Таким образом, найдено решение задачи о полях концентрации веществ при кислотном воздействии на нефтегазовые пласты, на основании чего построены формулы для расчетов пористости, плотности раствора соляной кислоты и продуктов реакции. В отличие от известных, найденные точные и приближенные зависимости учитывают начальные пространственные распределения исследуемых параметров. Это позволяет использовать полученные формулы при расчетах пространственно-временных распределений пористости, достигаемых на этапах выдержки при многократной циклической закачке.

Библиографический список

1. Filippov A. I., Kabirov I. F., Karimov A. R. Account of the number of stages and of cyclicity in the problem on acidic stimulation of an oil-bearing stratum// Journal of engineering physics and thermophysics. – 2015. – Vol. 88, Issue 4. – P. 848–857.
2. Температурные поля при кислотном воздействии на нефтегазовые пласты / А. И. Филиппов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 2. – С. 510–518.
3. Глущенко В. Н. Нефтепромысловая химия в 5 т. / Под ред. проф. И. Т. Мищенко. – М.: Интерконтакт, Наука, 2009. – 706 с.
4. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
5. Сучков Б. М. Добыча нефти из карбонатных коллекторов. – Ижевск: НИЦ РХД, 2005. – 688 с.
6. Температурные поля при кислотной обработке нефтяных пластов / А. И. Филиппов [и др.] // Теоретические основы химических технологий. – 2008. – Т. 42, № 5. – С. 570–578.

Сведения об авторах

Филиппов Александр Иванович, *д. т. н., профессор кафедры общей и теоретической физики естественно-научного факультета, филиал Башкирского государственного университета, г. Стерлитамак, профессор кафедры общенаучных дисциплин, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Салават, тел. 9(987)0560226, e-mail: filippovai@rambler.ru*

Ковальский Алексей Алексеевич, *к. ф.-м. н., директор, филиал Башкирского государственного университета, г. Стерлитамак, тел. 9(927)2370555, e-mail: aakov68@mail.ru*

Кабиров Ильшат Файзелькавиевич, *младший научный сотрудник, Институт стратегических исследований Республики Башкортостан, г. Стерлитамак, тел. 8(3473)205970, e-mail: kabirov.ilshat@bk.ru*

Information about the authors

Filippov A. I., *Doctor of Engineering, Professor at the Department of General and Theoretical Physics of the Natural Science Faculty, Sterlitamak Branch of Bashkir State University, Professor at the Department of General Scientific Disciplines, Salavat Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 9(987)0560226, e-mail: filippovai@rambler.ru*

Kovalskiy A. A., *Candidate of Physics and Mathematics, Chief, Sterlitamak Branch of Bashkir State University, phone: 9(927)2370555, e-mail: aakov68@mail.ru*

Kabirov I. F., *Junior Researcher, Institute of Strategic Studies of the Republic of Bashkortostan, Sterlitamak, phone: 8(3473)205970, e-mail: kabirov.ilshat@bk.ru*

УДК 622.24.053

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ОТ ЗАКАЧИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ В СТРУКТУРЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

STUDY OF ABSORPTION OF PRESSURE WAVES FROM INJECTED FLUIDS IN THE ROCK STRUCTURE

М. Я. Хабибуллин, В. А. Петров, Л. В. Петрова, Р. Г. Хабибуллина

M. Ya. Khabibullin, V. A. Petrov, L. V. Petrova, R. G. Khabibullina

Филиал Уфимского государственного нефтянго технического университета, г. Октябрьский

Ключевые слова: деформация; напряжение; частота; коэффициент поглощения пород

Key words: deformation; tension; frequency; absorption coefficient of rocks

Проведенный анализ теоретических исследований в области распространения волн давления жидкости в пластах показал, что работы в данной области были направлены на изучение распространения самой жидкости в порах породы с точки зрения частоты колебания давления и ее амплитуды от перемещения. Изучение данного процесса, на наш взгляд, почти не поддается учету всех факторов и, следовательно, полученные результаты нельзя считать объективными [1–9]. Решающим фактором при воздействии гидравлическими импульсами является передача колебаний жидкости горной породе, считая, что горная порода, в свою очередь, на определенном удалении от источника возвращает их жидкости, поскольку поглощение колебаний самой закачиваемой жидкости происходит катастрофически. Из данного выбора следует, что определенный интерес вызывает изучение процесса распространения колебаний в неограниченной поглощающей среде, который служит основой для обсуждения поведения вещества, наблюдающегося при разнообразных условиях.

