

УДК 550.83; 38.53.19

ВЛИЯНИЕ МЕЖЗЕРНОВОЙ И ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ КОЛЛЕКТОРОВ ЧАЯНДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

© 2022 г. В.С. Жуков

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

Представлены результаты лабораторных исследований влияния межзерновой и трещинной пористости коллекторов Чаюдинского месторождения (Восточная Сибирь) на удельное электросопротивление и параметр пористости в условиях, моделирующих пластовые. Показано, что с ростом межзерновой и общей пористости горных пород уменьшается и удельное электрическое сопротивление. Для трещинной пористости надёжной статистической зависимости не выявлено. В случае, когда значение трещинной пористости анализируемых образцов составляет 0.2 и более от общей пористости, их электропроводность практически определяется электропроводностью трещин. Выявлено, что показатель цементации в уравнении Арчи–Дахнова связан с величиной трещинной пористости и для рассмотренных образцов в случае взаимосвязанных трещин он равен 1.00, а при наличии только межзерновой пористости – 2.36.

Показано различие влияния межзерновой и трещинной пористости на удельное электрическое сопротивление горных пород и параметр пористости. Влияние межзерновой пористости хорошо описывается уравнением Арчи–Дахнова. Наличие взаимосвязанной трещинной пористости аппроксимируется частным случаем уравнения Агилера. Полученные значения межзерновой и трещинной пористости свидетельствуют, что трещинная пористость изученных образцов состоит из трещин, слабо связанных между собой. Для реальных значений межзерновой и трещинной пористости исследованных образцов горных пород рассчитаны параметры пористости по уравнениям Арчи–Дахнова и Агилера, которые удовлетворительно описывают зависимости параметра пористости от пористости горных пород и могут быть использованы как для подсчёта запасов углеводородов, так и для проектирования процесса разработки месторождения.

Ключевые слова: горная порода, пористость, трещинная пористость, межзерновая пористость, удельное электрическое сопротивление, параметр пористости.

Введение

Наличие в горных массивах разнообразных трещин, начиная с микротрещин и заканчивая протяжёнными зонами тектонических разломов, оставляет актуальными исследования воздействия трещин на различные петрофизические свойства горных пород. Перспективным подходом представляется совершенствование имеющихся методов и разработка новых подходов к определению роли трещин и оценке их влияния на петрофизические свойства коллекторов в современных геодинамических процессах в нефтегазоносных пластах с использованием результатов анализа горных пород с различными видами пористости [Кузьмин, 2002, 2007; Kuzmin, 2019].

Трещины образуются при воздействии на породу сил, превышающих предел прочности породы при различных геологических и антропогенных процессах, и могут быть как внешними для породы (тектонические, гравитационные и др.), так и внутренними, возникающими при изменении температуры, влажности, плотности породы.

Форма трещин отличается от формы других пустот в породах, таких как поры, каверны и др., тем, что протяжённость стенок трещин во всех направлениях значительно (в сотни и тысячи раз) больше раскрытия трещин – расстояния между стенками.

Состояние проблемы

Широкое использование различных электрических методов – полевых и скважинных – для исследования горных пород предоставляет практические возможности для изучения влияния межзерновой и трещинной пористости на удельное электрическое сопротивление горных пород [Авалиани, 1984; Пархоменко, 1965; Пархоменко, Бондаренко, 1960; Рязанцев, 2015], включая изменения величины и структуры их порового пространства при изменении напряжённого состояния [Барсуков, 1970; Соколов и др., 1982; Amadu, Gawu, Abanyie, 2018; Szala et al., 2018; Jones, Sentanac, Zielinski, 2014]. Физической основой применения методов электрического каротажа для измерения коэффициента пористости гранулярных коллекторов является зависимость параметра пористости породы (P_n), насыщенной электропроводящим флюидом, от величины пористости (K_n) и структуры порового пространства – уравнение Арчи или Арчи–Дахнова [Дахнов, 1941, 1975; Archie, 1942].

