

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-6-21-29

УДК 622.276.054.23

И.Н. Латыпов, Е.А. Наумкин, К.Р. Уразаков, П.М. Тугунов

(Уфимский государственный нефтяной технический

университет, г. Уфа, Российская Федерация)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИННОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА И ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ildar N. Latypov, Evgeniy A. Naumkin, Kamil R. Urazakov, Pavel M. Tugunov

(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

IMPROVING THE CENTRIFUGAL PUMP DESIGN AND CHANGING THE STRENGTH OF OPERATION

Введение

В настоящее время в структуре добычи на малодебитном фонде происходит рост доли установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), которые работают в периодическом режиме. При таком режиме подача насоса изменяется от максимального значения в начале до минимального в конце периода откачки. Тенденция к такой динамике объясняется тем, что растет фонд малодебитных скважин в Западной Сибири, где УЭЦН является основным механизированным способом добычи.

При добыче нефти в малодебитных скважинах зачастую приходится сталкиваться с такой проблемой, когда динамический уровень газожидкостной смеси может опуститься до критического уровня. При этом подача насоса снижается, а развиваемый насосом напор недостаточен для преодоления гидростатического давления столба жидкости в насосно-компрессорных трубах. В этом случае насос перестает перекачивать жидкость, и происходит неизбежный выход из строя насосной установки из-за перегорания электродвигателя.

Background

Currently, the share of electric centrifugal pump (ECP) units, which operate in a periodic mode, is growing in the production structure at a marginal fund. In this mode, the pump flow varies from the maximum value at the beginning to the minimum at the end of the pumping period. The trend towards such dynamics is explained by the fact that the fund of low-yield wells is growing in Western Siberia, where ECP is the main mechanized method of production.

When oil is being produced in marginal wells, it is often necessary to encounter such a problem, when the dynamic level of the gas-liquid mixture can drop to a critical level. In this case, the pump flow is reduced, and the pressure developed by the pump is insufficient to overcome the hydrostatic pressure of the liquid column in the tubing. In this case, the pump stops pumping fluid and an inevitable failure of the pumping unit occurs due to a motor burnout.

Кроме того, увеличение числа УЭЦН, работающих в режиме автоматического периодического включения, приводит к существенному снижению дебита скважины.

Цели и задачи

Целью работы является внедрение устройства для стабилизации давления на приеме в УЭЦН, которое производило бы слив части нефтепродукта обратно на насос через затрубное пространство без остановки оборудования. В целях обеспечения надежной эксплуатации данной конструкции была проведена проверка материала на прочность и долговечность с учетом перераспределения напряжений и изменения свойств при эксплуатации.

Результаты

Проведенные испытания образцов из фрагментов труб стали 40X со сроком эксплуатации 57, 378, 1035 сут показали снижение предела прочности и предела текучести на 20 % и 6 % соответственно. Распределение твердости по сечению стенки испытуемых фрагментов труб показало, что сердцевина тверже, чем края стенки, при этом по мере эксплуатации наблюдается незначительное упрочнение. Результаты испытаний на ударный изгиб показали существенное снижение ударной вязкости на 73 %. Усталостные испытания, проводимые по схеме кругового изгиба с вращением, выявили снижение усталостной долговечности.

Проведенный анализ устройства стабилизации давления на приеме в УЭЦН выявил, что наиболее нагруженным узлом является механизм перекрытия отверстия, который образует гидравлический канал между полостью насосно-компрессорных труб и затрубным пространством. Расчет действия осевой сжимающей нагрузки и внутреннего давления данного узла показал, что возникающие нагрузки в зонах концентрации напряжений не превышают допустимых значений.

In addition, an increase in ECP operating in automatic periodic switching on mode leads to a significant reduction in well production.

Aims and Objectives

The aim of the work is to introduce a device for stabilizing the pressure at the inlet to the ECP station, which would discharge part of the oil product back to the pump through the annulus without stopping the equipment. In order to ensure reliable operation of this structure, the material was tested for strength and durability, taking into account the redistribution of stresses and changes in properties during operation.

Results

The tests of samples from pipe fragments of steel 40X with a service life of 57, 378, 1035 days showed a decrease in the tensile strength and yield strength by 20 % and 6 %, respectively. The distribution of hardness over the cross section of the wall of the tested pipe fragments showed that the core is harder than the edges of the wall, while as the operation progresses there is a slight hardening. Impact test results showed a significant reduction in toughness by 73 %. Fatigue tests carried out according to the circular curvature with rotation, revealed a decrease in fatigue life.

