

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В КОЛОННЕ ТРУБ ПРИ УСТЬЕВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАКАЧКЕ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ

RESEARCH OF PROCESSES IN A PIPE STRING AT A WELLHEAD PULSE INJECTION OF LIQUID TO A WELL

М.Я. Хабибуллин
Marat Ya. Khabibullin

Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Филиал,
г. Октябрьский, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Branch, Oktyabrskiy, Russian Federation

При исследовании процессов, происходящих при движении импульсов давления в столбе закачиваемой импульсной жидкости от устья скважины до пласта, необходимо в качестве упрощения считать, что длина волны значительно превышает диаметр скважин. Данные условия выявляются во всех случаях, возникающих при рассмотрении импульсной нестационарной закачки жидкости. Необходимо учитывать динамическое решение при низкочастотном пределе и определять смещение сред при известных параметрах размеров и полей напряжений. Результаты проведенного анализа будут сравниваться с измерениями, полученными различными авторами. Полученные данные позволят аппроксимировать низкочастотный диапазон волн, с помощью чего можно будет с достаточной погрешностью определять требуемые параметры в ситуациях, где исследовать их точно невозможно.

Получено волновое уравнение, описывающее движение столба закачиваемой жидкости в толстостенной трубе, откуда следует, что столб закачиваемой жидкости в толстостенной трубе способен поддерживать импульсы любой волновой формы, проходящие в любом направлении без дисперсии или затухания. Также получены выражения для описания поведения импульсных волн, распространяющихся по стенке трубы. Отраженные волны появляются в любом случае: будет ли изменение скорости вызвано изменением толщины трубы, изменением модуля Юнга или изменением сдвиговой жесткости в окружающей среде. Изменения плотности или объемного модуля закачиваемой жидкости, или радиуса скважины тоже порождают отраженные волны, и все они могут быть объединены одним выражением.

При оценке фазовой скорости и затухания волн для четырех пористых пород видно, что на частотах ниже 100 Гц фазовая скорость уменьшается, а затухание очень сильное.

Studying the processes during the pressure pulses movement in the column of injected impulse liquid from the wellhead to the formation, it is necessary to assume, for simplification, that the wavelength significantly exceeds the diameter of the wells. These conditions are revealed in all cases of pulsed non-stationary liquid injection. It is necessary to take into account the dynamic solution at the low-frequency limit and to determine the displacement of the media with known parameters of size and voltage fields. The obtained results will be compared with the measurements got by various authors. The obtained data will allow to approximate the low-

Ключевые слова

импульс, импеданс,
закачиваемая жидкость,
фазовая скорость,
затухание волн

Key words

impulse, impedance,
injected liquid, phase velocity,
wave attenuation

frequency range of waves, with the help of which it will be possible with sufficient error to determine the required parameters in situations where it is impossible to investigate them.

A wave equation describing the motion of a column of a pumped liquid in a thick-walled tube is obtained, from which it follows that the column of a pumped liquid in a thick-walled tube is capable of supporting pulses of any waveform passing in either direction without dispersion or damping. Expressions are also obtained for describing the behavior of pulsed waves propagating along the pipe wall. Reflected waves appear in any case: when the change in velocity is caused by a change in pipe thickness, a change in Young's modulus, or a change in shear stiffness in the environment. Changes in the density or volumetric modulus of the injected fluid or well radius also generate reflected waves, and all of them can be combined in one expression.

When evaluating the phase velocity and wave attenuation for four porous rocks, it is seen that at frequencies below 100 Hz the phase velocity decreases and the damping is very strong.

При исследовании процессов, происходящих при движении импульсов давления в столбе закачиваемой импульсной жидкости от устья скважины до пласта [1-3], необходимо в качестве упрощения считать, что длина волны значительно превышает диаметр скважин. Данные условия выявляются во всех случаях, возникающих при рассмотрении импульсной нестационарной закачки жидкости. В нашем случае, учитывая динамическое решение при низкочастотном пределе, необходимо определить смещение сред при известных параметрах размеров и полей напряжений. Полученные результаты анализа будут сравниваться с измерениями, полученными различными авторами. Следует отметить, что полученные данные позволят аппроксимировать низкочастотный диапазон волн, с помощью чего можно будет с достаточной погрешностью определять требуемые параметры в ситуациях, где исследовать их точно невозможно.