Известно, что удельное электрическое сопротивление горных пород определяется их минеральным составом, пористостью и влажностью, минерализацией поровых растворов, текстурой и температурой. Но электрическое сопротивление даже мономинеральной породы может измениться на несколько порядков из-за сильного влияния примесей на удельное электрическое сопротивление минералов. К тому же, горные породы состоят из зёрен минералов, границы между которыми считаются дефектами и оказывают заметное влияние на величину их сопротивления. Эти факторы сильно затрудняют теоретические расчёты удельного сопротивления даже мономинеральной породы. Для горных пород, сложенных несколькими минералами со значительно отличающимися сопротивлениями (например, кварцевого песчаника с примесями магнетита) существуют теории, которые дают правдоподобное значение электрического сопротивления горной породы в зависимости от состава [Кобранова, 1986; Пархоменко, 1965]. В работе [Сизин, Шкуратник, 2015] рассмотрено теоретическое решение задачи о влиянии концентрации микротрещин в образце горной породы на его электрическое сопротивление, используя приближение Максвелла применительно к трещинам. Численные оценки авторов относительного изменения проводимости образцов для различных значений концентрации трещин свидетельствуют о малой чувствительности метода к микротрещиноватости исследуемых образцов. Отмечено существенное несоответствие полученных теоретических оценок с имеющимися экспериментальными данными. Основные допущения в приближении Максвелла заключались в том, что включения имели сферическую форму (хотя зачастую это не выполняется) и их объёмное содержание было не слишком велико. Формула Максвелла характеризуется весьма высокой точностью при всех значениях электропроводности и любом – случайном или упорядоченном – взаимном расположении сфер. Дальнейшее уточнение теории Максвелла было направлено на учёт формы включений.

Многие горные породы имеют нарушения, которые проявляются в виде дефектов различной природы с масштабами от дислокаций до макротрещин. Нередко при изучении свойств горных пород на образцах основным видом дефектов выступает микротрещиноватость. Э.И. Пархоменко указывала, что “коллекторские свойства горных пород определяются не только открытой первичной пористостью, но и в значительной степени широко развитыми трещинами малого раскрытия” [Пархоменко, 1965, с. 91].

Для высокоомных пород, таких как кварцевые песчаники, которые содержат низкоомные включения (поры, микротрещины), имеется большое количество эмпирических данных, полученных при нефтепромысловых исследованиях и хорошо аппроксимируемых эмпирической формулой Арчи

$$\frac{\sigma_{п}}{\sigma_{г}} = (1 - f)^m, \quad (1)$$

в которой $\sigma_{п}$ – значение электропроводности смеси, определяемое экспериментально; $\sigma_{г}$ – проводимость непрерывной фазы (матрицы) ($\sigma_{г} \gg \sigma_{п}$); f – объёмное содержание рассеянных проводящих включений; m – показатель цементации, для сцементированных песчаников его величина составляет 1.8–2.0.

Существует несколько подходов к измерению удельного сопротивления и параметра пористости пород с двойной пористостью. Так, выведено уравнение, которое связывает удельное электрическое сопротивление горной породы, имеющей хаотическую трещинную и межзерновую пористость, с её общей (суммарной) пористостью $K_{п}$ [Нечай, 1964; Пархоменко, 1965, с. 90–91]

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{2K_{п.тр}}{2\rho_{в}} + \frac{3 - 2K_{п.тр}}{\rho_{п}(3 - K_{п.тр})}. \quad (2)$$

Здесь ρ_0 – удельное электрическое сопротивление породы (измеренное), Ом·м; $\rho_{п}$ – удельное электрическое сопротивление породы без трещин, Ом·м; $\rho_{в}$ – удельное электрическое сопротивление электропроводящего раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м; $K_{п.тр}$ – коэффициент трещинной (вторичной) пористости.

В работе [Вендельштейн, Резванов, 1978] также рассматривается влияние сложной структуры трещинно-межзерновой пористости на удельное электрическое сопротивление водонасыщенных пород

$$\rho_{вп.т} = P_{п.т}\rho_{в} = \frac{P_{п.бл}\rho_{в}}{AP_{п.бл}K_{п.тр} + 1}, \quad (3)$$

где $\rho_{вп.т}$ – удельное электрическое сопротивление трещинно-межзерновой породы, Ом·м; $P_{п.т}$ – параметр пористости трещинно-межзерновой породы; $\rho_{в}$ – удельное электрическое сопротивление пластовой воды, Ом·м; $P_{п.бл}$ – параметр пористости блока, определяемый для заданной пористости блока; A – коэффициент, зависящий от ориентации трещин относительно направления, в котором ведётся измерение удельного сопротивления и изменяющийся от 0.0 до 1.0 (для хаотической трещиноватости $A=0.63$).

