

УДК 550.8.05: 550.3

ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА ПРИ РОСТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2021 г. В.С. Жуков

*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия
e-mail: zhukov@ifz.ru*

Представлены результаты лабораторных исследований горных пород при росте температуры. Рассмотрены опубликованные ранее данные о влиянии увеличения температуры до 600 °С на физические и механические свойства сухих песчаников, карбонатных, метаморфических и осадочных пород. Показано, что основными причинами изменения их упругих свойств являются различия при расширении зерен минералов и возникновение трещин при высокой температуре (около 400 °С), а также разложение сложных минералов, таких как каолинит.

Анализ опубликованных данных об изменениях скоростей продольных волн с ростом температуры от 20 до 100 °С в образцах песчаников, насыщенных сырой нефтью, воздухом и соевым раствором показал, что скорость продольных волн в образцах, насыщенных сырой нефтью, снижается быстрее, чем в сухих или водонасыщенных образцах. Объясняется это быстрым уменьшением скорости продольной волны с повышением температуры в сырой нефти, возможно, обусловленным плавлением отдельных ее компонент. Поскольку влияние увеличения температуры с глубиной и при дополнительных термических воздействиях на физические свойства коллекторов углеводородов слабо исследовано, то оценка величины снижения скорости в водонасыщенных коллекторах является актуальной задачей.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния роста температуры от 20 до 80 °С на скорость продольных и поперечных волн водонасыщенных образцов песчаника при разных эффективных давлениях. Показано, что для водонасыщенных образцов, при эффективном давлении 2.0 МПа изменения скоростей продольной и поперечной волн от температуры практически одинаковы, но при эффективном давлении 37.0 МПа изменения скорости продольной волны от температуры почти в два раза меньше, чем скорости поперечной волны.

Зависимости упругих модулей от температуры, полученные экспериментально, показали, что только коэффициент Пуассона растет с увеличением температуры, причем более высокое эффективное давление только усиливает эту тенденцию. Все остальные упругие модули уменьшаются при повышении температуры, что позволяет ожидать снижения прочности горных пород, в частности, прочности на сдвиг. Это может выглядеть как повышение пластичности горных пород при увеличении температуры, которое сопровождается ростом коэффициента Пуассона. Зависимости упругих характеристик коллекторов нефти и газа от температуры, полученные в представленном исследовании, могут быть использованы при подготовке проектов разработки месторождений, в частности, при планировании методов термического воздействия

Ключевые слова: упругие свойства, горная порода, коллектор нефти и газа, рост температуры, водонасыщенность, пластовые условия, эффективное давление.

Введение

Для оценки изменений упругих свойств коллекторов нефти и газа от температуры зачастую используется динамический метод, основанный на измерении скоростей упругих волн. Один из методов определения скорости распространения упругих волн – акустический каротаж в скважинах, определяющий скорости распространения упругих волн в горных породах, по величине которых затем рассчитывается пористость. Большое количество публикаций посвящено учету влияния литолого-минералогических

характеристик и влагонасыщенности коллекторов на величину скоростей упругих волн [Авчян, Матвиенко, Стефанкевич, 1979; Wang, Nur, 1986; Bourbie, Coussy, Zisner, 1987; и др.]. Но, к сожалению, недостаточно внимания уделено влиянию изменений температуры, которая, во-первых, растет с глубиной, и, во-вторых, изменяется при термических воздействиях на пласт, на физические свойства коллекторов углеводородов [Кузьмин, 2002, 2019; Жуков, 2002; Кузьмин, Жуков, 2004; Рыжов и др., 2008].

Обзор оценок изменений упругих свойств горных пород в зависимости от температуры

Для большинства известных породообразующих минералов с ростом температуры модуль упругости снижается по линейному закону вплоть до температуры плавления. Ряд исследователей приводят данные о влиянии увеличения температуры до 600 °С на физические и механические свойства сухих карбонатных пород [Brotans et al., 2013; Tian et al., 2012], песчаников [Gautam et al., 2016; Zhang et al., 2017] и метаморфических и осадочных пород [Vagnon et al., 2019; Zhang, Mao, Lu, 2009]. Авторы этих работ делают вывод, что основные причины изменения структуры порового пространства и минерального состава исследованных пород – это различия при расширении зерен минералов и возникновение трещин при высокой температуре (≈ 400 °С), а также растрескивание кварца и разложение таких сложных минералов, как каолинит.

В работе [Авчян, Матвиенко, Стефанкевич, 1979] отмечается, что для горных пород, поры которых насыщены тем или иным флюидом, “при повышении температуры вода, нефть и природный газ расширяются больше, чем горные породы и поэтому давление флюидов может резко увеличиваться”, особенно в замкнутых порах. На всех рассмотренных образцах осадочных пород скорости продольных волн V_P уменьшаются с ростом температуры T (рис. 1). Авторы считают, что монотонное понижение V_P при увеличении температуры от 20 °С до 90–110 °С происходит вследствие уменьшения упругих модулей породообразующих минералов, цементирующего вещества и скелета породы. Величина изменения скорости варьирует от 2–4 % в неглинистых кварцевых песчаниках, до 7–8 % в глинах и известняках.

Результаты сопоставления изменений V_P с ростом температуры от 20 до 100 °С в образцах песчаников, насыщенных сырой нефтью, воздухом и соевым раствором, при эффективном давлении $P_{эф}=15$ МПа, выполненного в работе [Wang, Nur, 1986], представлены на рис. 2, 3. Скорость продольных волн в образцах, насыщенных сырой нефтью, снижается быстрее, чем в сухих или водонасыщенных образцах. Объясняется это быстрым уменьшением V_P при повышении температуры в сырой нефти, возможно, обусловленным плавлением отдельных компонент нефти. Наличие в коллекторах углеводородов в твердом (битум или воск) или в жидком (нефть, газовый конденсат) виде значительно влияет на зависимости скоростей упругих волн от температуры. Так в той же работе [Wang, Nur, 1986] показано, что V_P в углеводородах сильно уменьшаются при увеличении температуры. Наиболее заметное снижение скорости в массилонском песчанике, насыщенном воском, наблюдается в диапазоне от 20 до 65 °С, в процессе плавления воска (см. рис. 2). Снижение скорости волн в таком же песчанике, но уже насыщенном водой, имеет существенно меньшую величину и носит линейный характер.

Подобные исследования, проведенные на образцах оттавского песчаника, насыщенного тяжелой нефтью, водой или воздухом продемонстрировали, что скорость продольной волны стремительно снижается в образцах, насыщенных нефтью (см. рис. 3), что объясняется быстрым уменьшением скорости продольной волны в самой нефти с ростом температуры, при этом понижается вязкость нефти [Wang, Nur, 1986].

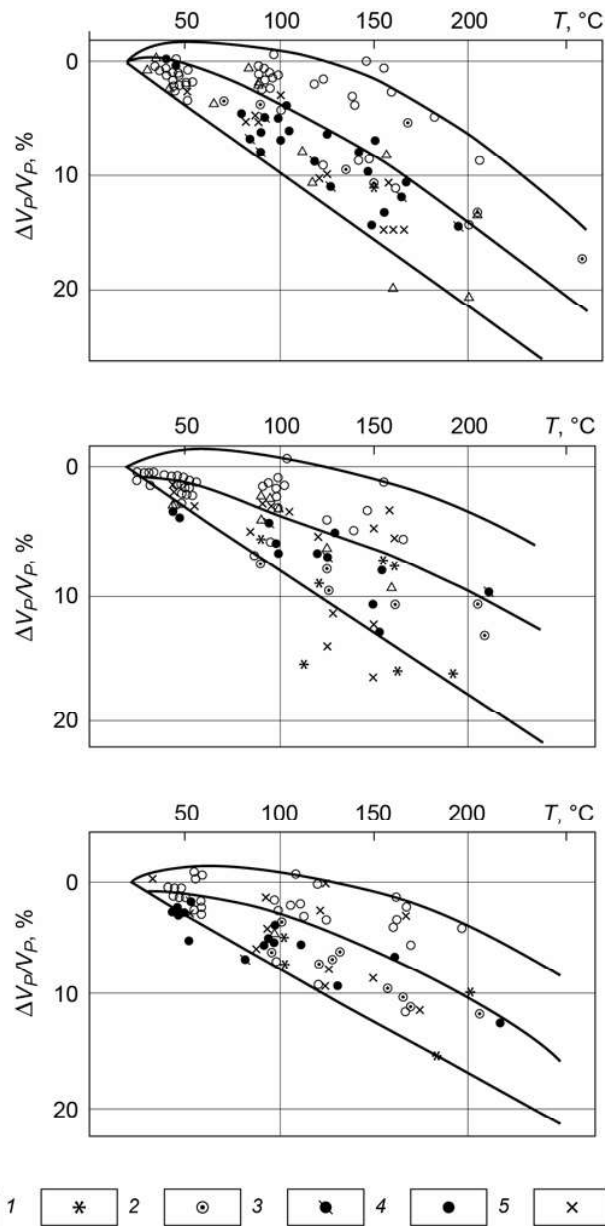


Рис. 1. Зависимость скорости продольных волн от температуры (по данным [Авчян, Матвиенко, Стефанкевич, 1979]) в водонасыщенных породах при давлениях: 2.5 МПа (вверху); 50 МПа (по центру), 100 МПа (внизу)

1, 2 – песчаники: кварцевые (1), искусственные (2); 3, 4 – алевролиты: кварцевые (3), карбонатные (4); 5 – полимиктовые песчаники и алевролиты с глинисто-карбонатным цементом; 6 – известняки органо-детритовые; 7 – красноцветные глины