В случае тонкой трубы, показанной на рисунке 1, звуковое давление и осевое смещение частиц рассматриваются в качестве функций только одной координаты и времени $p(z, t)$ и $u_z(z, t)$. Упругая отдача стенки приводит к некоторому радиальному движению, но градиенты радиального давления, сопровождающие это движение, слишком малы, чтобы изменить поршнеобразное перемещение вдоль трубы. Данное перемещение зависит от градиента давления в жидкости, которое можно определить, если приравнять силу и массу с учетом ускорения для определенной длины колонки закачиваемой импульсной жидкости [4, 5]:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} \Delta z\right) (\pi b^2) = -\rho (\pi b^2 \Delta z) \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где b — радиус скважины, м; ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Можно найти дополнительную связь между давлением и смещением, зная, что закачиваемая жидкость характеризуется объемным модулем B согласно выражению $p = -B(\Delta V/V)$. По мере того как давление растет, элементарная длина изменяется (рисунок 1).

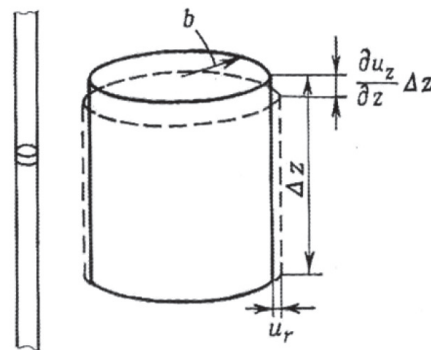


Рисунок 1. Изменение элементарного объема закачиваемой жидкости в скважине

Изменение объема состоит из двух частей: первой $-\pi b^2 (\partial u_z / \partial z) \Delta z$, обусловленной осевым движением, и второй $-2\pi b^2 \Delta z u_r$, обусловленной радиальным расширением стенки скважины. Деление суммы этих двух частей на объем $\pi b^2 \Delta z$ дает отношение между давлением и смещением:

$$\frac{p}{B} = \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{2u_r}{b}\right). \quad (2)$$

Это уравнение можно преобразовать в выражение, включающее только давление и смещение. Предполагая наличие низких частот или медленно изменяющихся импульсов давления, можно было бы ожидать, что радиальное движение находится в равновесии с давлением, существующим в каждый данный период времени. То же предположение о низких частотах позволяет считать, что на расстояниях в не-

сколько диаметров скважины в осевом направлении давление в значительной степени однородно. Учитывая эти ограничения, можно ожидать, что отношение между давлением и радиальным расширением стенки будет адекватно описываться теорией статической упругости. Л. Лэмб [6] получил радиальное смещение, обусловленное давлением во внутренние части толстостенной трубы, которая имеет внутренний b и внешний a радиусы и характеризуется модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν . Из полученных Л. Лэмбом соотношений можно вывести следующее выражение:

$$\frac{u_r}{b} = \frac{p}{E} \left[\frac{(1+\nu)(a^2+b^2)-2\nu b^2}{a^2-b^2} \right] = \frac{p}{2M}, \quad (3)$$

где u_r — радиальная деформация трубы, мм;
 M — модуль плоского деформирования, Па.

Подстановка этого уравнения в выражение (2) позволяет получить желаемое соотношение между давлением и осевым смещением:

$$p \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{M} \right) = - \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (4)$$

Дифференцируя уравнение (4) по z и подставляя его в выражение (1), получим волновое уравнение, описывающее движение столба закачиваемой жидкости в толстостенной трубе:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \left[\rho \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{M} \right) \right] \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что столб закачиваемой жидкости в толстостенной трубе способен поддерживать импульсы любой волновой формы $f(t - z/C_T)$ или $g(t + z/C_T)$, проходящие в любом направлении без дисперсии или затухания. Скорость трубных волн в толстостенной трубе

$$C_T = \left[\rho \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{M} \right) \right]^{-1/2}, \quad (6)$$

$$\text{где } M = \frac{E(a^2-b^2)}{2[(1+\nu)(a^2+b^2)-2\nu b^2]}.$$

Для тонкостенной трубы, толщина которой $h = (a - b)$, значения внутреннего и наружного радиусов почти равнозначны, а величина M стремится к значению $Eh/2b$. В этом случае скорость распространения волн определяется

$$C_T = \left[\rho \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{Eh/2b} \right) \right]^{-1/2}. \quad (7)$$