Напряжения, действующие на элементарный объем твердого тела, можно выразить в виде линейной комбинации деформацией с помощью закона Гука. Для изотропного твердого тела все константы пропорциональности могут быть выражены через два упругих модуля. Хотя модуль Юнга и коэффициент Пуассона — общепринятые упругие константы, мы будем использовать параметр Ламэ λ и модуль сдвига μ. Для изотропного тела, согласно [10] и с учетом упругих констант, связь между напряжением и деформацией имеет вид

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{xx} &= (\lambda+2\mu)l_{xx}+\lambda l_{yy}+\lambda l_{zz}\\ \sigma_{yy} &= \lambda l_{xx}+(\lambda+2\mu)l_{yy}+\lambda l_{zz}\\ \sigma_{zz} &= \lambda l_{xx}+\lambda l_{yy}+(\lambda+2\mu)l_{zz}\\ \sigma_{xy} &= \mu l_{xy}, \sigma_{yz}=\mu l_{yz}, \sigma_{zx}=\mu l_{zx}\end{aligned}\right\}, \quad (1)$$

где

$$\lambda = \frac{E\cdot\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (3)$$

E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона.

Чтобы выразить изменение напряжения между соседними точками элементарного объема, достаточно учесть величину, зависящую линейно от расстояния между точками. Очевидно, в этом приближении поверхностные силы, действующие на гранях элементарного объема, точно не уравновешаны. Для достижения равновесия необходимо добавить массовые силы, которые вызывают ускорение элементарного объема. Помимо поверхностных сил в среде существуют как гравитационные, так и объемные силы. Приравнивая сумму всех сил произведению массы на ускорение вдоль каждой из трех осей, получим уравнения изотропной среды

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial z}+G_x=\rho\frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2}\\ &\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z}+G_y=\rho\frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2}\\ &\frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z}+G_z=\rho\frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2}\end{aligned}\right\}, \quad (4)$$

где G_x, G_y, G_z — компоненты объемных сил.

Равенства (1) можно продифференцировать и подставить в уравнения изотропной среды для исключения напряжений. Если массовые силы приравнять к нулю, то уравнения движения, выраженные через смещения частиц, будут иметь вид

$$\left.\begin{aligned}
&(\lambda+2\mu)\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}+\mu\left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2}\right)+(\lambda+\mu)\left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x\,\partial y}+\frac{\partial^2 U_z}{\partial x\,\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2},\\
&(\lambda+2\mu)\frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2}+\mu\left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2}\right)+(\lambda+\mu)\left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x\,\partial y}+\frac{\partial^2 U_z}{\partial y\,\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2},\\
&(\lambda+2\mu)\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}+\mu\left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2}\right)+(\lambda+\mu)\left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x\,\partial z}+\frac{\partial^2 U_y}{\partial y\,\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2}.
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Строгое математическое решение полученных уравнений движений с учетом всего комплекса реальных граничных и начальных условий в неоднородных пластах, по-видимому, весьма сложно. Для рассмотрения иллюстраций основных характеристик упругих волн в безграничной среде предположим, что смещение осуществляется параллельно горизонтальной оси X (тогда $U_y=U_x=0$) и что U_x не зависит от y и z. Тогда система (5) сводится к одному уравнению в преобразованном виде

$$\frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2}=\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\cdot\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}, \tag{6}$$