Fig. 1. The dependence of the velocity of longitudinal waves on temperature (according to [Avchyan, Matveenko, Stefankevich, 1979]) in water-saturated rocks at pressures: 2.5 MPa (above); 50 MPa (center), 100 MPa (below)

1, 2 – sandstones: quartz (1), artificial (2); 3, 4 – siltstones: quartz (3), carbonate (4); 5 – polymictic sandstones and siltstones with clay-carbonate cement; 6 – organo-detrital limestones; 7 – red-colored clays

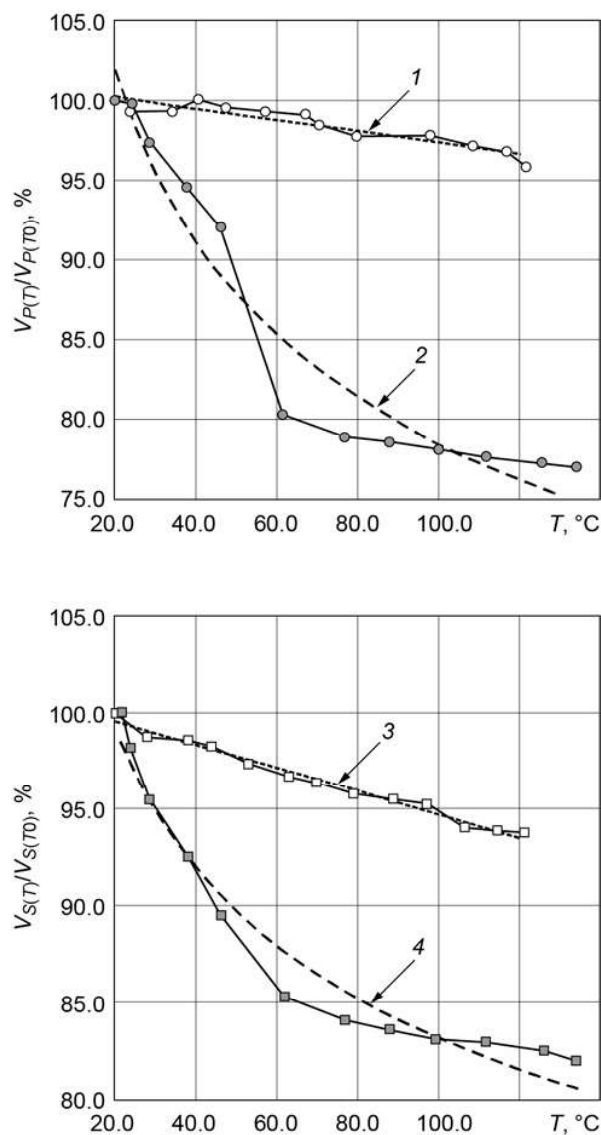


Рис. 2. Влияние температуры на нормированные скорости продольных (*вверху*) и поперечных (*внизу*) волн в массилонских песчаниках, насыщенных воском (залитые значки) или водой (значки без заливки), при всестороннем давлении 15.0 МПа по данным [Wang, Nur, 1986]. 1–4 – аппроксимирующие кривые (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=100.9 - 0.0352T$, $R^2=0.87$ (1); $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=166.03T^{-0.162}$, $R^2=0.94$ (2); $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=100.7 - 0.0604T$, $R^2=0.98$ (3); $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=137.75T^{-0.109}$, $R^2=0.96$ (4). Здесь и на рис. 3, 6, 8, 9 $V_{P(T)}$, $V_{S(T)}$, $V_{P(T0)}$, $V_{S(T0)}$ – скорости продольных и поперечных волн при текущей (T) и начальной ($T0$) температурах, км/с

Fig. 2. Influence of temperature on the normalized velocities of longitudinal (*above*) and transverse (*below*) waves in Massillon sandstones saturated with wax (icons with filling) or water (icons without filling) at uniform pressure of 15.0 MPa according to [Wang, Nur, 1986]. 1–4 – approximating curves (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=100.9 - 0.0352T$, $R^2=0.87$ (1); $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=166.03T^{-0.162}$, $R^2=0.94$ (2); $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=100.7 - 0.0604T$, $R^2=0.98$ (3); $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=137.75T^{-0.109}$, $R^2=0.96$ (4). Here and in Fig. 3, 6, 8, 9 $V_{P(T)}$, $V_{S(T)}$, $V_{P(T0)}$, $V_{S(T0)}$ – velocities of longitudinal and transverse waves at current (T) and initial ($T0$) temperatures, km/s

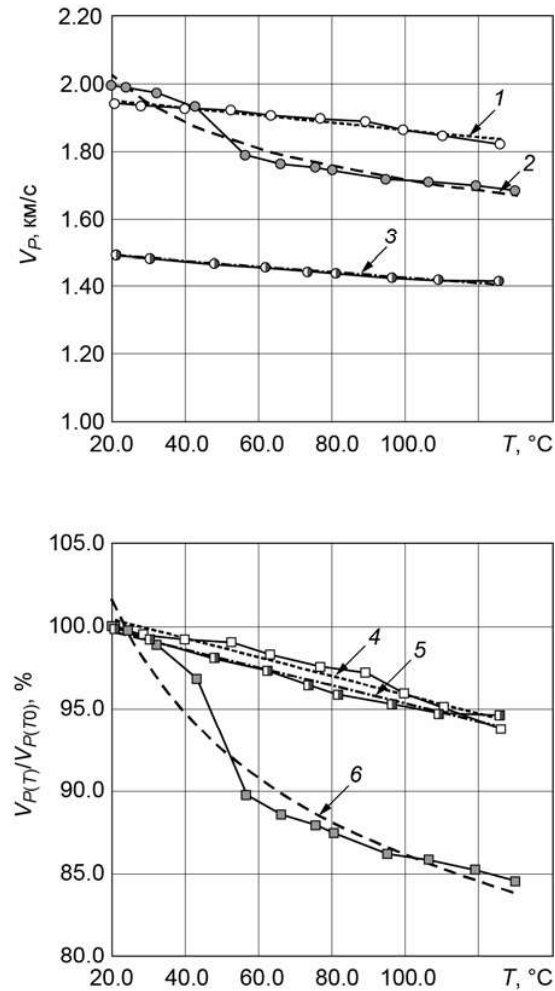


Рис. 3. Влияние температуры на скорости продольных волн V_p (вверху) и нормированные скорости продольных волн $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}$ (внизу) в оттавских песчаниках, насыщенных тяжелой нефтью (залитые значки), водой (значки без заливки), воздухом (значки с частичной заливкой), при всестороннем давлении 20.0 МПа и поровом давлении 5.0 МПа (по данным [Wang, Nur, 1986]). 1–6 – аппроксимирующие кривые (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $V_p=1.975 - 0.0011T$, $R^2=0.96$ (1); $V_p=2.758T^{-0.103}$, $R^2=0.95$ (2); $V_p=1.508 - 0.0008T$, $R^2=0.97$ (3); $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}=101.54 - 0.0566T$, $R^2=0.96$ (4); $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}=100.76 - 0.0546T$, $R^2=0.97$ (5); $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}=138.2T^{-0.103}$, $R^2=0.95$ (6)

Fig. 3. Influence of temperature on longitudinal wave velocities V_p (above) and normalized velocities of longitudinal waves $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}$ (below) in Ottawa sandstones saturated with heavy oil (icons with filling), water (icons without filling), air (icons with partial filling), at uniform pressure of 20.0 MPa and a pore pressure of 5.0 MPa (according to [Wang, Nur, 1986]). 1–6 – approximating curves (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $V_p=1.975 - 0.0011T$, $R^2=0.96$ (1); $V_p=2.758T^{-0.103}$, $R^2=0.95$ (2); $V_p=1.508 - 0.0008T$, $R^2=0.97$ (3); $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}=101.54 - 0.0566T$, $R^2=0.96$ (4); $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}=100.76 - 0.0546T$, $R^2=0.97$ (5); $V_{p(T)}/V_{p(T_0)}=138.2T^{-0.103}$, $R^2=0.95$ (6)

Можно видеть, что нормированные скорости продольных ($V_{p(T)}/V_{p(T_0)}$) волн в оттавских песчаниках, насыщенных водой или воздухом, имеют похожие зависимости от температуры и, скорее всего, обусловлены снижением упругих модулей породообразующих минералов с ростом температуры.

Приведенные в работе [Bourbie, Coussy, Zisner, 1987] данные об изменениях V_P от дифференциального (эффективного) давления $P_{эф}$ и температуры качественно подтверждают представленные выше зависимости скоростей продольных волн от температуры в насыщенных водой и нефтью горных породах (рис. 4).

