

УДК 622.276.53

В.Н. Ивановский¹, e-mail: ivanovskiyvn@yandex.ru; **А.В. Деговцов¹**, **С.С. Пекин¹**, **А.А. Сабиров¹**, **Ш.А. Алиев¹**

¹ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия).

Испытание образцов пластически обжатых канатов на растяжение

На сегодняшний день в России имеется порядка 5 тыс. скважин с боковыми стволами малого диаметра, ежегодно проводятся до 1 тыс. операций по резке боковых стволов. Бурение боковых стволов позволяет снизить капиталовложения в разработку месторождения и вовлечь в эксплуатацию ранее недоступные горизонты.

При этом скважины с боковыми стволами имеют ряд недостатков: малые диаметральные размеры (89–114 мм) эксплуатационной колонны бокового ствола, большие отклонения от вертикали и большие углы кривизны ствола скважин, которые достигают 6 и более градусов на 10 м длины, что затрудняет применение в боковых стволах скважин стандартного скважинного оборудования. Большое искривление и малые диаметры боковых стволов являются осложняющими факторами при эксплуатации скважин с боковыми стволами, в частности происходит истирание колонны штанг и насосно-компрессорных труб (НКТ), что приводит к обрыву штанг и потере герметичности колонны НКТ. В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина была разработана насосная установка с канатной штангой. Использование каната позволяет снизить вероятность обрыва штанг и протирки штангами НКТ за счет увеличения площади контакта и снижения контактных напряжений. Применение канатов в качестве колонны штанг ограничивается, в частности, повышенным удлинением этой колонны штанг, которое зависит от модуля упругости каната. На практике часто пользуются упрощенными формулами для определения модуля упругости, однако эти формулы не учитывают всего многообразия факторов, влияющих на модуль упругости, поэтому наиболее надежным остается его экспериментальное определение. В статье дана информация об экспериментально определенном модуле упругости пластически обжатых канатов, обоснована область применения таких канатов в качестве колонны насосных штанг.

Ключевые слова: пластически обжатые канаты, скважины с боковыми стволами, скважины малого диаметра, обрыв штанг, колонны насосных штанг.

.....

V.N. Ivanovskiy¹, e-mail: ivanovskiyvn@yandex.ru; **A.V. Degovtsov¹**, **S.S. Pekin¹**, **A.A. Sabirov¹**, **Sh.A. Aliyev¹**

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia).

Testing the samples of plastically pressed ropes for tension

Today in Russia there are about 5,000 wells with lateral trunks of small diameter, are held annually to 1,000 operations sidetracking. The sidetracking reduces investment in the development of the field and to engage in the exploitation of previously inaccessible horizons.

While wells with lateral trunks have a number of disadvantages: small diametral dimensions (114 – 89 mm) casing side of the trunk, large deviations from the vertical and large angles of curvature of the borehole, which reach 6 or more degrees on 10 meters length, what complicates the use in the lateral wellbore standard downhole equipment.

Large curvature and small diameters sidetracks are complicating factors in the operation of wells with side holes, in particular, is abrasion of a rod string and the tubing that leads to the sucker rod breakage and loss of tightness of the tubing string.

In Russian state University of oil and gas named after I. M. Gubkin was developed borehole pump installation with the cable rod. The use of the rope reduces the likelihood of breakage of the rods and protery barbells tubing by increasing the contact area and reduce contact stress.

The use of ropes as column bars is limited, in particular, the increased elongation of the column of rods, which depends on the modulus of elasticity of the rope. In practice, often use simplified equations to determine the modulus of elasticity, however, these formulas do not take into account the variety of factors affecting modulus of elasticity, therefore, the most reliable is its experimental determination. The article provides information about experimentally determined modulus of elasticity of plastically compressed ropes, and justifies the scope of such ropes as the sucker rods.

Keywords: plastically pressed ropes, wells with small diameter sidetracks, rod parted, sucker-rod string.

В России имеется около 5 тыс. скважин с боковыми стволами малого диаметра, ежегодно проводятся до 1 тыс. операций по зарезке боковых стволов. Бурение боковых стволов позволяет снизить капиталовложения в разработку месторождения и вовлечь в эксплуатацию ранее недоступные горизонты.