The analysis of the device for stabilizing the pressure at the inlet to the ESP revealed that the most loaded unit is the overlap mechanism, which forms the hydraulic channel between the tubing cavity and the annular space. The calculation the action of the axial compressive load and the internal pressure of this node showed that the resulting loads in the stress concentration zones do not exceed the allowable values.

Ключевые слова: малodeбитные скважины; установка электроцентробежного насоса; стабилизация давления; сталь 40X; прочность; долговечность; ударная вязкость; твердость

Key words: marginal wells; electric centrifugal pump installation; pressure stabilization; steel 40X; strength; durability; impact strength; hardness

В настоящее время в структуре добычи на малodeбитном фонде существуют различные методы, которые позволяют усовершенствовать работу установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1, 2].

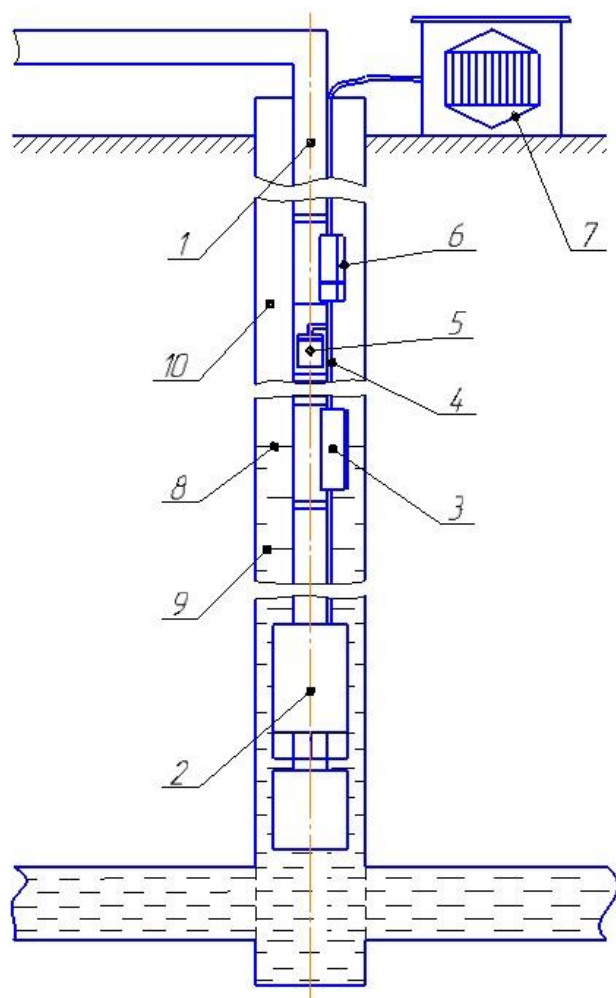
Однако отсутствуют методы использования надежного устройства, которые могли бы применить для эксплуатации малodeбитных скважин, при этом обеспечив непрерывную работу установки.

В целях устранения указанных недостатков предложено устройство, позволяющее обеспечить стабилизацию давления на приеме в УЭЦН, в котором поставленная задача решается путем периодического сообщения затрубного пространства с полостью насосно-компрессорных труб [3].

Схема устройства приведена на рисунке 1. Устройство стабилизации давления на приеме в УЭЦН включает следующие узлы: механизм перекрытия отверстия *б* и устройство подачи команд *5*, которые соединены между собой и установлены между насосно-

компрессорными трубами *1* на расстоянии 300 м над выкидом скважинного насоса *2*. Датчик измерения давления *3* установлен между насосно-компрессорными трубами *1* на расстоянии 150 м над выкидом скважинного насоса *2*. От трансформатора *7* подводится кабель *4* к каждому узлу.

Принцип работы устройства заключается в следующем: чувствительный элемент датчика измерения давления *3* воспринимает давление от воздействия газожидкостной смеси *9* при достижении динамического уровня *8*.