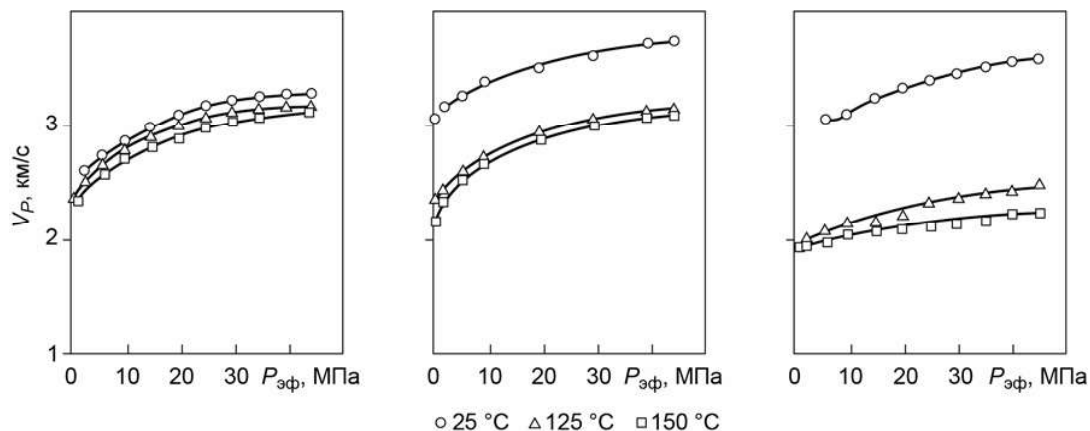


Рис. 4. Влияние дифференциального (эффективного) давления и температуры на скорости продольных волн при разном насыщении и постоянном поровом давлении $P_f=3.0$ МПа: слева – 100 % воды; по центру – 50 % воды и 50 % нефти; справа – 100 % нефти (по [Bourbie, Coussy, Zisner, 1987] с изменениями)

Fig. 4. Influence of differential (effective) pressure and temperature on the velocities of longitudinal waves at different saturation and constant pore pressure $P_f=3.0$ MPa: on the left – 100 % water; in the center – 50 % water and 50 % oil; on the right – 100 % oil (according to [Bourbie, Coussy, Zisner, 1987] with changes)

Очевидно, что при повышении температуры от 20 до 90–110 °C происходит снижение скорости продольной волны вследствие понижения упругих модулей породообразующих минералов, цементирующего вещества и скелета породы. Причем увеличение эффективного давления не влияет на характер снижения скорости продольной волны. Наличие в поровом пространстве газа также не сказывается на характере снижения скорости. Но присутствие нефти или твердых битумов в составе порового флюида существенно изменяет характер снижения скорости продольной волны, что обусловлено уменьшением вязкости нефти или плавлением твердых компонентов (воска, асфальтенов) при их наличии в нефти с ростом температуры. Таким образом, оценка величины снижения скорости в водонасыщенных коллекторах месторождений нефти и газа является актуальной задачей как для планирования способов термического воздействия на пласт с целью повышения углеводородоотдачи, так и для оценки степени изменения температуры за счет влияния дроссельного эффекта [Гиматудинов, Ширковский, 1982] при разработке месторождений.

Объект и методика исследований

Предметом представляемого исследования являлась оценка влияния изменений температуры на упругие свойства водонасыщенных коллекторов дагинского горизонта шельфа Сахалина при разных эффективных давлениях. Эксперименты проводились на двенадцати цилиндрических образцах, изготовленных из мелкозернистых песчаников и алевролитов дагинского горизонта, которые имеют открытую пористость

в атмосферных условиях от 10.3 до 28.5 % и газопроницаемость от 0.46 до 763 мД, трещинную пористость – 0.5–0.9% [Жуков, 2012, 2014; Жуков, Чуриков, Моторыгин, 2017; Жуков, Кузьмин, 2020]. В процессе наблюдений определялась пористость образцов, а также выполнялись измерения скорости распространения упругих продольных и поперечных волн частотой 100 МГц при моделировании пластовых условий на установке ПУМА-650 при повышении температуры от 22 до 80 °С. На семи образцах измерения проводились в условиях близких к атмосферным, т.е. при эффективном давлении 2.0 МПа, на пяти образцах – при эффективном давлении 37.0 МПа, моделирующем пластовые условия [Жуков, Семенов, Кузьмин, 2018; Жуков, Иванов, 2015].

Коэффициент пористости $m_{пл}$ в условиях, моделирующих пластовые, вычислялся на основе измерений объема жидкости, вытесненной из порового пространства образца $\Delta V_{пор}$, с учетом объема образца $V_{обр}$ и коэффициента пористости в атмосферных условиях $m_{атм}$ по следующей формуле:

$$m_{пл} = m_{атм} - \Delta V_{пор}/V_{обр}. \quad (1)$$

В связи с тем, что поровое давление в процессе испытаний образцов поддерживалось постоянным, то учета влияния сжимаемости поровой жидкости при изменении давления не требовалось. Коэффициент пористости в атмосферных условиях $m_{атм}$ определялся стандартным методом жидкостенасыщения. Изменения продольных и поперечных размеров образцов при нагреве не учитывались, поскольку тепловые деформации пренебрежимо малы при величинах коэффициентов теплового расширения минералов аналогичных образцов $(9-13) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

На каждом образце при неизменных условиях проводилось не менее трех измерений скоростей распространения упругих волн. Далее рассчитывались средние значения по всем исследованным образцам. Первое вступление продольной упругой волны определялось на момент начала отклонения прямой линии вверх или вниз в зависимости от полярности излучаемого упругого импульса. Для поперечной волны первое вступление определялось на момент перехода через ноль поперечной волны или максимальное значение амплитуды поперечной волны в зависимости от особенностей излучаемого упругого импульса. Точность определения времени по цифровому осциллографу составляла 0.1 мкс; точность определения геометрических размеров образцов – 0.01 см. Относительная погрешность исследований объема порового пространства не превышала 0.094 %; относительная погрешность исследования скорости распространения упругих волн не превышала 0.2 % [Жуков, Иселидзе, Григорьев, 2016; Жуков, Люгай, 2016].

Результаты экспериментальных исследований

Обычно изменениями скорости распространения упругих волн от температуры пренебрегают, считая их приемлемо малыми. Как показано на рис. 5 увеличение температуры сопровождается снижением скоростей как продольных V_P , так и поперечных V_S упругих волн, причем достоверность аппроксимации зависимости скоростей от температуры линейной зависимостью довольно высокая ($R^2=0.97-0.99$).

Для получения безразмерной зависимости скоростей упругих волн от температуры была проведена нормировка значений скоростей при текущей температуре T на величины скоростей каждого из образцов при начальной температуре T_0 (в нашем случае $T_0=22 \text{ } ^\circ\text{C}$). Для продольной волны такая зависимость при эффективном давлении 2.0 МПа описывается эмпирическими линейными уравнениями

$$V_{P(T)}/V_{P(T_0)} = 101.9 - 0.839T, \quad (2)$$

в которых $V_{P(T)}$ и $V_{P(T_0)}$ – скорости продольных волн при текущей и начальной температуре, км/с; 0.0839 – эмпирический коэффициент, отражающий изменения $V_{P(T)}/V_{P(T_0)}$

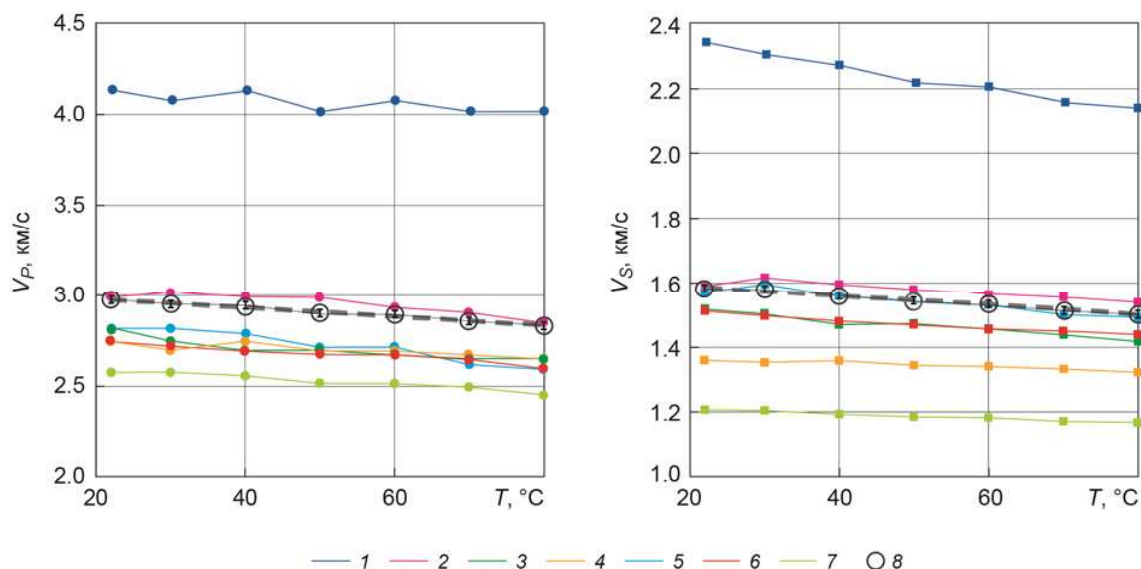


Рис. 5. Графики изменения скоростей продольных (слева) и поперечных (справа) волн с ростом температуры при постоянном эффективном давлении $P_{эф}=2.0$ МПа в образцах 1–7 с коэффициентами пористости $m_{атм}$, %: 10.3 (1), 20.2 (2), 21.3 (3), 22.5 (4), 23.1 (5), 24.0 (6), 28.5 (7). 8 – среднее значение скорости по семи образцам; штриховые линии – аппроксимирующие прямые (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $V_{P(T)}=3.0285 - 0.0024T$, $R^2=0.97$ (слева) и $V_{S(T)}=1.6203 - 0.0015T$, $R^2=0.99$ (справа). Здесь и на рис. 6–10 вертикальными отрезками обозначены стандартные ошибки определения средних значений скоростей

Fig. 5. Plots of changes in the velocities of longitudinal (on the left) and transverse (on the right) waves with increasing temperature at a constant effective pressure $P_{эф}=2.0$ МПа in samples 1–7 with porosity coefficients $m_{атм}$, %: 10.3 (1), 20.2 (2), 21.3 (3), 22.5 (4), 23.1 (5), 24.0 (6), 28.5 (7). 8 – the average velocity value for seven samples; dashed lines – approximating straight lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $V_{P(T)}=3.0285 - 0.0024T$, $R^2=0.97$ (on the left) and $V_{S(T)}=1.6203 - 0.0015T$, $R^2=0.99$ (on the right). Here and in Fig. 6–10 vertical lines indicate standard errors in determining the average values of velocities

от температуры в диапазоне 20–80°C при $P_{эф}=2.0$ МПа, 1/°C; 101.9 – безразмерный свободный член эмпирического уравнения, близкий к величине отношения $V_{P(T)}/V_{P(T0)}$ при $T=0.0$ °C.