Однако скважины с боковыми стволами имеют ряд недостатков: малые диаметральные размеры эксплуатационной колонны бокового ствола (наиболее распространенный диаметр скважин с боковыми стволами равен 114, 102, реже – 89 мм), большие отклонения от вертикали и большие углы кривизны

ствола скважин, которые достигают 6° на 10 м длины, что затрудняет применение в них стандартного скважинного оборудования [1].

ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН С БОКОВЫМИ СТВОЛАМИ ПРИМЕНЯЮТ РАЗЛИЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ:

- установки электроприводных центробежных насосов УЭЦН 2, 2А и 3-го габаритов;
- струйные насосы;
- скважинные штанговые насосные установки (СШНУ) со специальными штанговыми колоннами.

Большая степень кривизны и малые диаметры боковых стволов являются осложняющими факторами при эксплуатации скважин с боковыми стволами, в частности происходит истирание колонны штанг и НКТ, что приводит к обрыву штанг и потере герметичности колонны НКТ.

В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина была разработана установка с канатной штангой, схема установки представлена на рисунке 1. Канатная штанга устанавливается наиболее часто в месте интенсивного набора кривизны.

В качестве канатной штанги используется канат закрытой конструкции $d = 20$ мм по ГОСТ 10506-76 с фигурными Z-образными проволоками внешнего ряда (рис. 2) [1].

Использование каната позволяет снизить вероятность обрыва штанг и протирки штангами насосно-компрессорных труб за счет увеличения площади контакта и снижения контактных напряжений [2].

Подача установки штангового насоса зависит от диаметра насоса, числа качаний и длины хода плунжера и определяется по формуле:

$$Q = 1440 \cdot F_{\text{пл}} \cdot S_{\text{пл}} \cdot n \cdot \eta, \quad (1)$$

где $F_{\text{пл}}$ – площадь насоса; $S_{\text{пл}}$ – длина хода плунжера; n – число двойных ходов; $f_{\text{шт}}$ – площадь сечения тела штанг; η – коэффициент подачи насоса.