- 1 - насосно-компрессорные трубы;
- 2 - скважинный насос;
- 3 - датчик измерения давления;
- 4 - кабель;
- 5 - устройство подачи команд;
- 6 - механизм перекрытия отверстия;
- 7 - трансформатор;
- 8 - динамический уровень;
- 9 - газожидкостная смесь;
- 10 - затрубное пространство

Рисунок 1. Схема устройства в скважине

Воспринимаемое давление преобразуется в электрический сигнал, который через кабель 4 поступает в устройство подачи команд 5, фиксирующее электрический сигнал и при определенном диапазоне полученных значений посылающее его на трансформатор 7. После этого от трансформатора 7 поступает напряжение на механизм перекрытия отверстия 6, который приводится в действие и образует гидравлический канал между полостью насосно-компрессорных труб 1 и затрубным пространством 10.

Происходит перепуск части нефтепродукта в затрубное пространство 10 посредством излива. Тем самым обеспечивается достаточный динамический уровень для сохранения нормальной работы насоса и происходит стабилизация давления скважинного насоса 2.

В случае, когда устройство подачи команд 5 фиксирует электрический сигнал, значение которого не входит в необходимый для перепуска части нефтепродукта диапазон, напряжение от трансформатора 7 к механизму перекрытия отверстия 6 не поступает. Скважинный насос 2 работает в штатном режиме [4-6].

Применение устройства стабилизации давления на приеме в УЭЦН подразумевает методами обработки металлов резанием создать необходимый профиль участка трубы. Это приведет к локальному утонению стенки трубы и формированию концентраторов напряжений.

В связи с формированием в локальных зонах повышения напряжений возникает потребность проверки влияния изменения конструкции участка насосно-компрессорной трубы на изменение прочности и долговечности материала.

С этой целью были проведены следующие испытания образцов: на статическое растяжение, малоцикловую усталость, ударный изгиб, а также твердометрия.

Для изготовления образцов были использованы фрагменты труб стали 40Х со сроком эксплуатации 57, 378, 1035 сут. Химический анализ всех фрагментов подтвердил соответствие стали 40Х.

Испытания на растяжение проводились согласно ГОСТ 1497-84 [7, 8] с целью определения следующих механических характеристик материала: предела текучести σ_t , предела прочности σ_b , относительного удлинения при разрыве δ , относительного сужения образца ψ .

Исследования выполнялись при использовании сервогидравлической испытательной системы модели Instron 8801, которая позволяет проводить испытания с максимальным усилием до 100 кН. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на растяжение

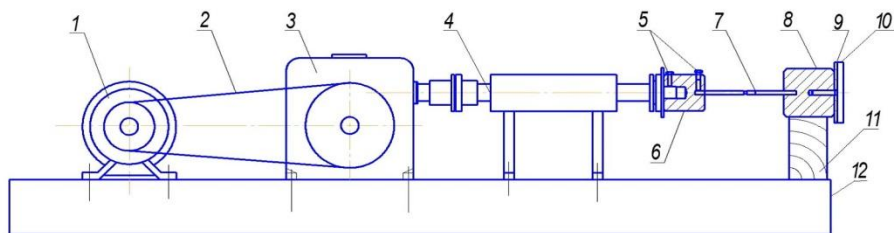
Длительность эксплуатации t, сут	Предел прочности σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве δ , %	Относительное сужение образца ψ , %
57	869,7	612,0	7,7	68,3
378	693,3	589,6	9,0	55,9
1035	691,7	575,6	4,9	57,9

По результатам испытаний зарегистрировано изменение прочностных характеристик, а именно, выявлено снижение предела прочности на 20 %, условного предела текучести на 6 %, относительного удлинения при разрыве на 36 %, относительного сужения образца на 15 %, что объясняется сложными условиями эксплуатации.

Испытания стальных образцов на малоцикловую усталость проводились согласно ГОСТ 25.502-79 [9]. В целях проведения циклического нагружения образцов круглого сечения была использована установка для проведения усталостных испытаний по схеме кругового изгиба с вращением.

Процесс нагружения производился с частотой нагрузки 10 циклов в минуту.

Установка представлена на рисунке 2.



1 - двигатель; 2 - ременная передача; 3 - редуктор;
4 - вал с подшипниковым узлом; 5 - болт; 6 - диск;
7 - образец; 8 - основной груз; 9 - дополнительный груз;
10 - крепление грузов; 11 - опора для груза; 12 - станина

Рисунок 2. Схема экспериментальной установки

Основная задача усталостных испытаний заключается в количественной оценке способности материалов работать в условиях циклического нагружения без разрушения в течение заданного промежутка времени или определении ресурса работы конструкции до ее полного разрушения.

