

УДК 622.24.053

**К вопросу оптимизации применения герметизирующего оборудования
в нагнетательной скважине при импульсной
продолжительной закачке воды**

М. Я. Хабибуллин

*Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета,
г. Октябрьский, Россия
e-mail: m-hab@mail.ru*

Аннотация. При определении работоспособности уплотнительных элементов необходимо учитывать общее перемещение пакера в процессе эксплуатации до повреждения уплотнительных элементов при фиксации нарушения герметичности в затрубном пространстве. Следует отметить, что с увеличением частоты и амплитуды давления закачиваемых импульсов жидкости прямо пропорционально увеличивается пройденный путь. По предварительным подсчетам средние значения объемов утечки закачиваемых жидкостей находятся в диапазоне $0,005 \dots 0,1 \text{ см}^3/\text{м}^2$ с преобладанием вероятных утечек на уровне $0,05 \text{ см}^3/\text{м}^2$. В результате предварительных подсчетов было получено, что средняя работоспособность механических пакеров при нестационарном импульсе заводнения до выявления значительных утечек составила $30\,000 \dots 50\,000 \text{ км}$. Необходимо учитывать, что с увеличением частоты и амплитуды давления импульсов в закачиваемой жидкости уменьшаются работоспособность и долговечность уплотнения пакера. В данной работе предлагаются рекомендации по повышению надежности работы пакеров для длительной импульсной закачке воды в нагнетательные скважины.

Ключевые слова: импульсная закачка; импульсное забойное устройство; смазка полужидкостная; смазка жидкостная; температура; гаситель

**To the issue of optimizing the application of the sealing equipment
in the injection well at the long-term pulsed water injection into it**

Marat Ya. Khabibullin

*Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky, Russia
e-mail: m-hab@mail.ru*

Abstract. When determining the operability of the sealing elements, it is necessary to take into account the overall movement of the packer during operation, which it passes before the damage of the sealing elements when fixing the leakage failure in the annulus. It should be noted that as the frequency and the amplitude of the pressure of injected liquid pulses increase, the distance travelled increases proportionately. According to preliminary calculations, the average leakage volumes of injected fluids are in the range $0,005 \dots 0,1 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ with the prevalence of possible leakages at the level of $0,05 \text{ cm}^3/\text{m}^2$. As a result of preliminary calculations, it was found that the average performance of mechanical packers in the case of non-stationary waterflooding impulse before identifying significant leaks was $30,000 \dots 50,000 \text{ km}$. It should be taken into account that with increasing frequency and amplitude of the pressure of pulses in the injected fluid, the operability and lon-

gevity of the packer seal reduce. The article suggests recommendations for improving the reliability of packers for long-term pulsed water injection into injection wells.

Key words: impulse injection; pulsed downhole device; semi-fluid lubrication; fluid lubrication; temperature; absorber

Введение

Основным узлом пакеров считается уплотнительный элемент, важность которого характеризуется герметизирующей возможностью. Для обеспечения данного фактора определяют тип уплотнительного элемента и конструкцию пакера, которые составляют подземную часть скважинного оборудования, включая и устройства, создающие импульсную закачку жидкости в пласт.

При применении импульсных забойных устройств в результате перекрытия основного отверстия рабочими органами в колонне труб столб жидкости колеблется. Колебания в закачиваемой жидкости передаются колонне труб и герметизирующему устройству [1–8]. Перемещение пакера нарушает изоляцию затрубного пространства в нагнетательной скважине.

Объект и методы исследования

При выборе уплотнительного элемента и конструкции пакера необходимо учитывать, что при импульсной закачке жидкости в скважину давление на уплотнительные элементы распределяется неравномерно. Вследствие этого изменяются смазочные возможности контактирующих элементов пакера и эксплуатационной колонны. Данные процессы, происходящие в уплотнительных элементах, при жидкой смазке описываются эластогидродинамической теорией [9, 10]. Данную теорию возможно распространить и на другие режимы работы уплотнителей пакера с учетом некоторых допущений. Для этого необходимо ввести специальные функции Ψ_1 и Ψ_2 , учитывающие режим трения при перемещении уплотнительных элементов вверх и вниз. Принятые функции являются безразмерными и характеризуют форму уплотнительных элементов. При высоком давлении закачиваемой жидкости $p > 5$ МПа уплотнения работают в условиях полужидкостной смазки. В этом случае герметичность обеспечивают за счет большого коэффициента нагруженности ($b > 0,7$), а ресурс — за счет лучших антифрикционных материалов уплотнения. При перемещении пакера между эксплуатационной колонной и уплотнительными элементами выносятся тонкая гидрофобная пленка смазывающейся жидкости. Для определения объема утечки за один двойной ход пакера вверх и вниз в первом приближении, учитывая специальные функции, можно использовать выражение [11, 12]

$$V = 0,5\pi DS (\Psi_1\delta_1 - \Psi_2\delta_2) = 0,5\pi DS\Delta h, \quad (1)$$