которое соответствует волновому уравнению. Рассматривая колебания, распространяющиеся в положительном направлении, зависимость перемещения частиц можно представить в виде экспоненциального закона изменения

$$U(x)=U_0 e^{i\beta\omega\left(t-\frac{x}{a}\right)}, \tag{7}$$

где

$$a=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}.$$

Применяя метод разделения переменных, мы получили решение уравнения (6), которое представлено

$$U(x,t)=\sqrt{\frac{2}{l}}\sum_{i-1}^{\infty}\left\{a_i\cos\frac{i\pi a}{l}t+b_i\sin\frac{i\pi a}{l}\right\}\sin\frac{i\pi x}{l}, \tag{8}$$

где

$$a_i=\sqrt{\frac{2}{l}}\int_0^l U_0(x)\sin\frac{i\pi x}{l}dx,$$

$$b_i=\sqrt{\frac{2l}{i\pi a}}\int_0^l U_1(x)\sin\frac{i\pi x}{l}dx,$$

и удовлетворяет следующим начальным и граничным условиям

$$\left.\begin{aligned}
&U\big|_{t=0}=U_0(x)=U_0 e^{-i\omega\frac{x}{a}};\\
&U_t'\big|_{t=0}=U_1(x)=-U_0\frac{i\omega}{a}e^{-i\omega\frac{x}{a}};\\
&U\big|_{x=0}=0;\\
&U\big|_{x=l}=0.
\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Полученное уравнение (8) было проанализировано для двух видов горных пород. Для известняков были приняты следующие параметры [11]: модуль Юнга

— 2,45·10^{-4} МПа, коэффициент Пуассона — 0,32, плотность — 2,67 г/см^3; для песчаников: модуль Юнга — 6,7·10^{-4} МПа, коэффициент Пуассона — 0,33, плотность — 2,84 г/см^3. Изучение изменения амплитуды колебания проводилось в условных единицах в зависимости от пространственной характеристики, причем временная зависимость не учитывалась. В связи с тем что при анализе данного уравнения были выполнены два допущения, не позволяющие более качественно описать процессы изменения параметров колебаний в горной породе, необходимо отметить только то, что с увеличением значений частоты колебаний импульсов амплитуда смещения волны значительно уменьшается, причем данная тенденция наблюдалась при превышении значения ω = 1 кГц.

Однако при более подробном анализе явления распространения волн в неограниченной поглощающей среде появляется ряд связанных между собой величин, характеризующих потерю энергии, таких как сдвиг фазы между напряжением и деформацией, относительная потеря энергии на период, коэффициент поглощения и логарифмический декремент. Все эти величины могут называться параметрами поглощения. Для заданного параметра поглощения требуются две независимые величины, описывающие потери энергии в изотропной среде, почти так же как две упругие константы, которые требуются для описания идеально упругой изотропной среды. Два параметра поглощения, характеризующие распространение плоской волны, позволяют интерпретировать поведение волн в тонком стержне или в тонкослоистой среде с поглощением, а также в резонаторах простой структуры [12]. Величины, полученные в различных экспериментах, могут сравниваться между собой путем приведения их к эквивалентным параметрам поглощения для плоских волн. Рассмотрение поведения волн в массиве горной породы, источником которых является закачиваемая жидкость, выявляет связь между поглощением и фазовой скоростью распространения колебаний, которая выполняется, если поглощающая среда удовлетворяет принципу причинности. Это рассмотрение обеспечивает возможность вычисления средних упругих констант и параметров поглощения для среды, содержащей поглощающие линейные неоднородности.

