р., Кирос В.И. Гидроиспытание труб с дефектами типа «расслоение металла» // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. 2000. №4. С. 37–42.
10. СТО Газпром 2-2.3-112-2007. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Методические указания по оценке работоспособности участков магистральных газопроводов с коррозионными дефектами. М.: ИРЦ Газпром, 2007. 63 с.
11. Велиулин И.И., Зорин А.Е. Экспериментальные исследования различных типов дефектов труб // Международная конференция «Обслуживание и ремонт газонепфтепроводов–2010». М.: Газпром экспо, 2011. С. 221–228.

ENGLISH

PIPES

UDC 621.643.2-034.14

Experimental researches the influence of metal bundles on the pipelines functionality

Authors:

Anatoly E. Tolstov — chief engineer¹; Ekos.tolstov@mail.ru

Alexander E. Zorin — Sc.D., chief researcher²; Zorinae86@rambler.ru

Evgeny E. Zorin — Sc.D., professor of department of materials science³; zenacenter@yandex.ru

¹LLC «Gazpribortekhnologiya», Moscow, Russian Federation

²LLC "EKSIKOM", Moscow, Russian Federation

³Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of full scale tests, in which studied the influence of metal pipe bundles on the pipelines functionality. It is shown, that in case the influence of non-design loads on oil and gas pipelines, as well as when the genesis of metal bundles is caused by the degradation of metal properties, such defects can have a negative impact on the resistance of the pipeline to destruction.

Materials and methods

Researches were undertaken on gas pipes of

different diameters. A special stand was made for loading pipes by the combined influence of internal pressure and torsion. To assess the bearing capacity of pipe with bundles, was made a pipe lash. For laboratory studies of metal pipes was performed electron microscopy.

Keywords

metal bundles, full scale testing, aging metal, torsion

Results

The combined effect of internal pressure and

torsion loads led to increase the bundle size in pipe. The bearing capacity of pipe with bundles was lower than calculated due to detection traces of aging in metal, which led to a drop in its performance properties.

Conclusions

When assessing the risk of bundles, it is necessary to take into account the effect of the entire spectrum of loads on the pipeline, as well as the genesis of these defects

References

1. *Instruktsiya po otsenke defektov trub i soedinitel'nykh detaley pri remonte i diagnostirovaniy magistral'nykh gazoprovodov* [Instructions for assessing defects in pipes and fittings during repair and diagnostics of main gas pipelines]. M.: Gazprom, 2013, 117 p.
2. Kushnarenko V.M., Chirkov Yu.A., Shvets A.V., Shchepinov D.N. *Izmenenie defektnosti metalla truboprovodov pri dlitel'noy ekspluatatsii* [Change of pipeline metal defects during long-term operation]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, issue 9, pp. 7–10.
3. Kolotovskiy A.N., Yakovlev A.Ya., Birillo I.N., Teplinskiy Yu.A. *Rabotosposobnost' truboprovodov vysokogo davleniya pri nalichii vnutrennikh rassloeniy metalla* [Performance of high-pressure pipelines with internal metal bundles]. M.: TsentrLitNefteGaz, 2009, 222 p.
4. RD-23.040.00-KTN-011-16 *Rukovodyashchiy dokument. Magistral'nyy truboprovodnyy transport nefti i nefteproduktov. Opredelenie prochnosti i dolgovechnosti trub i svarnykh soedineniy s defektami* [Determination of strength and durability of pipes and welded joints with defects].
5. Fokin M.F., Nikitina E.A. *Osobennosti otsenki opasnosti trub magistral'nykh truboprovodov s «rassloeniyami», obnaruzhivaemykh pri vnutritrubnoy diagnostike* [Features of hazard assessment of pipes with "bundles", detected during in-line inspection]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2008, issue 2, pp. 81–84.
6. Komarov A.V. *Otsenka rabotosposobnosti neftegazoprovodov s vnutrennimi rassloeniyami stенок trub* [Performance evaluation of oil and gas pipelines with internal bundles of the pipe wall]. Ukhita, 2012. 161 p.
7. Birillo I.N., Komarov A.V. *Metodika otbrakovki trub s vnutrennim rassloeniem stenki na stadii ekspluatatsii ob"ekta* [The method of rejection of pipes with internal bundles at the stage of facility operation]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2011, issue 2, pp. 12–15.
8. Oleshko V.D. *Razrabotka metodov raschetnogo ostatochnogo resursa neftegazoprovodov s rassloeniyami v stenkakh trub* [Development of methods for calculating the residual life of oil and gas pipelines with bundles in the walls of pipes]. Ufa, 2001, 135 p.
9. Kerшенbaum V.Ya., Gumerov K.M., Yamurov N.R., Kirnos V.I. *Gidroispytanie trub s de-fektami tipa «rassloenie metalla»* [Hydraulic testing of pipes with defects «metal bundles»]. *Nadezhnost' i sertifikatsiya oborudovaniya dlya nefti i gaza*, 2000, issue 4, pp. 37–42.
10. СТО Газпром 2-2.3-112-2007 *Dokumenty normativnye dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii ob"ektov ОАО «Газпром». Metodicheskie ukazaniya po otsenke rabotosposobnosti uchastkov magistral'nykh gazoprovodov s korrozionnymi defektami* [Methodical instructions for the assessment of working capacity of the main gas pipelines sections with corrosion defects]. M.: IRTs Gazprom, 2007, 63 p.
11. Veliyulin I.I., Zorin A.E. *Eksperimental'nye issledovaniya razlichnykh tipov defektov trub* [Experimental researches of various types of pipe defects]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Obsluzhivanie i remont gazonefteprovodov–2010»*. M.: Gazprom ekspо, 2011, pp. 221–228.