где D — наружный диаметр уплотнения пакера, мм; S — длина хода уплотнения, мм; Ψ_1, Ψ_2 — безразмерные коэффициенты; δ_1, δ_2 — толщина жидкостной пленки при движении уплотнительных элементов вверх и вниз, мм; Δh — эквивалентная толщина пленки, мм.

Толщину пленки можно представить как функцию критерия режима: $\delta_1 = F(G_1)$ и $\delta_2 = F(G_2)$. При работе уплотнений пакеров возможны сочетания различных режимов смазки при движении колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) вверх и вниз. Соответствие значений функций Ψ_1 и Ψ_2 режимам

смазки показано на рисунке 1 [13, 14]: при граничной смазке и смазке при трении без смазочного материала $\Psi \approx 0$ (I, II, III); при полужидкостной смазке $0 < \Psi < 1$ (IV); при жидкостной смазке $\Psi = 1$ (V). В режиме жидкостной смазки при определенном сочетании параметров v (скорость движения пакера вниз и вверх), μ (динамическая вязкость скважинной жидкости), p_k (контактное давление в уплотнении пакера) уплотнения могут работать без утечек. Скорости v_1 и v_2 при движении пакера вниз и вверх могут быть различными, поэтому при $v_2 > v_1$ может быть $\delta_1 < \delta_2$ и $V = 0$. Для обеспечения равенства $V = 0$ за счет равенства $\delta_1 = \delta_2$ необходимо назначить профиль сечения уплотнения пакера, обеспечивающий оптимальное распределение контактного давления вдоль уплотняющей поверхности.

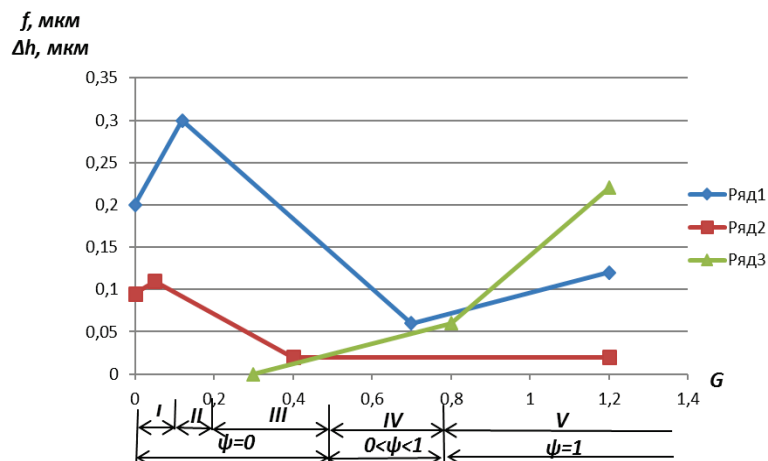


Рис. 1. Соответствие значений функций Ψ_1 и Ψ_2 режимам смазки для уплотнения пакера ПД-118: ряд 1 — коэффициент трения f при $p = 0$ МПа; ряд 2 — коэффициент трения f при $p = 4$ МПа; ряд 3 — значение эквивалентной толщины смазывающей пленки Δh

В процессе эксплуатации скважинного оборудования при соответствующей нагрузке на пакер, когда коэффициент нагруженности b выбирается исходя из условия герметизации затрубного пространства, соответствует полужидкостной смазке, когда $0 < \Psi < 1$ (IV) (интервал соответствует полужидкостной смазке). Значения специальных функций для данного случая будут составлять $\Psi \approx 0,3 \dots 1$.

Если уплотнение совершает ω двойных ходов в 1 с, то при $v_1 = v_2 = v$ (где v_1 — скорость движения уплотнения вниз; v_2 — то же вверх) удельный объем утечек численно равен эквивалентной толщине пленки:

$$\bar{V} = \frac{2V}{\pi DL} = \Delta h m, \quad (2)$$

где V — объем утечек, $\text{мм}^3/\text{с}$; D — наружный диаметр уплотнителя, мм; L — длина уплотнительного элемента, мм.