Вычисление параметра пористости блока $P_{п.бл}$ вызывает некоторые затруднения, обусловленные тем, что в этом блоке породы должны иметь только межзерновую пористость. В отличие от него, $P_{п.т}$ – параметр пористости трещинно-межзерновой породы определяется фактически, как отношение удельного электрического сопротивления трещинно-межзерновой породы к удельному электрическому сопротивлению пластовой воды.

По данным [Вендельштейн, Резванов, 1978] трещины оказывают основное влияние на удельное электрическое сопротивление породы при выполнении условия $K_{п.кав}/K_{п.тр} < 2$, где $K_{п.кав}$ – коэффициент каверновой пористости. А зависимость параметра пористости трещинно-кавернозной породы $P_{п.тк}$ от её пористости мало отличается от зависимости $P_{п.т} = f(K_{п.т})$ для пород только с межзерновой пористостью при выполнении условия $2 < K_{п.кав}/K_{п.тр} < 10$. Таким образом, при каверновой пористости, не превышающей в 2–10 раз величину трещинной пористости, основное влияние на величину удельного электрического сопротивления будут оказывать межзерновая и трещинная компоненты пористости.

В работах [Aguilera, 1976; Tiab, Donaldson, 2004] приведено уравнение, связывающее параметр пористости P_n породы с двойной пористостью с её общей пористостью K_n . При этом предполагается, что порода содержит две параллельные системы (матрица и трещины), проводящие электрический ток

$$P_n = \left(\frac{\rho_b \rho_0}{v K_{n,тр} \rho_0 + \rho_b (1 - v)} \right) / \rho_b \cdot \quad (4)$$

Здесь ρ_0 – удельное электрическое сопротивление породы, Ом·м; ρ_b – удельное электрическое сопротивление электропроводящего раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м.; $v = K_{n,тр}/K_n$ – коэффициент соотношения трещинной и общей пористости.

При отсутствии трещин $v = 0$ и уравнение (4) преобразуется к обычному виду

$$P_n = \rho_0 / \rho_b \cdot \quad (5)$$

В случае чисто трещинных коллекторов, когда отсутствует межзерновая (гранулярная) пористость $v = 1$ и уравнение (4) записывается следующим образом:

$$P_n = 1 / K_{n,тр} \cdot \quad (6)$$

Результаты экспериментальных исследований

В ходе лабораторных исследований в условиях, моделирующих пластовые (всестороннее давление 50.0 МПа, поровое давление 13.0 МПа, температура 22 °С), анализировались образцы песчаника вендского возраста, насыщенные моделью пластовой воды (раствором NaCl 350 г/л) и имевшие открытую пористость в атмосферных условиях от 3.2 до 18.3 % [Жуков, Моторыгин, 2017]. Было рассмотрено тридцать семь образцов, изготовленных из керна, извлечённого из одной из скважин Чайядинского нефтегазоконденсатного месторождения Восточной Сибири. Песчаники от мелко- до грубозернистых, разно отсортированы, по составу полевошпатово-кварцевые, кварцевые олигомиктовые сцементированы первичным глинистым цементом хлорит-гидро-слюдистого состава (содержание от 1–2 % до 5–10 %). Определение пористости, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн и удельного электрического сопротивления выполнялось по методике, приведённой в работе [Жуков, Люгай, 2016]. Образцы загружались в камеру высокого давления, затем всестороннее и поровое давления ступенчато увеличивались до значений, соответствующих пластовым. Наличие данных о величинах открытой пористости и скорости упругих волн исследованных образцов позволило рассчитать значения межзерновой и трещинной компонент пористости в соответствии с работами [Жуков, 2012, 2014; Zhukov, Kuzmin, 2020]. С учётом установленных значений общей и трещинной пористости для рассмотренных образцов горных пород были найдены параметры пористости по Нечай (2) и по Агилера (4) и параметр пористости по фактически полученным данным (5). Сопоставление расчётных величин параметра пористости с фактическими значениями, представленное на рис. 1, показало, что расчёт по Агилера наиболее близок к фактическим данным, рассчитанным при моделировании пластовых условий. Чтобы отдельно оценить влияние межзерновой и трещинной пористости на удельное электрическое сопротивление применялась модель, которая предусматривает параллельное соединение трещин и поровых каналов [Нечай, 1964; Aguilera, 1976]. При расчёте удельного электрического сопротивления только межзерновой пористости (поровых каналов) была использована известная зависимость – уравнение Арчи–Дахнова, выведенная для гранулярных коллекторов [Дахнов, 1985; Tiab, Donaldson, 2004]