Для поперечной волны уравнения имеют вид:

$$V_{S(T)}/V_{S(T0)} = 102.2 - 0.0881T, \quad (3)$$

где $V_{S(T)}$ и $V_{S(T0)}$ – скорости поперечных волн при текущей и начальной температуре, км/с; 0.0881 – эмпирический коэффициент, отражающий изменения нормированной скорости поперечной волны от температуры в диапазоне 20–80°C при $P_{эф}=2.0$ МПа, 1/°C; 102.2 – безразмерный свободный член эмпирического уравнения, близкий к величине отношения $V_{S(T)}/V_{S(T0)}$ при $T=0.0$ °C.

Графики изменения нормированных скоростей упругих волн (рис. 6) подтверждают высокую достоверность линейных зависимостей (2) и (3) снижения скоростей упругих волн от температуры ($R^2=0.98-0.99$). Величина скорости уменьшается в среднем на 0.084–0.088 % от первоначальной на каждый градус повышения температуры.

Отметим, что уравнения (2) и (3) можно использовать как для оценки изменения скоростей упругих волн пласта, так и для оценки его температуры в процессе мониторинга при термическом воздействии на залежь.

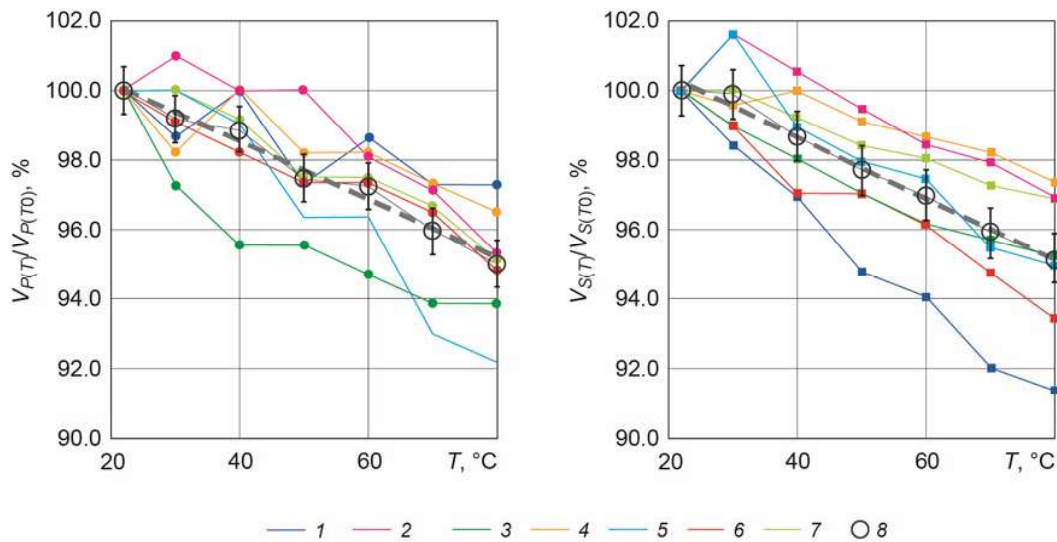


Рис. 6. Графики изменения нормированных скоростей продольных (слева) и поперечных (справа) упругих волн от температуры при постоянном эффективном давлении $P_{эф}=2.0$ МПа. Штриховые линии – аппроксимирующие прямые, описываемые уравнениями (2) и (3). Остальные условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. Plots of changes in the normalized velocities of longitudinal (on the left) and transverse (on the right) elastic waves with temperature at a constant effective pressure $P_{эф}=2.0$ MPa. Dashed lines – approximating straight lines described by equations (2) and (3). The rest of notations see in Fig. 5

Чтобы проанализировать влияние величины эффективного давления на изменения скорости с ростом температуры нами была проведена серия исследований на пяти образцах при $P_{эф}=37.0$ МПа, моделирующем пластовые условия. Результаты измерений представлены на (рис. 7). Можно видеть, что в данных условиях увеличение температуры сопровождается снижением скоростей как продольных, так и поперечных упругих волн, причем достоверность аппроксимации зависимости скоростей от температуры линейной зависимостью довольно высокая ($R^2=0.97-0.99$).

После выполнения нормировки, аналогичной проведенной ранее, были получены следующие зависимости нормированных скоростей упругих волн от температуры при эффективном давлении 37.0 МПа, которые описываются эмпирическими линейными уравнениями:

$$V_{P(T)}/V_{P(T0)} = 100.73 - 0.0425T, \quad (4)$$

$$V_{S(T)}/V_{S(T0)} = 101.84 - 0.0889T, \quad (5)$$

где 0.0425 – эмпирический коэффициент, отражающий изменения нормированной скорости продольной волны от температуры в диапазоне 20–80 °С, 1/°С; 100.73 – безразмерный свободный член эмпирического уравнения, близкий к величине отношения $V_{P(T)}/V_{P(T0)}$ при $T=0.0$ °С; 0.0889 – эмпирический коэффициент, отражающий изменения нормированной скорости поперечной волны от температуры в диапазоне 20–80 °С, 1/°С; 101.84 – безразмерный свободный член эмпирического уравнения, близкий к величине отношения $V_{S(T)}/V_{S(T0)}$ при $T=0.0$ °С.

Полученные графики изменения нормированных скоростей (рис. 8) подтверждают надежную зависимость снижения скоростей упругих волн с ростом температуры ($R^2=0.98-0.99$) в среднем на 0.043–0.089 % на 1 °С повышения температуры.

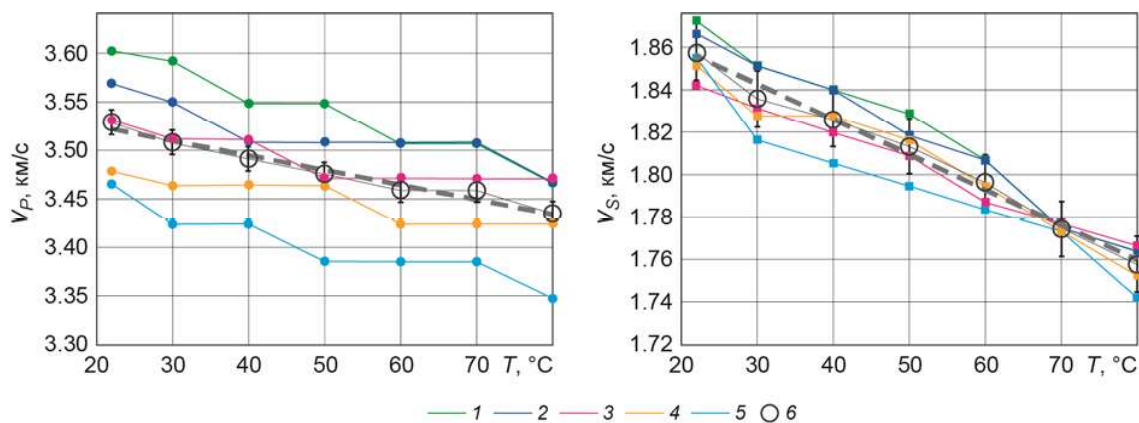


Рис. 7. Графики изменения скоростей продольных (слева) и поперечных (справа) волн с ростом температуры и постоянном эффективном давлении $P_{эф}=37.0$ МПа в образцах 1–5 с коэффициентами пористости $m_{пл}$, %: 22.8 (1), 22.6 (2), 21.2 (3), 22.8 (4), 24.9 (5). 6 – среднее значение скорости по пяти образцам; штриховые линии – аппроксимирующие прямые (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $V_{P(T)}=3.5553 - 0.0015T$, $R^2=0.97$ (слева) и $V_{S(T)}=1.8920 - 0.0017T$, $R^2=0.98$ (справа)

Fig. 7. Plots of changes in the velocities of longitudinal (on the left) and transverse (on the right) waves with increasing temperature and constant effective pressure $P_{эф}=37.0$ MPa in samples 1–5 with porosity coefficients $m_{пл}$, %: 22.8 (1), 22.6 (2), 21.2 (3), 22.8 (4), 24.9 (5). 6 – the average velocity value for five samples; dashed lines – approximating straight lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $V_{P(T)}=3.5553 - 0.0015T$, $R^2=0.97$ (on the left) and $V_{S(T)}=1.8920 - 0.0017T$, $R^2=0.98$ (on the right)