Экспериментальная часть/постановка эксперимента

Для движения пакера в одном направлении необходимо ввести в рассмотрение критерий \bar{h} (соответственно, $\bar{h}_1 = \delta_1/R_z$, $\bar{h}_2 = \delta_2/R_z$, где R_z — шерохова-

тость внутренней поверхности эксплуатационной колонны). Последний будет определять режим смазки в уплотнении и значение функции Ψ . Здесь могут быть различные сочетания этих значений в процессе работы пакера. Наиболее распространенный случай: при движении вниз $\delta_1 = F(p, v, \mu \dots)$ — сильная функция p ; при движении вверх $\delta_2 = F(E, k_\epsilon, \mu, v \dots)$ — слабая функция p (где E — модуль упругости материала уплотнения, МПа; k_ϵ — коэффициент, определяющий контактное давление p_k). Режим жидкостной смазки (V) возникает, когда критерий $\bar{h} \geq 0,8 \dots 1$; полужидкостной (IV) — $0,5 < h < 0,8$ (см. рис. 1). Влияние параметров режима трения на удельный объем утечек наглядно выявляется, если уравнение (1) представить в следующем виде:

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{\mu v d}{E k_\epsilon}} \left(\Psi_1 A \sqrt{e^{ap}} - \frac{\Psi_2 B}{\sqrt{E k_\epsilon + c p^\gamma}} \right), \quad (3)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости, МПа·с; v — скорость движения уплотнения, мм²/с; d — определяющий размер уплотнения, мм; E — модуль упругости материала уплотнения, МПа; a — пьезокоэффициент вязкости; p — давление рабочей среды, МПа; $A, B, c, \gamma, k_\epsilon$ — коэффициенты.

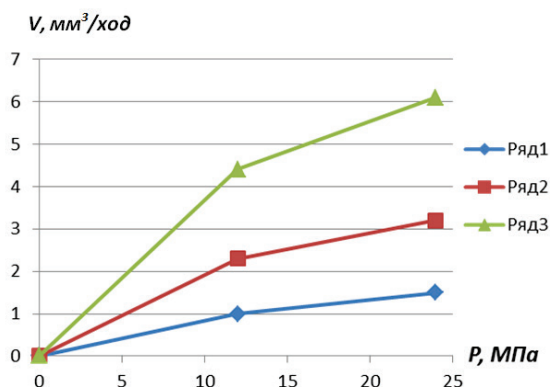


Рис. 2. Зависимость объема утечек от давления на выходе из импульсного устройства:
 ряд 1 — при $v = 0,05$ м/с;
 ряд 2 — при $v = 0,1$ м/с;
 ряд 3 — при $v = 0,2$ м/с

На рисунках 2–5 приведены графические зависимости толщины пленки Δh , объема утечек \bar{V} и силы трения P_f от параметров p и v .