Сравнительные испытания проводились на одной частоте нагружения до окончательного излома. Задание требуемого условного напряжения обеспечивалось сменными грузами.

Результаты испытаний представлены на рисунке 3.

Проведенные по схеме кругового изгиба с вращением исследования на усталость выявили снижение усталостной долговечности. По рисунку 3 наблюдается, что длительность эксплуатации приводит к уменьшению несущей способности материала испытуемых фрагментов труб.

Испытания на ударный изгиб проводились согласно ГОСТ 9454-78 [10]. Для этой цели были изготовлены образцы с V-образным концентратором. Определение ударной вязкости производилось с помощью универсального электродинамического стенда CEAST 9340 с падающим грузом.

Зависимость ударной вязкости от времени эксплуатации металла представлена на рисунке 4.

Результаты показали, что при эксплуатации испытуемых труб происходит охрупчивание материала, приводящее к снижению величины ударной вязкости на 73 %.

Испытания по измерению твердости проводились твердомером Роквелла модели 574 по ГОСТ 9013-59 [11] по сечению стенок испытуемых труб.

Измерение осуществлялось вдавливанием алмазного конуса с последующим определением твердости по глубине получаемого отпечатка. Результаты измерений представлены на рисунке 5.

Результаты измерения показали, что распределение твердости по сечению стенки испытуемых фрагментов труб происходит следующим образом: наименьшая твердость со стороны края стенки трубы и наибольшая твердость в ее сердцевине, также наблюдается незначительное упрочнение по всему сечению в процессе эксплуатации.

Учитывая, что наиболее нагруженным узлом устройства стабилизации давления на приеме в УЭЦН является механизм перекрытия отверстия, который образует гидравлический канал между полостью насосно-компрессорных труб и затрубным пространством, был проведен расчет от действия осевой, изгибающей нагрузок и внутреннего давления, откуда следует, что условия прочности выполняются.

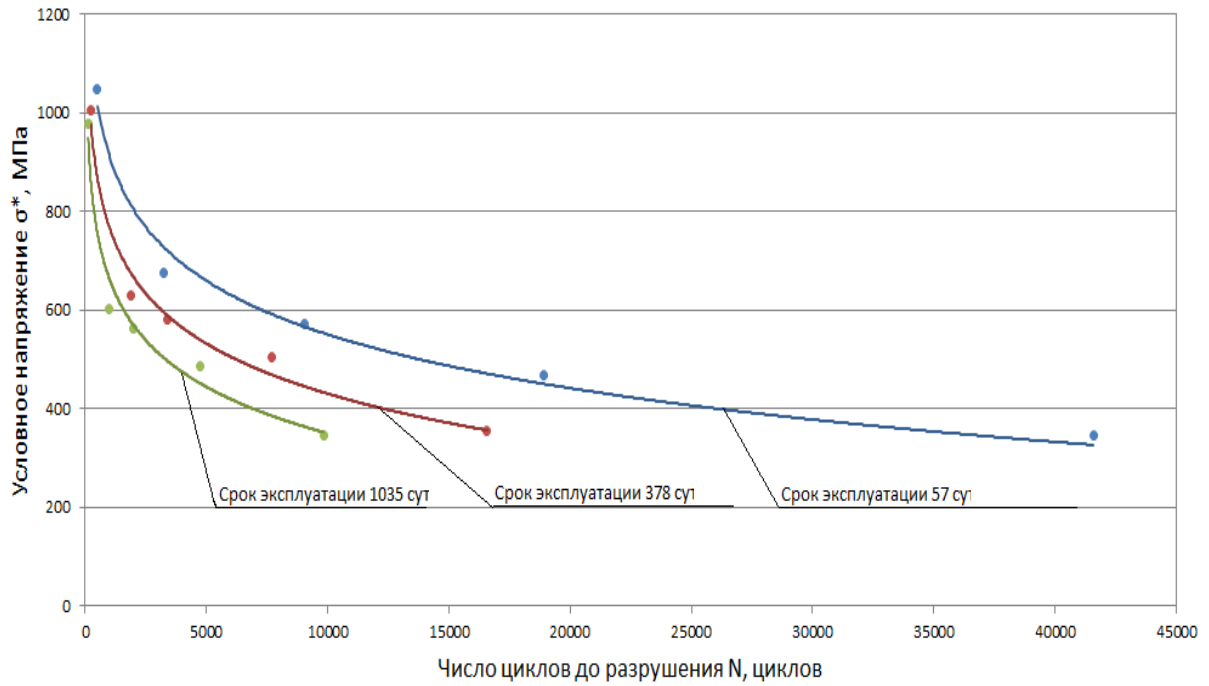


Рисунок 3. Графические зависимости кривых усталости при различной длительности эксплуатации материала фрагментов труб из стали 40X