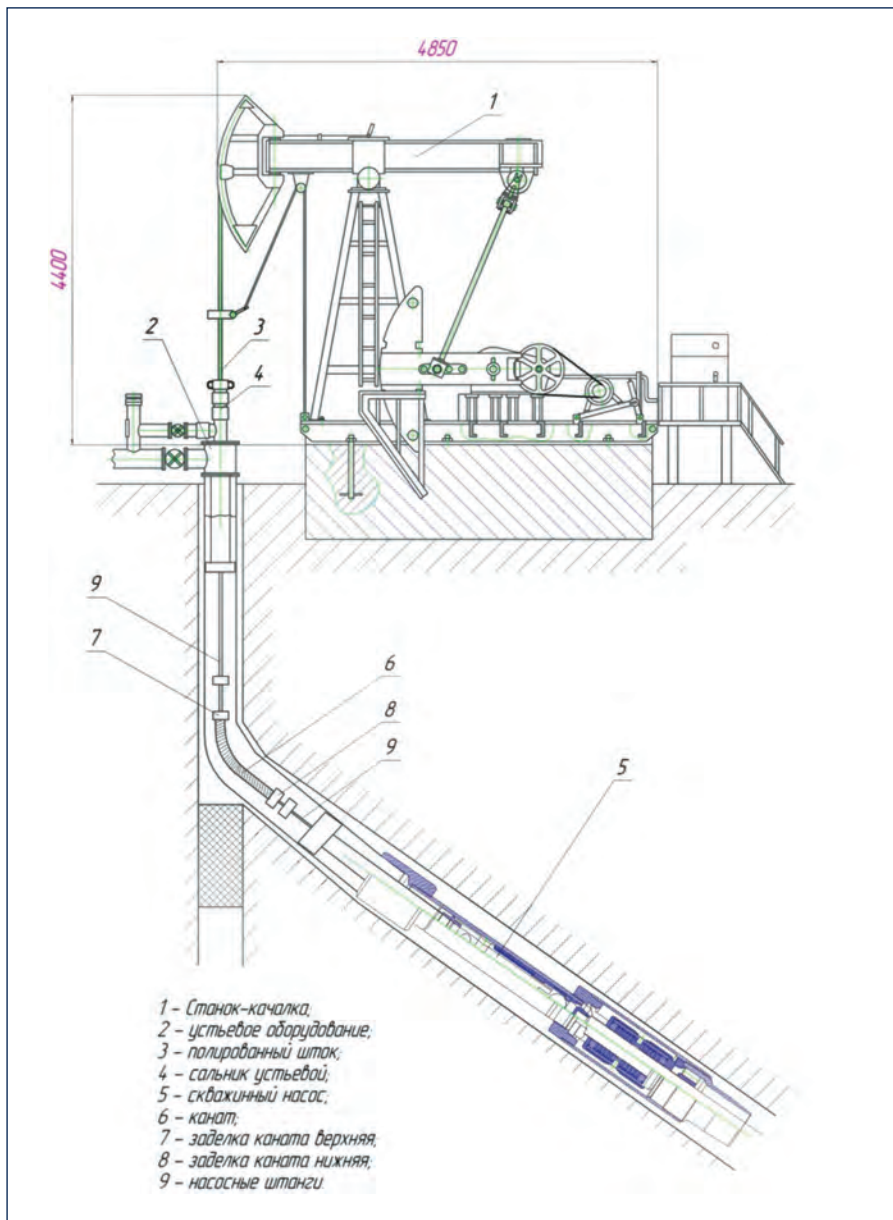


Рис. 1. Схема скважинной насосной установки с канатной штангой

Fig. 1. Scheme of the oil well pumping unit with rope rod:

1 – sucker rod pumping unit; 2 – wellhead equipment; 3 – polished rod; 4 – polished rod packing; 5 – downhole pump; 6 – rope; 7 – upper rope termination; 8 – bottom rope termination; 9 – pump rods

Ссылка для цитирования (for references):

Ивановский В.Н., Деговцов А.В., Пекин С.С., Сабиров А.А., Алиев Ш.А. Испытание образцов пластически обжатых канатов на растяжение // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 11. С. 93–97.

Ivanovskiy V.N., Degovtsov A.V., Pekin S.S., Sabirov A.A., Aliyev Sh.A. Testing the samples of plastically pressed ropes for tension (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 11. P. 93–97.

Таблица 1. Характеристика и размеры проволок по слоям
Table 1. Characteristics and dimensions of the wires by layers

Диаметр каната Rope diameter	Центральная проволока Central wire	Характеристика и размеры проволок по слоям Characteristics and dimensions of the wires by layers									
		1-й 1st		2-й 2nd		3-й 3rd		4-й 4th		5-й 5th	
		Круглые Circular									
Диаметр, мм Diameter, mm	Количество, шт. Quantity, pcs.	Диаметр, мм Diameter, mm	Количество, шт. Quantity, pcs.	Диаметр, мм Diameter, mm	Количество, шт. Quantity, pcs.	Диаметр, мм Diameter, mm	Количество, шт. Quantity, pcs.	Диаметр, мм Diameter, mm	Количество, шт. Quantity, pcs.	Диаметр, мм Diameter, mm	Количество, шт. Quantity, pcs.
13,8	2,90	7	2,15	7/7	2/1,5	14	2,50				
17,7	2,90	7	2,15	7/7	2/1,5	14	2,5	24	1,9		
21,7	2,90	7	2,15	7/7	2/1,5	14	2,5	24	1,9	24	2,25

При работе установки штангового насоса под действием веса жидкости происходит упругое удлинение колонны штанг, которое оказывает существенное влияние на длину хода плунжера и, следовательно, снижает подачу насоса. Удлинение колонны штанг при статических нагрузках определяется по формуле

$$\lambda_{шт} = \frac{P_{ж} \cdot L}{E \cdot F_{шт}} \quad (2)$$

где $P_{ж}$ – вес столба жидкости на плунжером насоса; L – длина колонны штанг; E – модуль упругости; $\lambda_{шт}$ – удлинение колонны штанг.

Как видно из формулы (2), удлинение колонны штанг под действием веса столба жидкости зависит от модуля упругости материала штанг и площади их сечения.