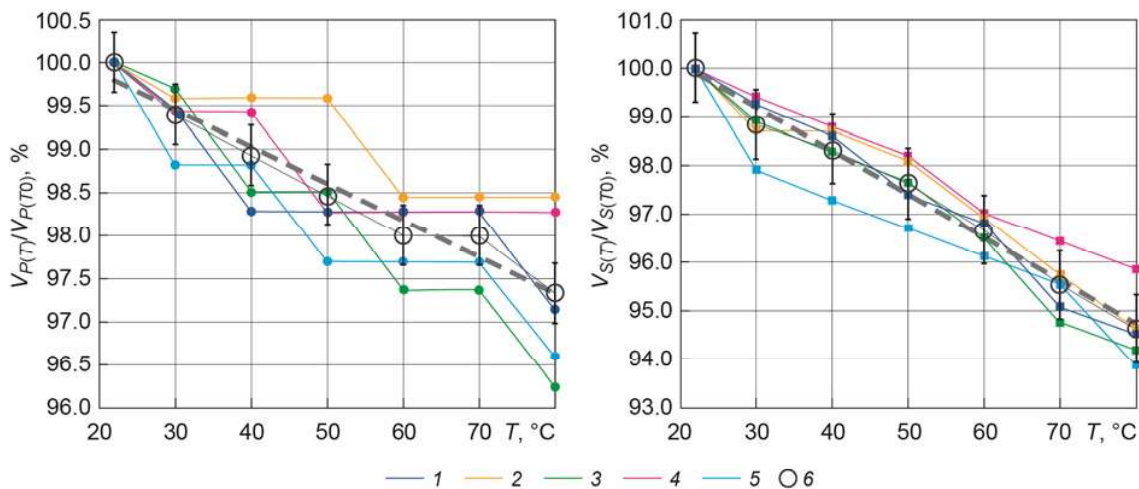


Рис. 8. Графики изменения нормированных скоростей продольных (слева) и поперечных (справа) упругих волн от температуры при постоянном эффективном давлении $P_{эф}=37.0$ МПа. Штриховые линии – аппроксимирующие прямые, описываемые уравнениями (4) и (5). Остальные условные обозначения см. на рис. 7

Fig. 8. Plots of changes in the normalized velocities of longitudinal (on the left) and transverse (on the right) elastic waves with temperature at a constant effective pressure $P_{эф}=37.0$ MPa. Dashed lines – approximating straight lines described by equations (4) and (5). The rest of notations see in Fig. 7

Таким образом, полученные зависимости скорости продольных волн от температуры при разных эффективных давлениях (см. рис. 6, 8) не противоречат тем, что были приведены ранее (см. рис. 1) в работе [Авчян, Матвиенко, Стефанкевич, 1979].

Обсуждение результатов исследований

Сопоставление изменений средних значений скоростей упругих волн при разных эффективных давлениях демонстрирует, что при низком эффективном давлении изменения продольной и поперечной волн практически одинаковы, но при эффективном давлении 37.0 МПа изменения скорости продольной волны от температуры меньше почти в два раза (рис. 9). С увеличением давления прослеживается уменьшение изменения скорости продольной волны от температуры.

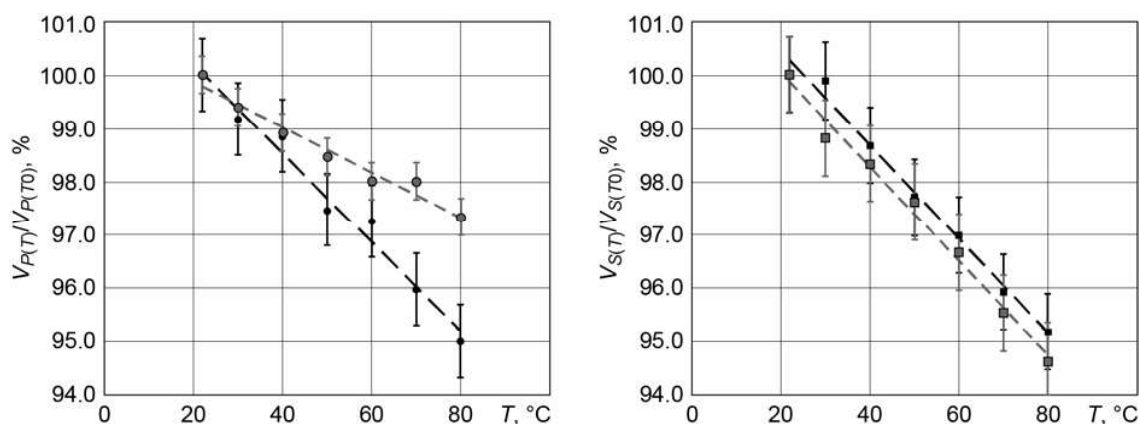


Рис. 9. Графики изменения нормированных скоростей продольных (слева) и поперечных (справа) упругих волн от температуры при эффективном давлении 2.0 МПа (черные значки) и 37.0 МПа (серые значки). Здесь и на рис. 10 каждый значок отображает среднее значение по семи (при $P_{эф}=2.0$ МПа) или по пяти (при $P_{эф}=37.0$ МПа) образцам. Штриховые линии – аппроксимирующие прямые (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=100.73 - 0.0425T$, $R^2=0.97$ при 37.0 МПа и $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=101.89 - 0.0839T$, $R^2=0.98$ при 2.0 МПа (слева); $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=101.84 - 0.0889T$, $R^2=0.99$ при 37.0 МПа и $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=102.20 - 0.0881T$, $R^2=0.99$ при 2.0 МПа (справа)

Fig. 9. Plots of changes in the normalized velocities of longitudinal (on the left) and transverse (on the right) elastic waves with temperature at an effective pressure of 2.0 MPa (black icons) and 37.0 MPa (gray icons). Here and in Fig. 10, each icon displays the average value for seven (at $P_{эф}=2.0$ MPa) or five (at $P_{эф}=37.0$ MPa) samples. Dashed lines – approximating straight lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=100.73 - 0.0425T$, $R^2 = 0.97$ at 37.0 MPa and $V_{P(T)}/V_{P(T0)}=101.89 - 0.0839T$, $R^2=0.98$ at 2.0 MPa (on the left); $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=101.84 - 0.0889T$, $R^2=0.99$ at 37.0 MPa and $V_{S(T)}/V_{S(T0)}=102.20 - 0.0881T$, $R^2=0.99$ at 2.0 MPa (on the right)

Отмечены значительные расхождения зависимости от температуры при разных давлениях для скоростей продольных и поперечных волн (см. рис. 9). Скорость продольной волны в воде с ростом температуры изменяется в соответствии с формулой Вильсона (до 40 °С скорость увеличивается, а потом уменьшается):

$$V_P = 1449.2 + 4.623T - 0.0546T^2 + 1.39(S - 35), \quad (6)$$

где V_P – скорость продольной волны в соленой воде, м/с; T – температура воды, °С; S – соленость воды, ‰.

Эффективное давление не влияет на характер изменения скорости поперечной волны от температуры (см. рис. 9 *справа*). Поэтому близкие величины коэффициентов уменьшения V_P и V_S с ростом температуры при давлении 2.0 МПа обусловлены в основном изменением упругости минералов при повышении температуры.

Эффективное давление 37.0 МПа незначительно увеличивает упругие модули породобразующих минералов, а скорость продольной волны при этом несколько возрастает. Поскольку наличие воды оказывает влияние только на скорость продольной волны, и не влияет на скорость поперечной волны, то прослеживается разный характер их изменения при повышении температуры. В частности, отношение скоростей продольной и поперечной волн V_P/V_S с ростом температуры при эффективном давлении 37.0 МПа увеличивается сильнее, чем при эффективном давлении 2.0 МПа (рис. 10).

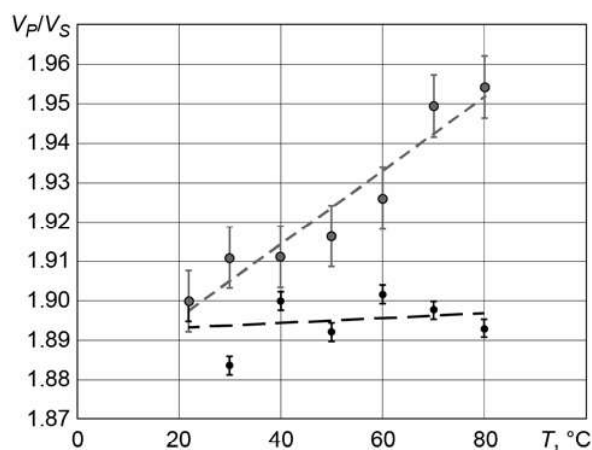


Рис. 10. Графики изменения отношения скоростей продольных и поперечных упругих волн V_P/V_S от температуры при эффективном давлении 2.0 и 37.0 МПа. Штриховые линии – аппроксимирующие прямые (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $V_P/V_S=0.0009T + 1.8771$, $R^2=0.92$ при 37.0 МПа (серая линия) и $V_P/V_S=0.00007T + 1.8916$, $R^2=0.05$ при 2.0 МПа (черная линия)

Fig. 10. Plots of changes in the ratio of the velocities of longitudinal and transverse elastic waves V_P/V_S with temperature at an effective pressure of 2.0 and 37.0 MPa. Dashed lines – approximating straight lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $V_P/V_S=0.0009T + 1.8771$, $R^2=0.92$ at 37.0 MPa (gray line) and $V_P/V_S=0.00007T + 1.8916$, $R^2=0.05$ at 2.0 MPa (black line)

Значения упругих модулей Юнга E и сдвига G , рассчитанные по значениям скоростей упругих волн и объемного веса образцов горных пород, также снижаются с ростом температуры (рис. 11). Так как при определении модуля Юнга использованы величины скоростей распространения поперечной и продольной волны (при вычислении коэффициента Пуассона), то зависимости этого модуля от температуры для эффективного давления 2.0 и 37.0 МПа отличаются не очень сильно

$$E = 15.079 - 0.0272T, \text{ для } P_{\text{эф}}=2.0 \text{ МПа}, \quad (7)$$

$$E = 18.877 - 0.0286T, \text{ для } P_{\text{эф}}=37.0 \text{ МПа}, \quad (8)$$

где E – модуль Юнга, ГПа; T – текущая температура, °C; 0.0272 и 0.0286 – эмпирические коэффициенты, отражающие изменения модуля Юнга от температуры в диапазоне 20–80 °C, ГПа/°C; 15.079 и 18.877 – свободные члены уравнения, близкие к величине модуля Юнга при $T=0.0$ °C, ГПа.