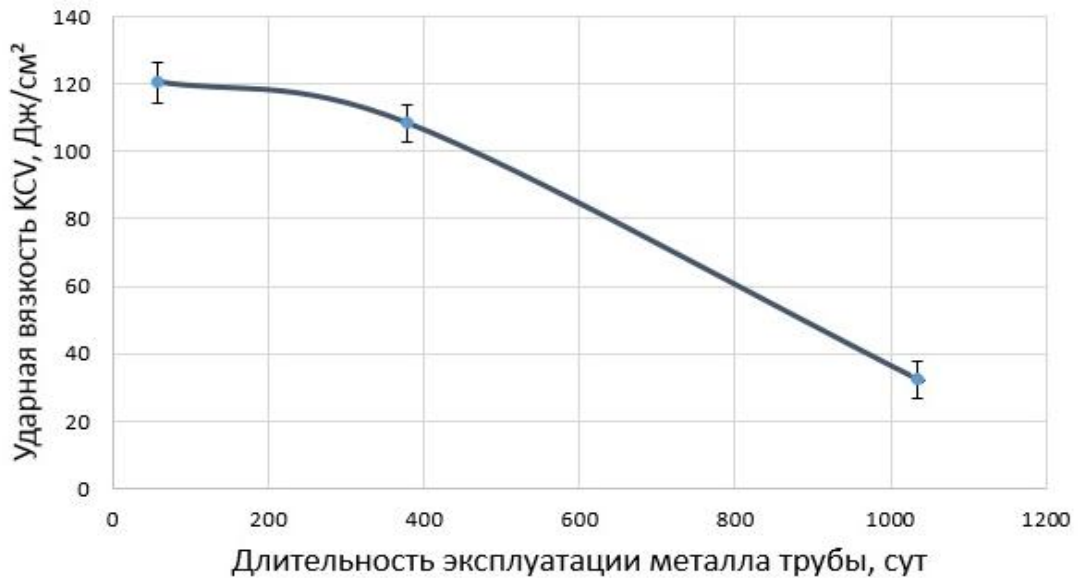


Рисунок 4. Зависимость ударной вязкости от времени эксплуатации металла

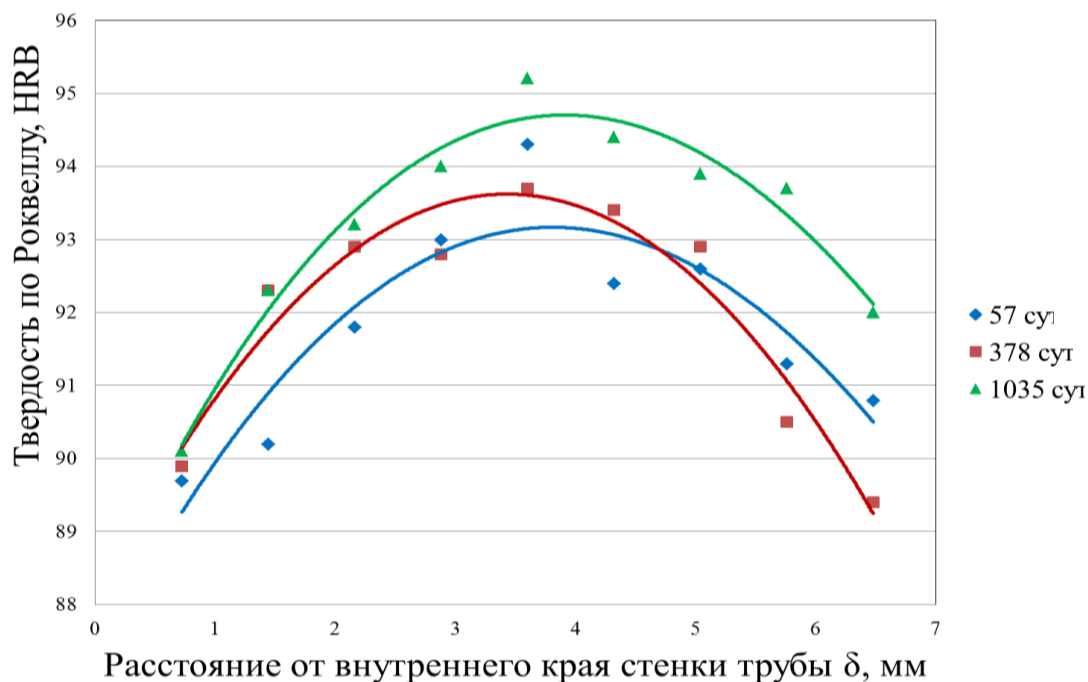


Рисунок 5. Распределение твердости по толщине стенки трубы с различным сроком эксплуатации (57, 378, 1035 сут)

Выводы

На основании того, что в настоящее время основным решением проблемы является способ эксплуатации УЭЦН в периодическом режиме, были предложены изготовление и внедрение конструкции установки устройства для стабилизации давления УЭЦН, при использовании которого возможна эксплуатация малодебитных скважин в непрерывном режиме, что позволит увеличить производительность насоса, межремонтный период и коэффициент полезного действия установки.

Проведенный анализ результатов испытаний на растяжение и испытаний на ударный изгиб показал, что происходит снижение предела прочности и предела текучести на 20 % и 6 % соответственно, а также происходит снижение ударной вязкости на 73 %. На наш взгляд, такое существенное снижение механических характеристик обусловлено тем, что в процессе эксплуатации формируются значительные силовые воздействия, вызванные

растягивающими и изгибными нагрузками знакопеременного характера. Кроме этого, имеет место вибрационное воздействие.

Результаты твердометрии показали, что твердость по сечению стенки испытуемых фрагментов труб распределена неравномерно: наибольшее значение наблюдается в сердцевине, а по краям стенки трубы - снижение, также зарегистрировано незначительное повышение твердости при увеличении длительности эксплуатации.

Исследования на усталость, проводимые по схеме кругового изгиба с вращением, выявили снижение усталостной долговечности.