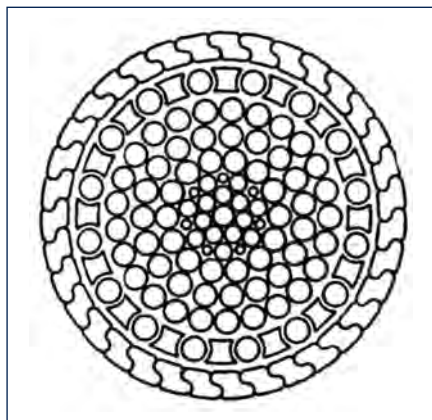


Рис. 2. Канат закрытой конструкции ГОСТ 10506-76

Fig. 2. Locked-coil rope GOST 10506-76

Модуль упругости канатных штанг отличается от модуля упругости стального стержня. Канат имеет сложную конструкцию и состоит из проволок разных диаметров, переплетенных между собой под разным углом. Модуль упругости стального проволочного каната является в общем случае переменной величиной и зависит от конструкции каната, степени его приработки, величины нагрузки, параметров свивки и других факторов. Исследования модули упругости продолжаются уже более 100 лет, однако и сейчас их еще нельзя считать законченными. На сегодняшний день для определения модуля упругости каната в расчетах можно использовать следующие формулы [3]:

$$M.Ф. Глушко: E_k = A/F_c \quad (3)$$

$$A.Н. Динника: E_k = E \cdot \cos^4 \alpha \cdot \cos^4 \beta \quad (4)$$

где A – жесткость каната на растяжение; F_c – площадь проволок в канате; E – модуль упругости стальной канатной проволоки; α, β – углы свивки слоев каната.

На практике часто пользуются усредненными значениями E_k (Н/м²): для канатов закрытой конструкции – $1,6 \cdot 10^{11}$; для канатов с металлическим сердечником – $1,4 \cdot 10^{11}$; для канатов с органическим сердечником – $1,0 \cdot 10^{11}$.

Однако приведенные формулы, как и формулы многих других авторов, не учитывают всего многообразия факторов, влияющих на модуль упругости,

поэтому наиболее надежным остается его экспериментальное определение. При выборе каната для канатных штанг основным требованием является максимальное заполнение площади сечения каната проволоками и величина модуля упругости. Наряду с канатами закрытой конструкции в настоящее время существуют канаты с пластически обжатыми прядями, которые обладают высокой прочностью и хорошим заполнением площади сечения (рис. 3).

Для определения возможности использования канатов с пластически обжатыми прядями в качестве колонны насосных штанг в РГУ нефти и газа были проведены исследования модуля упругости образцов пластически обжатых канатов при их растяжении.

Для испытаний были взяты образцы пластически обжатых канатов Бело-

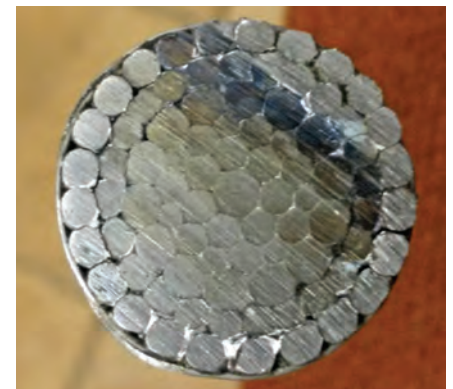


Рис. 3. Пластически обжатый канат

Белорецкого завода $d = 17,7$ мм

Fig. 3. Plastically pressed rope, Beloretskiy plant $d = 17.7$ mm

рецкого завода диаметром $d = 13,8$ мм; $d = 17,7$ мм; $d = 21,7$ мм с шагом свивки 200 мм, длина образцов составляла 940 мм. Конструкция образцов пластически обжатых канатов представлена в таблице 1.

Испытания проводились на разрывной машине EU-40, с максимальным разрывным усилием 400кН. Образец канатной штанги нагружался постепенно до 60–70% от разрывного усилия с интервалом 10 кН, проводилась выдержка после каждого нагружения, удлинение образца канатной штанги определялось по электронному штангенциркулю, закрепленному на линейке машины, производилась предварительная вытяжка образца, испытание проводилось три раза [4].