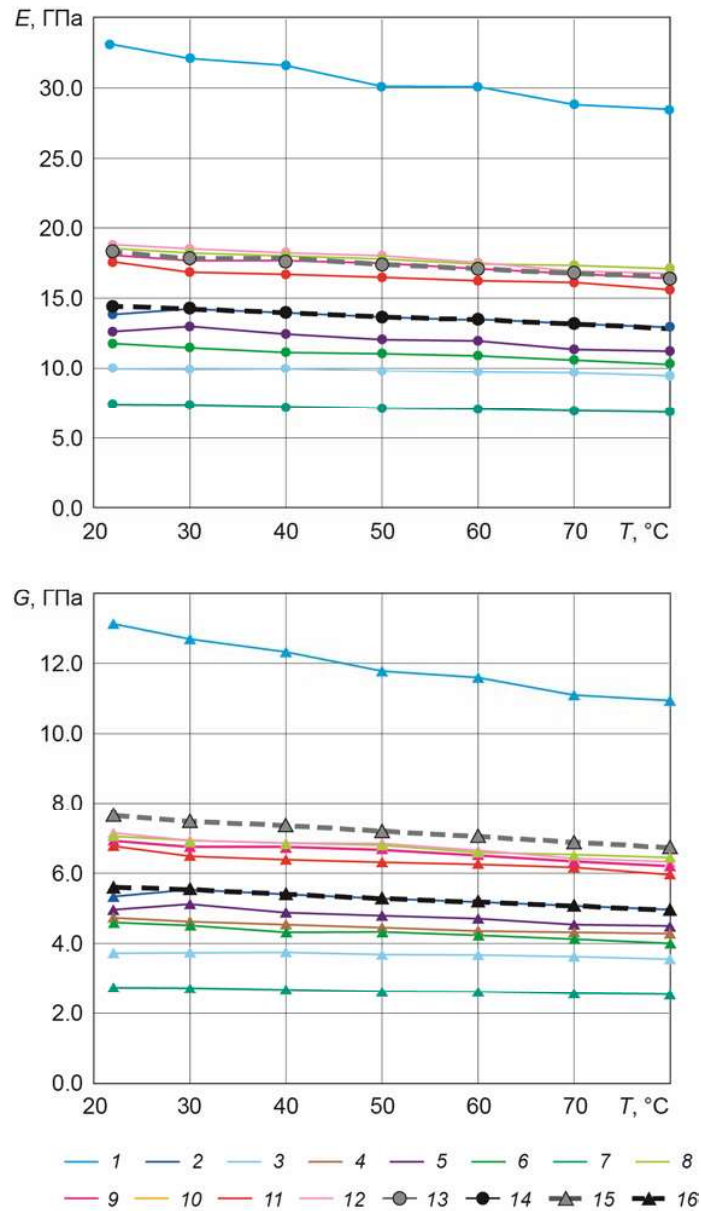


Рис. 11. Графики изменения модуля Юнга E , ГПа (вверху) и модуля сдвига G , ГПа (внизу) с ростом температуры при постоянном эффективном давлении 2.0 МПа и 37.0 МПа. 1–7 – исследованные при $P_{эф}=2.0$ МПа образцы с коэффициентами пористости $m_{атм}$, %: 10.3 (1), 20.2 (2), 20.2 (3), 21.3 (4), 23.1 (5), 24.0 (6), 28.5 (7); 8–12 – образцы с $m_{атм}$, %: 21.2 (8), 22.8 (9), 22.8 (10), 24.9 (11), 22.6 (12), исследованные при $P_{эф}=37.0$ МПа; 13–16 – аппроксимирующие прямые средних значений упругих модулей, рассчитанных по образцам 1–7 (13, 15) и 8–12 (14, 16), описываемые уравнениями (7)–(10)

Fig. 11. Plots of changes in Young's modulus E , GPa (above) and shear modulus G , GPa (below) with increasing temperature at a constant effective pressure of 2.0 MPa and 37.0 MPa. 1–7 – samples tested at $P_{эф}=2.0$ MPa with porosity coefficients $m_{атм}$, %: 10.3 (1), 20.2 (2), 20.2 (3), 21.3 (4), 23.1 (5), 24.0 (6), 28.5 (7); 8–12 – samples with $m_{атм}$, %: 21.2 (8), 22.8 (9), 22.8 (10), 24.9 (11), 22.6 (12), tested at $P_{эф}=37.0$ MPa; 13–16 – approximating straight lines of the average values of elastic moduli, calculated from samples 1–7 (13, 15) and 8–12 (14, 16), described by equations (7)–(10)

Поскольку для определения модуля сдвига G используется только скорость поперечной волны, то зависимости этого модуля от температуры существенно отличаются для разных значений эффективного давления (см. рис. 11, *внизу*):

$$G = 5.862 - 0.0113T, \text{ для } P_{\text{эф}}=2.0 \text{ МПа}, \quad (9)$$

$$G = 7.988 - 0.0157T, \text{ для } P_{\text{эф}}=37.0 \text{ МПа}, \quad (10)$$

где G – модуль сдвига, ГПа; 0.0113 и 0.0157 – эмпирические коэффициенты, отражающие изменения G от температуры в диапазоне 20–80 °С, ГПа/°С; 5.862 и 7.988 – свободные члены уравнения, близкие к величине модуля сдвига при $T=0.0$ °С, ГПа.

Но, в то же время, изменения коэффициента Пуассона $\sigma_{\text{П}}$ от температуры значительно отличаются при эффективных давлениях 2.0 МПа и 37.0 МПа (рис. 12). Обусловлено это тем, что при расчете коэффициента Пуассона используются скорости распространения и продольной, и поперечной упругих волн.

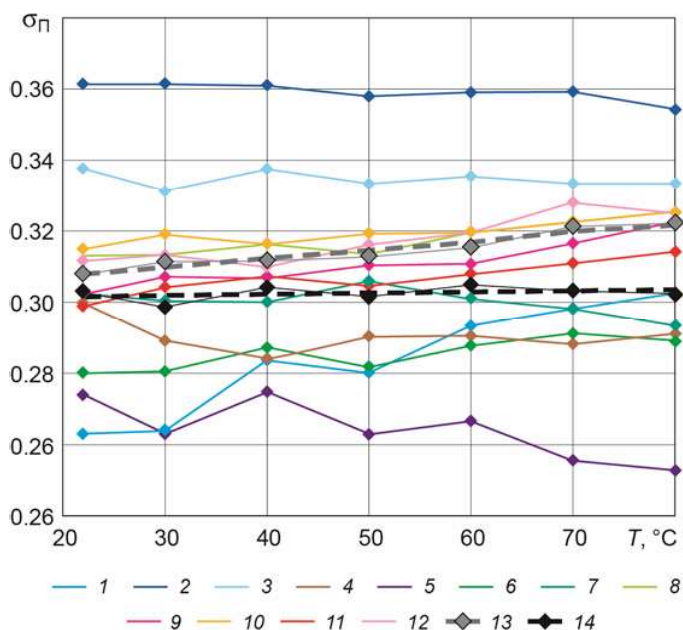


Рис. 12. Графики изменения коэффициента Пуассона $\sigma_{\text{П}}$ с ростом температуры при постоянном эффективном давлении 2.0 и 37.0 МПа. Штриховые линии – аппроксимирующие прямые (с коэффициентами детерминации R^2) средних значений $\sigma_{\text{П}}$, рассчитанных по: образцам 1–7 при $P_{\text{эф}}=2.0$ МПа $\sigma_{\text{П}}=0.00004T + 0.3007$, $R^2=0.15$ (черная линия); образцам 8–12 при $P_{\text{эф}}=37.0$ МПа $\sigma_{\text{П}}=0.0002T + 0.3024$, $R^2=0.93$ (серая линия). Условные обозначения см. на рис. 11

Fig. 12. Plots of changes in Poisson's ratio $\sigma_{\text{П}}$ with increasing temperature at constant effective pressure of 2.0 and 37.0 МПа. Dashed lines – approximating straight lines (with coefficients of determination R^2) of average values of $\sigma_{\text{П}}$, calculated from: samples 1–7 at $P_{\text{эф}}=2.0$ МПа $\sigma_{\text{П}}=0.00004T + 0.3007$, $R^2=0.15$ (black line); samples 8–12 at $P_{\text{эф}}=37.0$ МПа $\sigma_{\text{П}}=0.0002T + 0.3024$, $R^2=0.93$ (gray line). The notations see in Fig. 11

Для получения безразмерной зависимости упругих модулей от температуры была проведена нормировка их значений при текущей температуре на величины модулей каждого из образцов при начальной температуре (в нашем случае $T_0=22$ °С). Затем рассчитывались средние значения упругих модулей при $P_{\text{эф}}=2.0$ МПа по семи образцам и при $P_{\text{эф}}=37.0$ МПа по пяти образцам (см. таблицу, рис. 13).