Стремление иметь хорошее физическое объяснение затухания волн породило массу работ с различными механизмами поглощения. Еще в 1848 году Дж. Г. Стокс предположил, что сжатие поглощаемого материала является чисто упругим, в то время как его сдвиг сопровождается вязкостью, схожей с вязкостью жидкости. Это предположение ведет к квадратичной зависимости коэффициента поглощения от частоты в низкочастотном диапазоне. Однако многие изменения указывали на линейную зависимость коэффициента поглощения от частоты. Многие исследователи связывали поглощение с сухим трением, которое, например, может сопровождать скольжение в области контактов между зернами. Было предложено понятие внутреннего трения для характеристики свойства твердого тела, которое выражается в том, что диаграмма напряжение — деформация содержит гистерезис. На этой модели следует линейная зависимость поглощения от частоты. Некоторые авторы показали, что измеряемое поглощение можно объяснить также термоупругостью, и при соответствующем подборе неоднородности в среде добиться удовлетворительного согласования с экспериментальными данными о зависимости поглощения от частоты.

Выше рассматривался один из широко известных методов учета поглощения на основе линейного волнового уравнения. Соответствующее предположение состоит в том, что напряжения прямо пропорциональны скорости изменения деформации, как и компонентам самой деформации. Учитывая изначальное утверждение, а результаты проведенных лабораторных экспериментов с допустимой погрешностью подтверждают это, представим зависимость деформации и напряжения на основе модифицированного закона Гука, включающего скорость изменения деформации [13].

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= (\lambda+2\mu)l_{xx} + \lambda l_{yy} + \lambda l_{zz} + (\lambda'+2\mu')\frac{\partial l_{xx}}{\partial t} + \lambda\frac{\partial l_{yy}}{\partial t} + \lambda'\frac{\partial l_{zz}}{\partial t},\\
\sigma_{yy} &= \lambda l_{xx} + (\lambda+2\mu)l_{yy} + \lambda l_{zz} + \lambda'\frac{\partial l_{xx}}{\partial t} + (\lambda'+2\mu')\frac{\partial l_{yy}}{\partial t} + \lambda'\frac{\partial l_{zz}}{\partial t},\\
\sigma_{zz} &= \lambda l_{xx} + \lambda l_{yy} + (\lambda+2\mu)l_{zz} + \lambda'\frac{\partial l_{xx}}{\partial t} + \lambda'\frac{\partial l_{yy}}{\partial t} + (\lambda'+2\mu')\frac{\partial l_{zz}}{\partial t},\\
\sigma_{xy} &= \mu l_{xy} + \mu'\frac{\partial l_{yy}}{\partial t},\\
\sigma_{yz} &= \mu l_{yz} + \mu'\frac{\partial l_{yz}}{\partial t},\\
\sigma_{zx} &= \mu l_{zx} + \mu'\frac{\partial l_{zx}}{\partial t}.
\end{aligned}\right\}, \tag{10}$$

где λ', μ' — параметры, характеризующие потери энергии.

Эта система уравнений соответствует системе уравнений (1) для идеально упругой среды. Выражения (4), характеризующие условие равновесия изотропной среды, остаются в силе. Следовательно, можно составить соответствующее уравнение движения, отличающееся от (5) слагаемым, зависящим от скорости деформации. Поведение продольной волны можно получить при помощи соответствующего аналога уравнения (6), в котором U_x представляет единственную компоненту смещения и в котором движение не зависит от координат y и z.

$$(\lambda+2\mu)\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + (\lambda'+2\mu')\frac{\partial^3 U_x}{\partial t\,\partial x^2} = \rho\frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2}. \tag{11}$$

Поскольку величина $\lambda + 2\mu$ представляет собой модуль плоского сжатия, то необходимо ввести следующие обозначения:

$$M = \lambda + 2\mu, \qquad M' = \lambda' + 2\mu'. \tag{12}$$

Тогда в преобразованном виде выражение (11) будет иметь вид

$$M\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + M'\frac{\partial^3 U_x}{\partial t\partial x^2} = \rho\frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2}. \tag{13}$$