В качестве элемента заделки использовалась специальная коническая втулка для распушения конца каната, которая позволяет равномерно нагрузить все проволоки каната. Образец пластически обжатого каната, подготовленный к испытаниям, представлен на рисунке 4. На рисунке 5 представлен образец пластически обжатого каната, установленный в разрывную машину EU-40.

При первом нагружении проводилась вытяжка образца и уплотнение конца каната во втулках. В дальнейшем при обработке результатов испытаний результаты первого испытания не учитывались.

Относительное удлинение каната определялось по формуле:

$$\delta_i = \frac{\lambda \cdot 100}{L_0}, \quad (5)$$

где δ_i – относительное удлинение; λ – удлинение каната; L_0 – рабочая длина образца.

На рисунке 6 представлены графики относительных удлинений образцов пластически обжатых канатов Белорецкого завода под действием растягивающей нагрузки.

Результаты испытаний показали, что относительные удлинения образцов пластически обжатых канатов диаметром 13,8 мм при нагрузке, равной 50кН (примерно соответствует нагрузке на колонну штанг в промышленных условиях), не превышает 0,3%. Для каната $d = 17,7$ мм относительное удлинение



Рис. 4. Образец пластически обжатого каната для испытаний

Fig. 4. Plastically pressed rope test piece

составило 0,2%, а для каната $d = 21,7$ мм удлинение равно 0,17%.

На основании полученных результатов исследований в соответствии с методикой испытаний были определены условные модули упругости образцов пластически обжатых канатов.

Условный модуль упругости образцов каната определяется по формуле (6).

$$E_k = \frac{P \cdot L_0}{\lambda \cdot f_k}, \quad (6)$$

где f_k – площадь сечения проволок каната.



Рис. 5. Испытание образца пластически обжатого каната

Fig. 5. Plastically pressed rope test piece testing

Таблица 2. Условные модули упругости пластически обжатых канатных штанг
Table 2. Nominal elastic modulus of plastically pressed rope rods

Модуль упругости E_r , $d = 13,8$ Elastic modulus E_r , $d = 13.8$	Модуль упругости E_r , $d = 17,7$ Elastic modulus E_r , $d = 17.7$	Модуль упругости E_r , $d = 21,7$ Elastic modulus E_r , $d = 21.7$
1,12 – 1,16·10 ¹¹ Па/м ² 1.12 – 1.16·10 ¹¹ Pa/m ²	1,27 – 1,43·10 ¹¹ Па/м ² 1.27 – 1.43·10 ¹¹ Pa/m ²	1,03 – 1,08·10 ¹¹ Па/м ² 1.03 – 1.08·10 ¹¹ Pa/m ²

Результаты расчетов условных модулей упругости образцов пластически обжатых канатов представлены в таблице 2. Модули упругости образцов пластически обжатых канатов колеблются в пределах 1,03 – 1,43·10¹¹ Па/м². Полученный в результате эксперимента условный модуль упругости образца пластически обжатых канатов диаметром 17,7 мм равен в среднем 1,35·10¹¹ Па/м², что составляет около 65% от модуля упругости стали (2,06·10¹¹ Па/м²), или 73% от условного модуля упругости канатов закрытой конструкции (1,85·10¹¹ Па/м²), выпускаемого по ГОСТ 10506); для каната диаметром 13,8 мм условный модуль упругости равен 1,14·10¹¹ Па/м², для каната диаметром 21,7 мм – 1,05·10¹¹ Па/м².

Полученные условные модули упругости пластически обжатых канатов находятся в интервале усредненных значений модулей упругости для подобных канатов.