Проведенный расчет действия осевой сжимающей нагрузки и внутреннего давления данного узла показал, что возникающие нагрузки в зонах концентрации напряжений не превышают допустимых значений, следовательно, безопасность эксплуатации узла устройства стабилизации давления на приеме в УЭЦН обеспечена.

Список литературы

1. Уразаков К.Р., Жулаев В.П., Булюкова Ф.З., Молчанова В.А. Насосные установки для малодобитных скважин. Уфа: УГНТУ, 2014. 236 с.
2. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Кудашев Р.Р., Рябов А.А., Коновалов В.В. Изменения механических характеристик материала гибких насосно-компрессорных труб в условиях циклического нагружения // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКР. 2015. Т. 2. № 2. С. 47-53. DOI: 10.5510/OGP20150200242.
3. Уразаков К.Р. Проблемы эксплуатации механизированного фонда скважин Западной Сибири и пути их решения // Нефтяное хозяйство. 1996. № 4. С. 72-74.
4. Уразаков К.Р. Механизированная добыча нефти (сборник изобретений). Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. 327 с.
5. Пат. 2592590 РФ, МПК Е 21 В 43/12. Способ эксплуатации малодобитной скважины / К.Р. Уразаков, В.А. Байков, А.С. Топольников, С.И. Казетов. 2015116629/03, Заявлено 29.04.2015; Опубл. 27.07.2016. Бюл. 21.
6. Пат. 2515643 РФ, МПК Е 21 В 43/00. Способ эксплуатации обводненной нефтяной скважины / К.Р. Уразаков, В.А. Байков, Т.С. Усманов, М.М. Зарипов, Р.З. Зулкарниев, В.В. Мальцев, И.С. Афанасьев. 2013104770/03, Заявлено 04.02.2013; Опубл. 20.05.2014. Бюл. 14.
7. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: ИПК Стандартиформ, 2005. 26 с.
8. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1993. 6 с.
9. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1986. 25 с.
10. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 2003. 12 с.
11. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. М.: Изд-во стандартов, 2001. 9 с.