Для толстостенной трубы ее внешний радиус a существенно больше внутреннего b , а значение M приближается к модулю жесткости сдвига μ . Для определения скорости рас-

пространения волн давления используется следующее выражение:

$$C_T = \left[\rho \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{M} \right) \right]^{-1/2}. \quad (8)$$

Представляет интерес получить соотношение между давлением и движением частиц во флюиде. Если движение частиц рассматривать как импульс, проходящий в положительном направлении, то $u_z = f(t - z/C_T)$, тогда из формул (4) и (6) следует, что

$$p = \rho C_T f' \left(t - \frac{z}{C_T} \right), \quad (9)$$

где штрих указывает дифференцирование по переменной, заменяющей выражение в скобках. Далее определяем скорость частицы $v = f' \left(t - z/C_T \right)$.

Данные исследования соответствовали условиям, когда вокруг скважины находилась однородная среда. Далее рассмотрим условия распространения волн давления через границу двух упругих полупространств (рисунок 2).

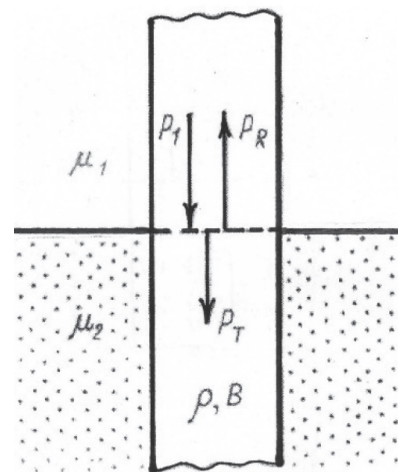


Рисунок 2. Схема направления волн в районе границы двух разных слоев породы

В этом случае возникают волны давления — отраженная и проходящая. Тогда можно предположить равенства (если учитывать непрерывность давления и скорость движения частицы):

$$p_1 + p_n = p_T \text{ и } p_1/\rho C_{T1} - p_R/\rho C_{T1} = p_T/\rho C_{T2},$$

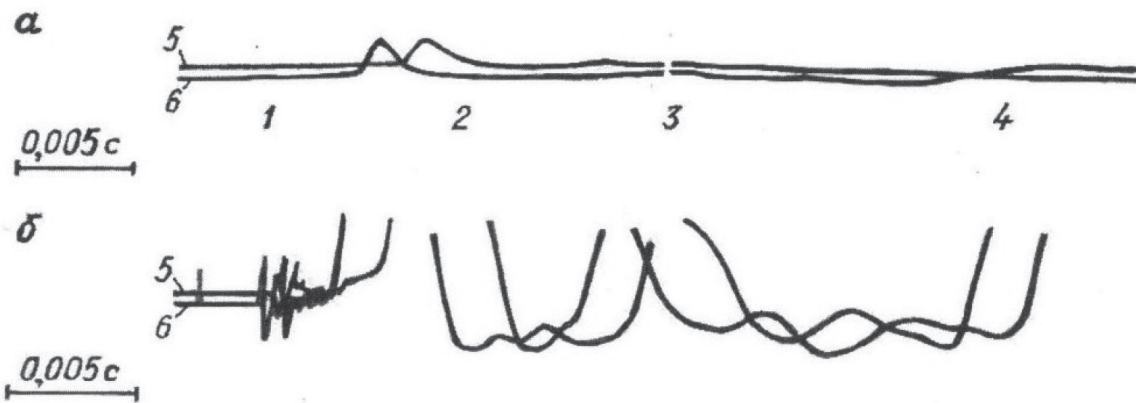
$$p_1 = f \left(t - \frac{z}{C_{T1}} \right), \quad (10)$$

$$p_R = \frac{\rho C_{T2} - \rho C_{T1}}{\rho C_{T2} + \rho C_{T1}} f \left(t + \frac{z}{C_{T1}} \right),$$

$$p_R = \frac{2\rho C_{T2}}{\rho C_{T2} + \rho C_{T1}} f \left(t - \frac{z}{C_{T2}} \right).$$

Скважинные волны, наблюдаемые на такой границе, показаны на рисунке 3.