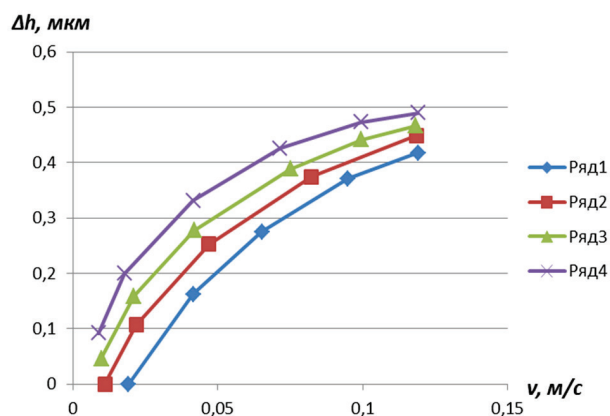
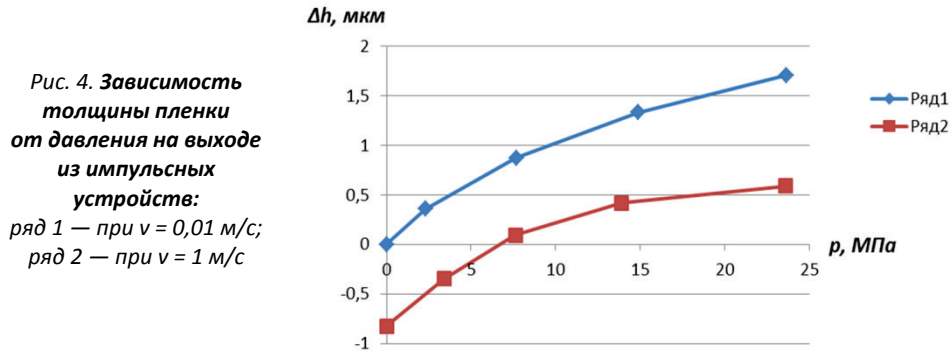
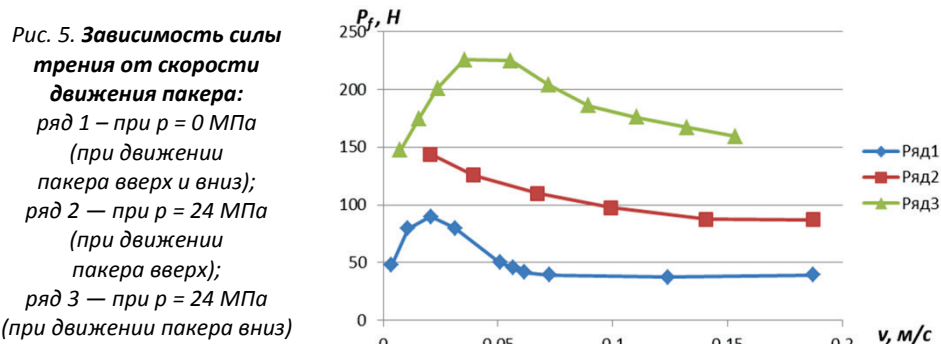


Рис. 3. Зависимость толщины пленки от скорости движения пакера:
 ряд 1 — при $p = 10$ МПа;
 ряд 2 — при $p = 20$ МПа;
 ряд 3 — при $p = 30$ МПа;
 ряд 4 — при $p = 40$ МПа

На основе предварительных выводов необходимо объем удельных утечек в затрубном пространстве определять как отношение совокупных утечек к наружной образующей поверхности контактирования уплотнительных элементов пакера с эксплуатационной колонной при его движении.



При определении работоспособности уплотнительных элементов необходимо учитывать общее перемещение пакера в процессе эксплуатации до повреждения уплотнительных элементов при фиксации нарушения герметичности в затрубном пространстве.



Следует отметить, что с увеличением частоты и амплитуды давления закачиваемых импульсов жидкости прямо пропорционально увеличивается пройденный путь. По предварительным подсчетам средние значения объемов утечки закачиваемых жидкостей находятся в диапазоне $0,005 \dots 0,1$ см³/м² с преобладанием вероятных утечек на уровне $0,05$ см³/м². В результате предварительных подсчетов было получено, что средняя работоспособность механических пакеров при нестационарном импульсе заводнения до выявления значительных утечек составила $30\ 000 \dots 50\ 000$ км. Необходимо учитывать, что с увеличением частоты и амплитуды давления импульсов в закачиваемой жидкости уменьшаются работоспособность и долговечность уплотнения пакера.

Результаты

При определении необходимых размеров уплотнительных элементов пакеров и рабочих параметров μ , v , p следует учитывать практические данные в результате применения пакеров при импульсной закачке.

С учетом этой утечки в уплотнении пакера ориентировочно можно определить значение специальных функций Ψ , соответствующих полужидкостной смазке (0,3...1,0) по упрощенному выражению, полученному из уравнения (3) (при интерполяции зависимостей $\bar{V}(p)$ на $\bar{V} \sim \sqrt{p}$ при сопоставлении графиков на рисунках 2 и 4),

$$V = V_0 \sqrt{\frac{\mu v p d}{\mu_0 v_0 p_0 d_0}}, \quad (4)$$

где V_0, μ_0, p_0, d_0 — установленные на практике значения.

Приведенное выражение позволит сопоставлять данные разовых исследований со средними промысловыми значениями. Для уплотнительных элементов пакеров базовыми условиями целесообразно считать $p = 10,0 \dots 11,0$ МПа; $\mu = 9,5 \dots 11,5$ МПа·с; $v = 0,5 \dots 0,25$ м/с.