References

1. Urazakov K.R., Zhulaev V.P., Bulyukova F.Z., Molchanova V.A. *Nasosnye ustanovki dlya malodebitnykh skvazhin* [Pumping Stations for Low-Yield Wells]. Ufa, UGNTU Publ., 2014. 236 p. [in Russian].
2. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Kudashev R.R., Ryabov A.A., Konvalov V.V. *Izmeneniya mekhanicheskikh kharakteristik materiala gibkikh nasosno-kompressornykh trub v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya* [Change of Mechanical Behavior of Elastic Tubing Material in Periodic Loading Conditions]. *Nauchnye trudy NIPI Neftgaz GNKAR - SOCAR Proceedings*, 2015, Vol. 2, No. 2, pp. 47-53. DOI: 10.5510/OGP20150200242 [in Russian].
3. Urazakov K.R. *Problemy ekspluatatsii mekhanizirovannogo fonda skvazhin Zapadnoi Sibiri i puti ikh resheniya* [Problems of Operation of the Mechanized Well Fund in Western Siberia and Ways to Solve Them]. *Neftyanoe khozyaistvo - Oil Industry*, 1996, No. 4, pp. 72-74. [in Russian].
4. Urazakov K.R. *Mekhanizirovannaya dobycha nefii (sbornik izobretenii)* [Mechanized Oil Production (Collection of Inventions)]. Ufa, Neftgazovoe delo Publ., 2010. 327 p. [in Russian].
5. Urazakov K.R., Baikov V.A., Topol'nikov A.S., Kazetov S.I. *Sposob ekspluatatsii malodebitnoi skvazhiny* [Method of Operating a Low-Yield Well]. Patent RF, No. 2592590, 2016. [in Russian].
6. Urazakov K.R., Baikov V.A., Usmanov T.S., Zarirov M.M., Zul'karniev R.Z., Mal'tsev V.V., Afanas'ev I.S. *Sposob ekspluatatsii obvodnennoi nefyanoi skvazhiny* [Method of Operation of a Watered Oil Well]. Patent RF, No. 2515643, 2014. [in Russian].
7. *GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniya na rastyazhenie* [State Standard 1497-84. Metals. Methods of Tension Test]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 26 p. [in Russian].
8. *GOST 9651-84. Metally. Metody ispytaniya na rastyazhenie pri povyshennykh temperaturakh* [State Standard 9651-84. Metals. Methods of Tension Tests at Elevated Temperatures]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1993. 6 p. [in Russian].
9. *GOST 25.502-79. Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniya metallov. Metody ispytaniya na ustalost'* [State Standard 25.502-79. Strength Analysis and Testing in Machine Building. Methods of Metals Mechanical Testing. Methods of Fatigue Testing]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1986. 25 p. [in Russian].
10. *GOST 9454-78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyi izgib pri ponizhennykh, komnatnoi i povyshennykh temperaturakh* [State Standard 9454-78. Metals. Method for Testing the Impact Strength at Low, Room and High Temperature]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2003. 12 p. [in Russian].
11. *GOST 9013-59. Metally. Metod izmereniya tverdosti po Rokvellu* [State Standard 9013-59. Metals. Method of Measuring Rockwell Hardness]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2001. 9 p. [in Russian].

Авторы

• Латыпов Ильдар Наилевич
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Магистрант кафедры «Технологические машины
и оборудование»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: latypov.ildar.1995@mail.ru

• Наумкин Евгений Анатольевич, д-р техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Технологические машины
и оборудование»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: ynaumkin@mail.ru

• Уразаков Камил Рахматуллович, д-р техн. наук,
профессор
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Машины и оборудование
нефтегазовых промыслов»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: urazakk@mail.ru

• Тугунов Павел Михайлович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Ассистент кафедры «Машины и оборудование
нефтегазовых промыслов»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: PavelTugunov@gmail.com

The Authors

• Latypov Ildar N.
Ufa State Petroleum Technological University
Undergraduated Student of Process Machinery
and Equipment Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail latypov.ildar.1995@mail.ru

• Naumkin Evgeniy A., Doctor of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Process Machinery
and Equipment Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: ynaumkin@mail.ru

• Urazakov Kamil R., Doctor of Engineering
Sciences, Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Oil and Gas Field Machinery
and Equipment Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: urazakk@mail.ru

• Tugunov Pavel M.
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant of Oil and Gas Field Machinery
and Equipment Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: PavelTugunov@gmail.com