На этом участке (условно на границе между мелом и сланцем) представлены записи волн для



1 — волна, бегущая по породе; 2 — волна, распространяющаяся в жидкости; 3 — отражение от границы слоев; 4 — отражение от забоя; 5 — импульс на глубине 30 м; 6 — импульс на глубине 60 м

Рисунок 3. Осциллограмма волн давления жидкости вблизи границы слоев (а) и она же с 30-кратным усилением (б)

соотношения $p_R/p_1 = 0,15$ [7]. Если известные значения C_{T1} (770 м/с) и C_{T2} (1140 м/с) подставить в уравнения (10), то получим значение 0,19. Такое соответствие можно считать вполне удовлетворительным, поскольку не вводилось никаких поправок с учетом затухания волн давления при прохождении их от датчиков давления до границы раздела и обратно.

Приведенное выше описание импульсных волн на границе раздела заведомо является приблизительным. С одной стороны, радиальное смещение в обеих средах при одинаковом давлении закачиваемой жидкости различно, и к тому же непрерывность радиального смещения является одним из граничных условий на поверхности контакта между двумя слоями. На расстоянии в несколько радиусов скважин над границей раздела или ниже радиальные смещения вполне удовлетворительно описываются уравнением (3). Между этими двумя значениями отмечается плавный переход в интервале, который, как уже предполагалось, мал, поэтому этот переход можно заменить ступенчатообразным изменением на границе раздела. Фактические условия на границе раздела без сомнения должны включать взаимодействие с объемными волнами, а именно, импульсная волна, проходящая через границу раздела, обязана вызывать некоторое излучение поперечных и продольных волн в окружающую среду. Если диаметр скважины существенно мал по сравнению с самой короткой длиной волны, представляющей для нас интерес, то этим эффектом можно пренебречь.

Очевидно, формулы (10) описывают волны, распространяющиеся по стенке трубы. Отраженные волны появляются в любом случае: будет ли изменение скорости вызвано из-

менением толщины трубы, изменением модуля Юнга или изменением сдвиговой жесткости в окружающей среде. Изменения плотности или объемного модуля закачиваемой жидкости, или радиуса скважины тоже порождают отраженные волны, и все они могут быть объединены одним выражением. На рисунке 4 иллюстрируется скачок по одному или нескольким таким параметрам.

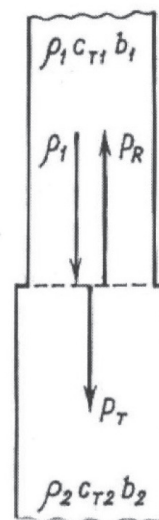


Рисунок 4. Волны вблизи обобщенной границы раздела

Э.Д. Риггс [8, 9] привел измеренные значения скоростей — 1320 м/с в обсаженной скважине и 895 м/с в соседней необсаженной скважине, которые согласуются с приведенными выше выражениями. На основании приведенных им значений для скорости поперечных волн (771 м/с) и плотности пород (≈ 2000 кг/м³) рассчитано значение модуля сдвига $\mu = 1,15 \cdot 10^9$ Па. Э.Д. Риггс сообщил, что им-

пульсные волны в изолированной трубе имели бы скорость 1280 м/с. Этот факт говорит о том, что $Eh/2b$ имеет значение $5,5 \cdot 10^9$ Па, что верно для стальной трубы диаметром 12,7 см и толщиной стенки 0,3 см. Эти константы, подставленные в (8) соответственно, дают два значения скорости, согласующиеся с результатами измерения. Поэтому в наших рассуждениях скелет проницаемой породы будет считаться жестким. Менее оправдано другое предположение, согласно которому материал, из которого состоит скелет, несжимаем. На низких частотах осциллирующее давление на расстоянии в несколько диаметров меняется в скважине очень незначительно. В этом случае короткий элемент стенки ведет себя приблизительно таким образом, как будто давление не зависит от осевого расстояния. Упругое расши-