Механизм трения между уплотнительными элементами пакера и поверхностью эксплуатационной колонны характеризуется составом закачиваемой жидкости, процессами физико-механических и физико-химических явлений при нестационарном импульсном заводнении. Когда происходит изменение значений p, v, μ, δ до фиксированных границ режимы трения могут переходить от одного состояния к другому. При режимах граничного и полужидкостного трения (особенно характерно для пакеров с учетом значительных давлений закачки жидкости в скважину) с учетом лабораторных данных используется выражение для определения значений коэффициентов при трении (при инженерных исследованиях)

$$f_{\text{тр}} = A \cdot p^{-2/3} \cdot v^{-0,4} \cdot \mu^{-1/6}, \quad (5)$$

где A — комплексный коэффициент, характеризующий составы материалов эксплуатационной, закачиваемой жидкости, шероховатостей поверхностей и материалов уплотнительных элементов (выбирается по экспериментальным таблицам).

Полученное выражение в первом приближении позволит сопоставить зависимости коэффициентов трений конкретной конструкции пакера от давлений закачки, скоростей скольжений (учитываются частота и амплитуда импульсов закачиваемых жидкостей), составов материалов и конструктивных особенностей уплотнительных элементов. При сопоставлении известных материалов считается, что уплотнительные элементы, изготовленные из комбинированного материала (резинотканевые — это основной материал уплотнительных элементов пакеров), обладают повышенной прочностью и работоспособностью при высоких давлениях по сравнению с простыми (резиновыми) [15].

Комбинированные материалы уплотнений, которые имеют структурно-слоистую форму, обладают анизотропностью и улучшенными фрикционными свойствами. Данные материалы в составе имеют армирующие ткани, которые смачиваются закачиваемой жидкостью, и смазочные материалы. Они принимают участие в процессах трений и влияют на снижение коэффициентов трений f . Из анализа данных, взятых в работе [15], получены следующие закономерности:

- резиновые материалы имеют больший коэффициент трения;
- при возрастании значений p и v уменьшается величина силы трения P_f ; с увеличением в уплотнительных элементах количества манжет n возрастает значение силы трения P_f , а величина коэффициента трения уменьшается;

- с увеличением осевого давления на манжеты $P_{к0}$ пропорционально возрастают коэффициенты трения всех конструкций уплотнительных материалов.

Обсуждение

Для того чтобы оценить все эксплуатационные преимущества существующих групп уплотнительных элементов, необходимо придерживаться критериев. Предлагается использовать следующие виды: герметичность (\bar{V}), наработка ($W = 2Sn$), диапазон температуры работы уплотнительных элементов ($\Delta t = t_1 - t_2$). Если сравнивать уплотнительные элементы пакеров с подвижными соединениями, то можно применить следующие критерии [16]:

- условная удельная мощность на уплотнения пакера, Вт/м²

$$\bar{N} = p \cdot v, \quad (6)$$

- относительная работа уплотнения до выхода из строя, Дж/м²

$$\bar{A} = p \cdot L, \quad (7)$$

- удельные потери мощности, Вт/м², и работы, Дж/м²

$$Nf = f \cdot \bar{N}, \quad Af = f \cdot \bar{A}. \quad (8)$$

Высокогерметичные уплотнения имеют меньший ресурс наработки за счет значительного трения трущихся поверхностей и изнашивания. Для оценки основных качественных показателей с учетом выводов, представленных в выражениях (3, 4, 7), предлагается использовать универсальный критерий — время наработки на удельный объем утечек в уплотнении, который будет объективно отражать совершенство движущихся уплотнительных элементов:

$$C = \frac{\Delta t}{100} \sum_i \frac{\bar{A}(m)}{\bar{V}(m)},$$

где $\frac{\Delta t}{100}$ — относительный диапазон рабочих температур уплотнительных элементов; $\bar{A}(m)$, $\bar{V}(m)$ — фиксированные показатели работы уплотнения и объема утечек; $m = S/W_{max}$ (S — пройденный путь уплотнения; W_{max} — предельная наработка).

Изменение утечки от первоначального \bar{V}_0 до максимального значений \bar{V}_{max} по мере относительной наработки m для уплотнительных элементов подчиняется степенной зависимости

$$\bar{V} = \bar{V}_{0+\Delta} \bar{V}_m^n. \quad (9)$$

На основании выражения (9) были получены графические зависимости удельных утечек через уплотнения пакеров при различных количествах манжет в уплотнении. С учетом различных условий эксплуатации пакеров в уравнении (9) необходимо принимать: $n \approx 3$ и $m \approx 0,5$ — для нарушения режима

смазки (неблагоприятные условия); $n \geq 6$ и $m \approx 0,7...0,8$ — при жидкой смазке (благоприятные условия).