Аппроксимирующие зависимости средних значений нормированных упругих модулей от температуры

Упругие модули	Эффективное давление $P_{эф}$, МПа			
	2.0		37.0	
	Аппроксимирующие зависимости	Коэффициент детерминации R^2	Аппроксимирующие зависимости	Коэффициент детерминации R^2
Модуль Юнга	$E = -0.1693T + 104.12$	0.993	$E = -0.1562T + 103.16$	0.992
Модуль сдвига	$G = -0.1715T + 104.26$	0.989	$G = -0.1894T + 103.94$	0.996
Модуль объемного сжатия	$K = -0.1531T + 103.19$	0.936	$K = -0.0351T + 100.32$	0.644
Коэффициент Пуассона	$\sigma_{II} = 0.0171T + 99.251$	0.232	$\sigma_{II} = 0.0792T + 98.132$	0.927

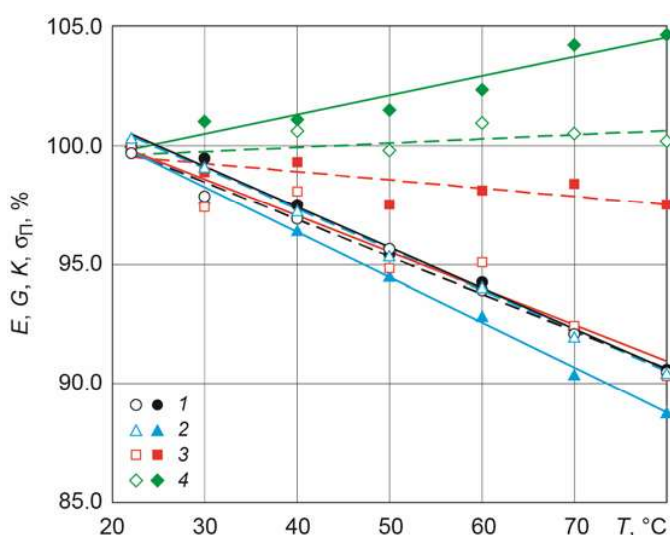


Рис. 13. Графики изменения средних значений нормированных упругих модулей (вертикальная ось, %) от температуры при постоянном эффективном давлении 2.0 и 37.0 МПа. 1–4 – упругие модули Юнга E (1), сдвига G (2), объемного сжатия K (3), коэффициента Пуассона σ_{II} (4) при $P_{эф}=2.0$ МПа (значки без заливки) и при $P_{эф}=37.0$ МПа (залитые значки). Штриховые линии – аппроксимирующие прямые средних значений нормированных упругих модулей, описываемые уравнениями из таблицы при $P_{эф}=2.0$ МПа; сплошные линии – то же при $P_{эф}=37.0$ МПа

Fig. 13. Plots of changes in average values of normalized elastic moduli (vertical axis, %) with temperature at constant effective pressure of 2.0 and 37.0 MPa. 1–4 – elastic moduli of Young E (1), shear G (2), bulk K (3), Poisson's ratio σ_{II} (4) at $P_{эф}=2.0$ MPa (icons without filling) and at $P_{эф}=37.0$ MPa (icons with filling). Dashed lines – approximating straight lines of the average values of the normalized elastic moduli, described by the equations from Table at $P_{эф}=2.0$ MPa; solid lines – the same at $P_{эф}=37.0$ MPa

Применяя аппроксимацию линейной зависимостью в качестве первого приближения для всех модулей, можно видеть, что только коэффициент Пуассона растет с увеличением температуры, причем более высокое эффективное давление (37.0 МПа) только усиливает эту тенденцию. Все остальные упругие модули снижаются при повышении температуры. При этом наибольшее снижение при возрастании температуры отмечено для модуля сдвига.

Учитывая наличие зависимости прочности горных пород от модуля Юнга [Жуков, 2020; Chang, Zoback, Khaksar, 2006], можно ожидать ее снижения с ростом температуры, в частности, уменьшается модуль сдвига (см. рис. 13). Так как для хрупких пород (кремень, кварцевый песчаник) значение коэффициента Пуассона составляет порядка 0.1, а для пластичных пород (каменная соль, гипс, глины) – порядка 0.4, то увеличение коэффициента Пуассона с возрастанием температуры при эффективном давлении 37.0 МПа может выглядеть как повышение пластичности горных пород.

Выводы

На примере коллектора нефти и газа дагинского горизонта шельфа Сахалина показано, что скорости распространения упругих продольных и поперечных волн снижаются с ростом температуры при постоянном эффективном давлении.

Определены зависимости изменения скоростей и упругих модулей от температуры, которые имеют различный характер при значениях эффективного давления 2.0 и 37.0 МПа. Отмечено, что в условиях, близких к пластовому давлению ($P_{эф}=37.0$ МПа), зависимость скорости продольной волны от температуры слабее, чем при низком давлении ($P_{эф}=2.0$ МПа).

Полученные зависимости упругих модулей от температуры показывают, что только коэффициент Пуассона растет с увеличением температуры, причем более высокое эффективное давление только усиливает эту тенденцию. Увеличение коэффициента Пуассона с ростом температуры при эффективном давлении 37.0 МПа может выглядеть как повышение пластичности горных пород. Все остальные упругие модули уменьшаются при повышении температуры. Наиболее выраженное падение при возрастании температуры прослеживается для модуля сдвига, и можно ожидать снижения прочности горных пород с ростом температуры и, в частности, прочности на сдвиг.

Выявленные зависимости упругих характеристик коллекторов нефти и газа могут быть использованы при подготовке проектов разработки месторождений, к примеру, как при планировании методов термического воздействия, так и для оценки степени изменения температуры при разработке месторождений.

Благодарности

Автор благодарит своего коллегу О.В. Иселидзе за содействие при подготовке данной статьи.

Финансирование

Работа выполнена в рамках выполнения Государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

Авчян Г.М., Матвеевко А.А., Стефанкевич З.Б. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях. М.: Недра, 1979. 224 с.

- Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. § 4. Дроссельный эффект при движении жидкостей и газов в пористой среде // Физика нефтяного и газового пласта: Учебник для вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Недра, 1982. С.155–157.
- Жуков В.С. Оценка прочностных и упругих свойств горных пород дагинского горизонта шельфа Сахалина // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 4. С.44–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57
- Жуков В.С. Динамика физико-механических свойств горных пород (динамическая петрофизика) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 9. С.59–63.
- Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн // Вести газовой науки. 2012. № 1(9). С.148–152.
- Жуков В.С. Способ определения трещинной пористости пород: Патент на изобретение RU 2516392. Бюлл. № 8 от 20.05.2014.
- Жуков В.С., Иванов П.Ю. Изменение физических свойств коллектора как результат роста эффективного давления в процессе разработки месторождения (моделирование на примере Южно-Киринского месторождения) // Вести газовой науки. 2015. № 4(24). С.144–148.
- Жуков В.С., Иселидзе О.В., Григорьев Е.Б. Методика экспериментального исследования значений некоторых характеристик образцов горных пород, получаемых при поиске углеводородов, в диапазоне температур 0...100 °С и давлений до 85 МПа. М.: Государственная служба стандартных справочных данных (ГСССД) Зарегистрировано под № ГСССД МЭ 257-2016 во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы (ФГУП “ВНИИМС”), 2016. 31 с.
- Жуков В.С., Люгай Д.В. Определение фильтрационно-емкостных и упругих свойств и электрических параметров образцов горных пород при моделировании пластовых условий: Учебно-методическое пособие. М.: ООО Газпром ВНИИГАЗ, 2016. 56 с.
- Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. 2020. № 4. С.39–50.
- Жуков В.С., Семенов Е.О., Кузьмин Ю.О. Динамика физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа // Вести газовой науки. 2018. № 5(37). С.82–99.
- Жуков В.С., Чуриков Ю.М., Моторыгин В.В. Изменения структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта при моделировании пластовых условий // Вести газовой науки. 2017. № 3(31). С.238–246.
- Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная разработкой месторождений нефти и газа // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Вып. 2. М.: ГЕОС, 2002. С.418–427.
- Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019. № 5. С.61–75.
- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Изд-во МГГУ, 2004. 262 с.
- Рыжов А.Е., Жуков В.С., Иселидзе О.В., Семенов Е.О. Исследование влияния температуры на проницаемость песчаных пород // Газовая промышленность. 2008. № 5 (617). С.56–58.
- Bourbie T., Coussy O., Zizner B. Acoustic of porous media. Gulf Publishing Company, Houston: Book Division. 1987. 334 p.
- Brotos V., Tomas R., Ivorra S., Alarcon J.C. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite // Engineering Geology. 2013. V. 167. P.117–127.
- Chang C., Zoback M.D., Khaksar A. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006. V. 51. P.223–237.
- Gautam P.K., Verma A.K., Maheshwar S., Singh T.N. Thermomechanical analysis of different types of sandstone at elevated temperature // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. V. 49. P.1985–1993.
- Tian H., Kempka T., Xu N.X., Ziegler M. Physical properties of sandstones after high temperature treatment // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2012. V. 45. P.1113–1117.