Полученные значения модуля упругости пластически обжатых канатов позволяют определить области их применения в качестве канатных штанг (длина канатной штанги – не более 500

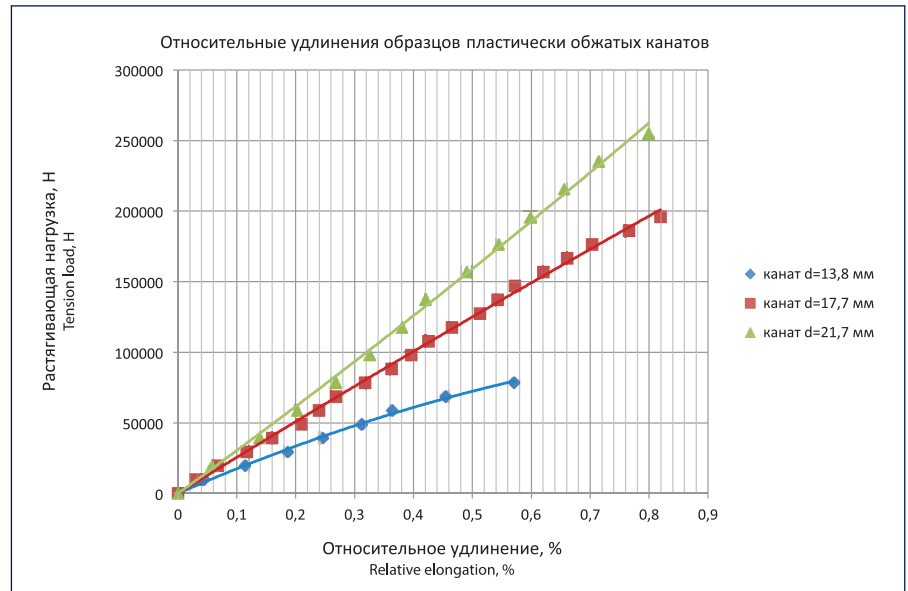


Рис. 6. Относительные удлинения образцов пластически обжатых канатов Белорецкого завода $d = 13,8$ мм; $d = 17,7$ мм и $d = 21,7$ мм

Fig. 6. Relative elongation of plastically pressed rope test piece testing from Beloretskiy plant $d = 13.8$ mm; $d = 17.7$ mm and $d = 21.7$ mm

м при условном диаметре штангового насоса до 44 мм), а также обосновать направление совершенствования конструкции и технологии изготовления таких канатов. Указанное усовершен-

ствование должно обеспечить увеличение жесткости пластически обжатых канатов, что позволит расширить их область применения в качестве колонны насосных штанг.

Литература:

- Ивановский В.Н., Деговцов А.В., Сабиров А.А., Поносов Е.А., Красноротов Д.Н., Мазейн И.И. О возможности штанговой эксплуатации скважин с боковыми стволами малого диаметра // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2013. № 12. С. 80–84.
- Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Деговцов А.В., Пекин С.С., Патрушев С.Г., Качин Е.В., Попов С.В. Опыт эксплуатации скважин с боковыми стволами малого диаметра, ШСНУ с канатной штангой в ООО «ЛУКОЙЛ ПЕРМЬ» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 3. С. 78–87.
- Малиновский В.А. Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2001. Ч. 1.
- Алиев Ш.А. Испытание канатных штанг на растяжение // Сборник тезисов 69-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2015». Т. 2. М., 2015. С. 7.

References:

- Ivanovskiy V.N., A.V. Degovtsov, Sabirov A.A., Ponomov Ye.A., Krasnoborov D.N., Mazein I.I. O vozmozhnosti shtangovoj jekspluatacii skvazhin s bokovymi stvolami malogo diametra [On possible rod pumping of small diameter lateral wells]. *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2013, No. 12. P. 80–84.
- Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Degovtsov A.V., Pekin S.S., Patrushev S.G., Kachin Ye.V., Popov S.V. Opyt jekspluatacii skvazhin s bokovymi stvolami malogo diametra, ShSNU s kanatnoj shtangoj v OOO «LUKOIL PERM» [Experience of operating the wells with small diameter sidetracks, rod oil well pumping unit with rope rod in LUKOIL PERM LLC]. *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 3. P. 78–87.
- Malinovsky V.A. *Stal'nye kanaty* [Steel ropes]. Odessa, Astroprint, 2001. Ch. 1.
- Aliyev Sh.A. Ispytanie kanatnyh shtang na rastjazhenie [Testing the rope rods for tension]. *Sbornik tezisev 69-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii «Neft' i gaz – 2015» = Abstracts of the 69th International Youth Scientific Conference Oil and Gas*, 2015. Vol. 2. Moscow, 2015. P. 7.