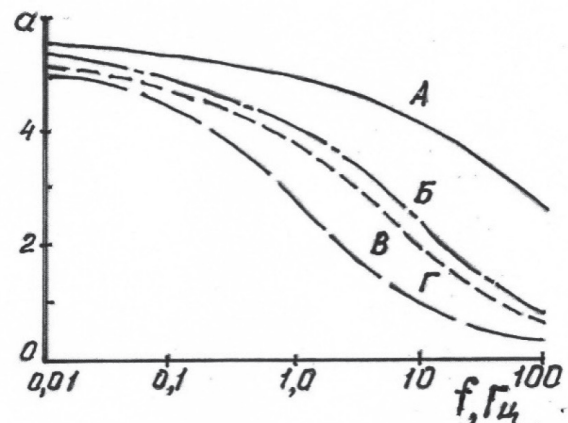
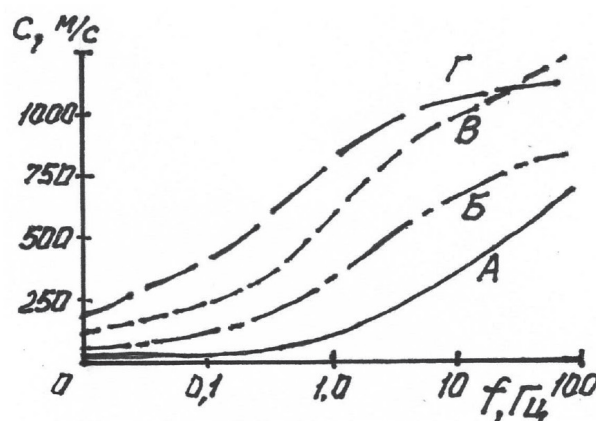
рение и среднее направление потока, проходящего через поры, являются радиальными. Импеданс стенки, выведенный для радиального движения, будет применим для низких частот.

При оценке фазовой скорости c и затухания волн a для четырех пористых пород учитывались параметры, которые приведены в таблице 1 [10–12]. В качестве флюида в скважине и в поровом пространстве была взята вода с модулем всестороннего сжатия $V=2,2 \cdot 10^9$ Па и вязкостью $\eta=0,00001$ Па·с, а радиус скважины составлял 10 см.

На рисунке 5 представлены графические зависимости фазовой скорости c и затухание a импульсных волн в жидкости от частоты их колебания.

Таблица 1. Свойства пород

Тип породы	Модуль сдвига, $\mu \cdot 10^9$ Па	Потенциал смещения, Φ	Проницаемость, $\kappa \cdot 10^{-7}$ м ²
А	1,40	0,30	10,000
Б	1,40	0,30	1000
В	4,90	0,21	300
Г	2,83	0,10	100



а) б) **Рисунок 5.** Фазовая скорость (а) и затухание импульсных волн (б) для четырех типов пород из таблицы 1

Из рисунка 5 видно, что на частотах ниже 100 Гц фазовая скорость уменьшается, а затухание очень сильное.

Выводы

Получено волновое уравнение, описывающее движение столба закачиваемой жидкости в толстостенной трубе, откуда следует, что столб закачиваемой жидкости в толстостенной трубе способен поддерживать импульсы любой волновой формы, проходящие в любом направлении без дисперсии или затухания.

Также получены выражения для описания поведения импульсных волн, распространяю-

щихся по стенке трубы. Отраженные волны появляются в любом случае: будет ли изменение скорости вызвано изменением толщины трубы, изменением модуля Юнга или изменением сдвиговой жесткости в окружающей среде. Изменения плотности или объемного модуля закачиваемой жидкости или радиуса скважины тоже порождают отраженные волны, и все они могут быть объединены одним выражением.

При оценке фазовой скорости и затухания волн для четырех пористых пород видно, что на частотах ниже 100 Гц фазовая скорость уменьшается, а затухание очень сильное.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хабибуллин М.Я., Сидоркин Д.И. Определение параметров колебаний колонны насосно-компрессорных труб при импульсной закачке жидкостей в скважину // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКР. 2016. Т. 3. № 3. С. 27–32.

2. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И., Галимуллин М.Л., Зарипова Л.М. Исследование механизма распространения волн давления в закачиваемой жидкости от устья до забоя скважины // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 3. С. 90–94.

3. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Исследование процесса распространения импульсов жидкости от устья до забоя скважины // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2016: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посв. 60-летию филиала (Октябрьский, 24 марта 2016 г.). Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. С. 104–109.

4. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.

5. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

6. Lamb H. *Statics*. New York: Cambridge University Press., 1960. 357 p.

7. White J.E., Sengbush R.L. Velocity Measurements in Nearsurface Formations // *Geophysics*. 1953. No. 18. P. 54–69.

8. Riggs E.D. Seismic Wave Types in a Borehole // *Geophysics*. 1955. No. 20. P. 53–67.

9. Янтурин А.Ш., Рахимкулов Р.Ш., Кагарманов Н.Ф. Выбор частот при вибрационном воздействии на призабойную зону пласта // Нефтяное хозяйство. 1986. № 12. С. 40–42.