Учитывая, что временная зависимость перемещения имеет экспоненциальный закон изменения, можно записать

$$U(t) = U_0 e^{i\omega t}. \tag{14}$$

Уравнение (13) решаем методом разделения переменных, и при каждом значении частоты ω функция $U_x(x,\omega)$, зависящая от пространственной координаты, должна удовлетворять следующему уравнению [14]:

$$(M + i\omega M')\frac{d^2 U}{dx^2} = -\rho\omega^2 U. \tag{15}$$

Зависимость от пространственной координаты X можно также представить экспоненциальной

$$U(x,\omega) = U_0 e^{\pm bx}. \tag{16}$$

Подставим выражение (16) в уравнение (15) и после преобразований получим

$$G = \sqrt{-\frac{\rho\omega^2}{M + i\omega M'}}. \tag{17}$$

Принимая во внимание условие причинности, а именно, что коэффициент поглощения k и фазовая скорость распространения колебаний c связаны между собой, то есть c должна зависеть от частоты, если k не равно нулю, следовательно, поглощающая среда обязана быть диспергирующей, можно комплексную величину G выразить через коэффициент поглощения и фазовую скорость

$$G = k + i\omega \frac{1}{c} . \tag{18}$$

Решая совместно выражения (17) и (18) и учитывая действительные и мнимые члены в конечном итоге, получаем выражения, характеризующие параметры проникновения волн в массиве горной породы,

$$k = \frac{\omega^2}{\omega_0 \sqrt{2\left(\frac{M}{\rho}\right)\left(1+\frac{\omega^2}{\omega_0{}^2}\right)\left(\sqrt{1+\frac{\omega^2}{\omega_0{}^2}}+1\right)}} , \tag{19}$$

$$c = \sqrt{\frac{2\left(\frac{M}{\rho}\right)\left(1+\frac{\omega^2}{\omega_0{}^2}\right)}{\sqrt{1+\frac{\omega^2}{\omega_0{}^2}}+1}} , \tag{20}$$

где

$$\omega_0 = \frac{M}{M'} . \tag{21}$$

На рисунке представлены результаты вычислений фазовой скорости распространения колебаний и коэффициента поглощения от частоты колебаний для наиболее распространенных видов пород [15]. Эти породы характеризуются следующими параметрами [11, 16]: глинистые сланцы (модуль Юнга — $2{,}1 \cdot 10^{-4}$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,15; плотность — 1,96 г/см^3), известняки (модуль Юнга — $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,32; плотность — 2,67 г/см^3), песчаники (модуль Юнга — $6{,}7 \cdot 10^{-4}$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,33; плотность — 2,84 г/см^3).

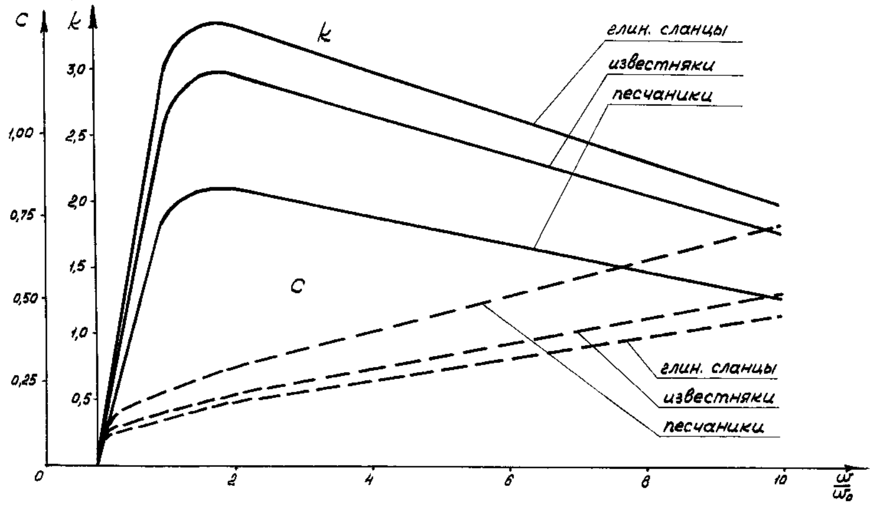

Рисунок. ***Зависимость фазовой скорости и коэффициента поглощения от частоты колебаний (в безразмерных величинах)***

Как видно из рисунка, коэффициент поглощения достигает максимальных значений в области резонансных частот, причем при дальнейшем увеличении частоты колебаний коэффициент поглощения уменьшается незначительно — такая закономерность характерна для представленных видов пород [17, 18]. На наш взгляд, наиболее оптимальным диапазоном частот для распространения колебаний в массиве горных пород являются значения 100 ... 800 Гц с учетом собственных частот рассматриваемых пород, что согласуется с выводами автора работы [19].