- Vagnon F., Colombero C., Colombo F., Comina C., Ferrero A.M., Mandrone G., Vinciguerra S.C. Effects of thermal treatment on physical and mechanical properties of Valdieri Marble-NW Italy // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. V. 116. P.75–86.
- Wang Z., Nur A.M. Effect of temperature on wave velocities in sand and sandstones with heavy hydrocarbons // Society of Petroleum Engineers 61-st Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana. 1986. P.158–164
- Zhang L-Y., Mao X-B., Lu A-H. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature // Science in China Series E: Technological Sciences. 2009. V. 52, N 3. P.641–646.
- Zhang Y., Sun Q., He H., Cao L., Zhang W., Wang B. Pore characteristics and mechanical properties of sandstone under the influence of temperature // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 113. P.537–543.

Сведения об авторе

ЖУКОВ Виталий Семенович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-65-65. E-mail: zhukov@ifz.ru

CHANGES IN ELASTIC PROPERTIES OF OIL AND GAS RESERVOIRS AT TEMPERATURE INCREASE

V.S. Zhukov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: zhukov@ifz.ru*

Abstract. The paper presents the results of laboratory studies of rocks at temperature increase. Previously published data on the influence of temperature increase up to 600 °C on physical and mechanical properties of dry sandstones, carbonate, metamorphic and sedimentary rocks are considered. It is shown that the main reasons for the change in their elastic properties are differences in the expansion of mineral grains and the occurrence of cracks at a high temperature (about 400 °C), as well as the decomposition of complex minerals such as kaolinite.

Analysis of published data on changes in longitudinal wave velocities with an increase in temperature from 20 °C to 100 °C in sandstone samples saturated with crude oil, air and brine showed that the velocity of longitudinal waves in samples saturated with crude oil decreases faster than in dry or water-saturated samples. This is due to the rapid decrease in longitudinal wave velocity with increasing temperature in the crude oil, possibly due to the melting of individual oil components. Since, the influence of temperature increase with depth and with additional thermal effects on the physical properties of hydrocarbon reservoirs is poorly investigated, the estimation of velocity reduction in water-saturated reservoirs is an urgent task.

The results of experimental studies of the influence of temperature increase from 20 °C to 80 °C on the velocity of longitudinal and transverse waves of water-saturated sandstone samples at various effective pressures are presented. It is shown that for water-saturated samples, at an effective pressure of 2.0 MPa, the changes in the velocities of longitudinal and transverse waves from temperature are almost the same, but at an effective pressure of 37.0 MPa, the changes in the velocity of the longitudinal wave from temperature are almost two times less than the velocity of the transverse wave.

The dependences of elastic moduli on temperature obtained experimentally showed that only Poisson's ratio increases with increasing temperature, and a higher effective pressure only enhances this tendency. All other elastic moduli decrease as the temperature increases, which makes it possible to expect a decrease in strength of rocks, in particular, shear strength. This may look like an increase in the plasticity of rocks with an increase in temperature, which is accompanied by an increase in Poisson's ratio. The dependences of the elastic characteristics of oil and gas reservoirs on temperature obtained in this paper can be used in the preparation of field development projects, in particular, in the planning of thermal impact methods.

Keywords: elastic properties, rock, oil and gas reservoir, temperature increase, water saturation, reservoir conditions, effective pressure.

Acknowledgements

The author thanks his colleague O.V. Iselidze for assistance in the preparation of this article.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Conflict of interest

The author declares they have no conflict of interest.

References

- Avchyan G.M., Matveenkov A.A., Stefankevich Z.B., *Petrofizika osadochnykh porod v glubinnykh usloviyakh* (Petrophysics of sedimentary rocks in deep conditions), Moscow: Nedra, 1979, 224 p. [In Russian].
- Bourbie T., Coussy O., Zisner B., Acoustic of porous media. Gulf Publishing Company, Houston: Book Division, 1987, 334 p.
- Brotons V., Tomas R., Ivorra S., Alarcon J.C., Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite, *Engineering Geology*, 2013, vol. 167, pp. 117-127.
- Chang C, Zoback M. D., Khaksar A., Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, vol. 51, pp. 223-237.
- Gautam P.K., Verma A.K., Maheshwar S., Singh T.N., Thermomechanical analysis of different types of sandstone at elevated temperature, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, pp. 1985-1993.
- Gimatudinov Sh.K., Shirkovsky A.I., § 4. Throttling effect in the movement of liquids and gases in a porous medium, *Fizika neftyanogo i gazovogo plasta, Uchebnik dlya vuzov* (Physics of the oil and gas reservoir, Textbook for universities), Ed. 3rd conversion. and supplement, Moscow: Nedra, 1982, pp. 155-157. [In Russian].
- Tian H., Kempka T., Xu N.X., Ziegler M., Physical properties of sandstones after high temperature treatment, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 1113-1117.
- Kuzmin Yu.O., Recent anomalous subsoil geodynamics induced by the development of oil and gas fields, *Fundamental'nyi bazis novykh tekhnologii neftyanoi i gazovoi promyshlennosti, vyp. 2* (Fundamental basis of new technologies of the oil and gas industry, issue 2), Moscow: GEOS, 2002, pp. 418-427. [In Russian].
- Kuzmin Y.O., Induced deformations of fault zones, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 753-765.
- Kuzmin Yu.O., Zhukov V.S., *Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornykh porod* (Recent Geodynamics and Physical Properties Variations of Rocks), Moscow: Izdatel'stvo MGGU, 2004, 262 p. [In Russian].
- Ryzhov A.E., Zhukov V.S., Iselidze O.V., Semenov E.O., Study of the effect of temperature on sand permeability, *Gazovaya promyshlennost* (Gas Industry of Russia), 2008, no. 5 (617), pp. 56-58. [In Russian].
- Vagnon F., Colombero C., Colombo F., Comina C., Ferrero A.M., Mandrone G., Vinciguerra S.C., Effects of thermal treatment on physical and mechanical properties of Valdieri Marble-NW Italy, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 116, pp. 75-86.
- Wang Z., Nur A.M., Effect of temperature on wave velocities in sand and sandstones with heavy hydrocarbons, *Society of Petroleum Engineers 61-st Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, 1986, pp. 158-164.
- Zhang L-Y., Mao X-B., Lu A-H., Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature, *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 641-646.
- Zhang Y., Sun Q., He H., Cao L., Zhang W., Wang B., Pore characteristics and mechanical properties of sandstone under the influence of temperature, *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 113, pp. 537-543.

- Zhukov V.S., Dynamics of physical and mechanical properties of rocks (dynamic petrophysics), *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* (Mining Information and Analytical Bulletin), 2002, no. 9, pp. 59-63. [In Russian].
- Zhukov V.S., Estimating the Strength and Elasticity of Rocks in the Dagi Formation on the Sakhalin Shelf, *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* (Mining Information and Analytical Bulletin), 2020, no. 4, pp. 44-57. [In Russian]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57
- Zhukov V.S., Assessment of Rocks Fracture by Propagation Elastic Waves Velocity, *Vesti gazovoi nauki* (Lead Gas Science), 2012, no. 1(9), pp. 148-152. [In Russian].
- Zhukov V.S., *Sposob opredeleniya treshchinnoi poristosti porod* (Method of Rock Fractured Porosity Determination), Patent RU 2516392, 20.05.2014, Bull. no. 8. [In Russian].
- Zhukov V.S., Churikov Yu.M., Motorygin V.V., Modification of Porous Space Structure in Reservoirs of Dagi Horizon at Transition from Atmospheric Conditions to In-Situ Ones, *Vesti gazovoi nauki* (Lead Gas Science), 2017, no. 3(31), pp. 238-246. [In Russian].
- Zhukov V.S., Ivanov P.Yu., Change in the physical properties of the reservoir as a result of the increase in effective pressure during the development of the deposit (simulation using the example of the Yuzhno-Kirinskoye deposit), *Vesti gazovoi nauki* (Lead Gas Science), 2015, no. 4(24), pp. 144-148. [In Russian].
- Zhukov V.S., Iselidze O.V., Grigoriev E.B., *Metodika eksperimental'nogo issledovaniya znachenii nekotorykh kharakteristik obratstv gornykh porod, poluchaemykh pri poiske uglevodorodov, v diapazone temperatur 0...100 °S i davlenii do 85 MPa* (Method of experimental study of the values of some characteristics of rock samples obtained during the search for hydrocarbons in the temperature range 0...100 °C and pressures up to 85 MPa), Moscow: Gosudarstvennaya sluzhba standartnykh spravochnykh dannykh (GSSSD) Zaregistrirvano pod № GSSSD ME 257-2016 vo Vserossiiskom nauchno-issledovatel'skom institute metrologicheskoi sluzhby (FGUP "VNIIMS"), 2016, 31 p. [In Russian].
- Zhukov V.S., Kuzmin Yu.O., The Influence of Fracturing of the Rocks and Model Materials on P-wave Propagation Velocity: Experimental Studies, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 470-480.
- Zhukov V.S., Lugai D.V., *Opredelenie fil'tratsionno-emkostnykh i uprugikh svoistv i elektricheskikh parametrov obratstv gornykh porod pri modelirovanii plastovykh uslovii* (Determination of filtration-capacitive and elastic properties and electrical parameters of rock samples in modeling formation conditions): Educational and methodological manual, Moscow: OOO Gazprom VNIIGAZ, 2016, 56 p. [In Russian].
- Zhukov V.S., Semenov E.O., Kuzmin Yu.O., Dynamics of physical properties of reservoirs during development of oil and gas fields, *Vesti gazovoi nauki* (Lead Gas Science), 2018, no. 5(37), pp. 82-99. [In Russian].

About the author

ZHUKOV Vitaly Semenovich – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254 65-65. E-mail: zhukov@ifz.ru