10. Welsh E. Borehole Coupling in Porous Media: Ph. D. Thesis. Golden: Colorado School of Mines, 1978. 63 p.

11. Barber A.H., George C.J., Stiles L.H., Thompson B.B. Infill Drilling to Increase Reserves — Actual Experience in Nine Fields in Texas, Oklahoma and Illinois // *J. Pet. Tech.* 1983. August. P. 1530–1538.

12. Jonson D.H., Toksoz M.N. Seismic Wave Attenuation // *Soc. Explor. Geophysics Reprint. Ser. 2.* Tulsa, 1981. 459 p.

REFERENCES

1. Khabibullin M.Ya., Sidorkin D.I. Opredelenie parametrov kolebaniy kolonny nasosno-kompressornykh trub pri impul'snoi zakachke zhidkostei v skvazhinu [Determination of the Parameters of the Oscillations of the Tubing String During Pulsed Pumping of Fluids into the

Well]. *Nauchnye trudy NIPI Neftegaz GNKAR — SOCAR Proceedings*, 2016, Vol. 3, No. 3, pp. 27–32. [in Russian].

2. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I., Galimullin M.L., Zaripova L.M. Issledovanie mekhanizma rasprostraneniya voln davleniya v zakachivaemoi zhidkosti ot ust'ya do zaboya skvazhiny [Investigation of the Mechanism of the Pressure Waves Distribution in the Injected Fluid from the Wellhead to the Bottom Hole]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Proceedings of Higher Educational. Oil and Gas*, 2017, No. 3, pp. 90–94. [in Russian].

3. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Issledovanie protsessa rasprostraneniya impul'sov zhidkosti ot ust'ya do zaboya skvazhiny [Investigation of the Process of Propagation of Liquid Pulses from the Mouth to the Bottom of the Well]. *sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. posv. 60-letiyu filiala «Sovremennye tekhnologii v neftegazovom dele — 2016» (Okt'yabr'skii, 24 marta 2016)* [Proceedings of International Scientific and Technical Conference «Modern Technologies in Oil and Gas Business — 2016» (Okt'yabr'skii, March 24, 2016)]. Ufa, UGNTU Publ., 2016, pp. 104–109. [in Russian].

4. Korn G.A., Korn T.M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 832 p. [in Russian].

5. Timoshenko S.P., Yang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Fluctuations in Engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p. [in Russian].

6. Lamb H. *Statics*. New York, Cambridge University Press, 1960. 357 p.

7. White J.E., Sengbush R.L. Velocity Measurements in Near Surface Formations. *Geophysics*, 1953, No. 18, pp. 54–69.

8. Riggs E.D. Seismic Wave Types in a Borehole. *Geophysics*, 1955, No. 20, pp. 53–67.

9. Yanturin A.Sh., Rakhimkulov R.Sh., Kagarmannov N.F. Vybora chastot pri vibratsionnom vozdeistvii na prizaboinuyu zonu plasta [The Choice of Frequencies in the Vibration Exposure on the Bottomhole Formation Zone]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 1986, No. 12, pp. 40–42. [in Russian].

10. Welsh E. Borehole Coupling in Porous Media: Ph. D. Thesis, Golden, Colorado School of Mines, 1978. 63 p.

11. Barber A.H., George C.J., Stiles L.H., Thompson B.B. Infill Drilling to Increase Reserves — Actual Experience in Nine Fields in Texas, Oklahoma and Illinois. *J. Pet. Tech.*, 1983, August, pp. 1530–1538.

12. Jonson D.H., Toksoz M.N. Seismic Wave Attenuation. *Soc. Explor. Geophysics Reprint. Ser. 2.* Tulsa, 1981. 459 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ
ABOUT THE AUTHOR

Хабибуллин Марат Яхиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование», УГНТУ, Филиал, г. Октябрьский, Российская Федерация

Marat Ya. Khabibullin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oilfield Machines and Equipment Department, USPTU, Branch, Otk'yabr'skiy, Russian Federation

e-mail: m-hab@mail.ru