Библиографический список

1. Хабибуллин М. Я. Разработка вибротехники для эффективной закачки жидкости в нефтяной пласт // Автореф. дис. канд. техн. наук. – Уфа,1999. – 23 с.
2. Патент на изобретение RUS 2198288 12.10.1999. Способ закачки жидкости в нагнетательные скважины и устройство для его осуществления / Султанов Б. З., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я., Туйгунов М. Р.; заявл. 12.10.99; опубл. 10.02.03.
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.
4. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Давыдов А. Ю. Теоретические и лабораторные исследования работы устройства для импульсной закачки жидкости в скважину // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 3. – С. 16–21.
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. Патент на изобретение RUS 2241825 13.02.2003 Устройство для закачки жидкости / Гилаев Г. Г., Тухтеев Р. М., Хабибуллин М. Я., Ибраев Р. А.; заявл. 13.02.03; опубл. 10.12.04.
7. Хабибуллин М. Я., Шангареев Р. Р. Исследование процессов влияния давления и частоты импульсов на проникновение жидкости в песчанных образцах // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 4. – С. 120–125.
8. Хабибуллин М. Я. Экспериментально-теоретические исследования вытеснения нефти водой, с циклически изменяющейся амплитудой давления // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 6. – С. 233–241.
9. Хабибуллин М. Я., Арсланов И. Г. Параметры неустановившегося движения закачиваемой жидкости в колонне насосно-компрессорных труб при работе импульсных устройств // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 1. – С. 148–165.
10. Желтов Ю. Н. Механика нефтегазоносного пласта. – М.: Недра, 1975. – 216 с.
11. Спивак А. Н., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. для вузов. – 4-е изд., пераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
12. Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
13. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.
14. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчеты в теоретической и прикладной механике. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – 94 с.
15. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Применение электронных таблиц в расчетах нефтегазопромыслового оборудования // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию филиала. – Уфа, 2016. – С. 10–13.
16. Справочная книга по добыче нефти // Под ред. Ш. К. Гиматудинова. – М.: Недра, 1974. – 704 с.
17. Хабибуллин М. Я. Повышение эффективности методов заводнения в системе поддержания пластового давления // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2014: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. (Октябрьский, 25 марта 2014 г.) / Отв. ред. В. Ш. Мухаметшин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. – С. 392–397.
18. Хабибуллин М. Я. Повышение эффективности закачки жидкости в нагнетательные скважины // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2015: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. / Отв. ред. В. Ш. Мухаметшин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 161–167.
19. Гадиев С. М. Использование вибрации в добыче нефти. – М.: Недра, 1977. – 159 с.

Сведения об авторах

Хабибуллин Марат Яхиевич, *к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru*

Петров Вениамин Алексеевич, *к. т. н., доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, e-mail: npmo@mail.ru*

Петрова Лариса Вениаминовна, *к. т. н., доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)66030, e-mail: rrngm_304@mail.ru*

Хабибуллина Рауза Габдулловна, *старший преподаватель кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)66030, e-mail: npmo@mail.ru*

Information about the authors

Khabibullin M. Ya., *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru*

Petrov V. A., *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, e-mail: npmo@mail.ru*

Petrova L. V., *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Exploration and Development of Oil and Gas Fields, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)66030, e-mail: rrngm_304@mail.ru*

Khabibullina R. G., *Senior Lecturer at the Department of Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)66030, e-mail: npmo@mail.ru*