После упрощения выражения (9) оно, соответственно, принимает вид

$$C = k \frac{\Delta t}{100} \frac{\bar{A}}{\bar{V}_{\max}}, \quad (10)$$

где k — коэффициент интенсивности увеличения утечек за время предельной наработки; для приближенной оценки универсального критерия его можно определить $k = m \frac{\bar{A}}{\bar{V}_0} + (1 - m) \frac{\bar{A}}{\bar{V}_{\max}}$ (где для работы уплотнительных элементов пакера на участке I $m = 0,5...0,8$).

Выводы

Прогнозировать время работы уплотнений пакеров необходимо с учетом результата испытаний при увеличении рабочих температур. Результаты, полученные при ускоренных испытаниях, необходимо интерполировать на условия эксплуатации пакеров в скважинах с применением уравнений, характеризующих химические реакции и диффузию. Негерметичность уплотнения пакера будет зависеть от контактного давления, которое за счет релаксации напряжения в материале уплотнений уменьшается после установки пакера в скважину (порядка 3...5 часов) и в дальнейшем по мере эксплуатации в результате старения и износа материала. Данный процесс необходимо учитывать при изменении рабочих температур эксплуатации и длительном нестационарном заводнении пластов (движение пакера с уплотнением при продолжительной импульсной закачке жидкостей в скважину). Это необходимо для установления длительности нормальной работоспособности пакера.

В результате приведенных условий эксплуатации пакеров возникает необходимость установки над забойным импульсным устройством гасителя колебаний жидкости. При продолжительной импульсной закачке воды в нагнетательные скважины применение данных устройств позволит повысить надежность герметизации затрубного пространства и эффективность заводнения углеводородных пластов.

Библиографический список

1. Khabibullin M. Ya., Suleimanov R. I. Selection of optimal design of a universal device for nonstationary pulse pumping of liquid in a reservoir pressure maintenance system // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 54, Issue 3–4. – P. 225–232. – Available at: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0467-2>.
2. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г., Абдюкова Р. Я. Оптимизация процесса вытеснения нефти при стационарной импульсной закачке воды // Нефтепромышленное дело. – 2014. – № 3. – С. 24–28.
3. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Сидоркин Д. И. Лабораторно-теоретические исследования работы двухбалансирной конструкции устройства для импульсной закачки жидкости в скважину // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 5. – С. 109–113. DOI: 10.31660/0445-0108-2016-5-109-113
4. Parameters of Damping of Vibrations of Tubing String in the Operation of Bottomhole Pulse Devices / M. Ya. Khabibullin [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, Issue 5–6. – P. 378–384. – Available at: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0350-6>.

5. Хабибуллин М. Я., Сидоркин Д. И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2016. – Т. 3. – № 3. – С. 27–32.
6. Коннов Ю. Д., Сидоркин Д. И., Хабибуллин М. Я. Механизация технологического процесса спускоподъемных операций при текущем и капитальном ремонте скважин // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2018. – № 2. – С. 15–24.
7. Исследование напряженного состояния колонны насосно-компрессорных труб при работе импульсных устройств / М. Я. Хабибуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 4. – С. 94–99. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-4-94-99
8. Параметры гашения колебаний колонны насосно-компрессорных труб при работе забойных импульсных устройств / М. Я. Хабибуллин [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 19–23.
9. Мур Д. Трение и смазка эластомеров / Пер. с англ. Г. И. Бродского. – М.: Химия. – 1977. – 262 с.
10. Крагельский И. В. Трение и износ: справочник в 2 т. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 480 с.
11. Крагельский И. В., Добыгин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
12. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчеты в теоретической и прикладной механике. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – 94 с.
13. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Филимонов О. В. Повышение эффективности разовых гидроимпульсных обработок призабойной зоны нагнетательных скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 6. – С. 113–117. DOI: 10.31660/0445-0108-2017-6-113-117
14. Варианты импульсного нестационарного заводнения в блоковых системах разработки / М. Я. Хабибуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 5. – С. 99–103. DOI: 10.31660/0445-0108-2017-5-99-103
15. Орлов З. Д., Орлов Г. С., Чайская Л. П. Резинотканевые уплотнения. – М.: ЦНИИ-Тэнефтехим, 1979. – 80 с.
16. Кондаков Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.

Сведения об авторе

Хабибуллин Марат Яхиевич, к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, e-mail: m-hab@mail.ru

Information about the author

Marat Ya. Khabibullin, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Otktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technological University, e-mail: m-hab@mail.ru