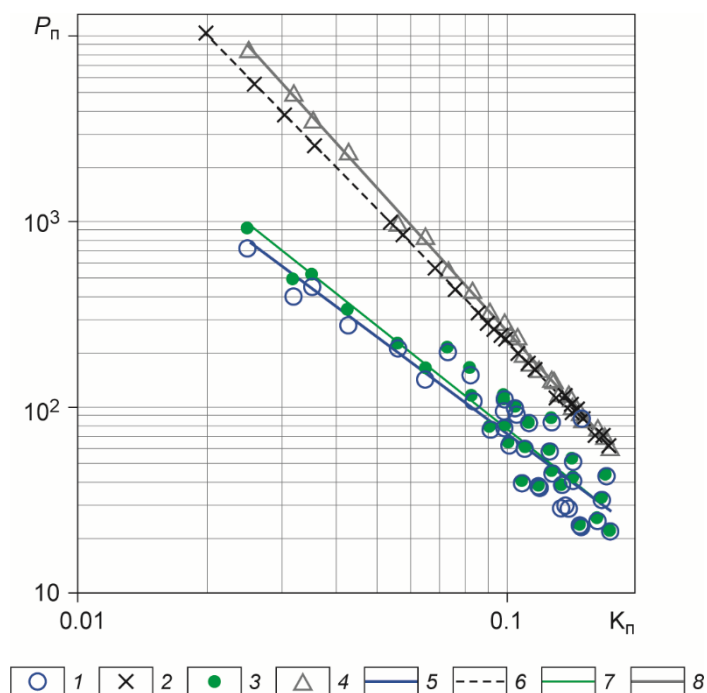


Рис. 1. Зависимость параметра пористости P_n , рассчитанного по фактически полученным данным (1), по уравнению Арчи–Дахнова для межзерновой пористости (2), по Агилера (3) и по Нечай (4) в зависимости от общей пористости K_n образцов коллектора Чайядинского месторождения. 5–8 – аппроксимирующие линии (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $P_n=1.37K_n^{-1.72}$, $R^2=0.86$ (5); $P_n=1.00K_n^{-2.36}$, $R^2=1.00$ (6); $P_n=1.14K_n^{-1.83}$, $R^2=0.87$ (7); $P_n=0.75K_n^{-2.54}$, $R^2=1.00$ (8)

Fig. 1. Dependence of the porosity parameter P_n calculated from the actually obtained data (1), by the Archie–Dakhnov equation for intergranular porosity (2), by Aguilera (3) and by Nechai (4), depending on the total porosity K_n of the samples of the Chayandinsky reservoir field. 5–8 – approximating lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $P_n=1.37K_n^{-1.72}$, $R^2=0.86$ (5); $P_n=1.00K_n^{-2.36}$, $R^2=1.00$ (6); $P_n=1.14K_n^{-1.83}$, $R^2=0.87$ (7); $P_n=0.75K_n^{-2.54}$, $R^2=1.00$ (8)

$$P_n = \frac{a}{K_{п.мз}^m}, \tag{7}$$

где a – коэффициент извилистости; $K_{п.мз}$ – коэффициент межзерновой пористости; m – показатель цементации, зависящий от формы пор и распределения их по размерам.

В случае гранулярных пород без трещин коэффициент извилистости a в уравнении (7) обычно принимается равным единице. Для учёта степени цементации показатель степени m при коэффициенте пористости был подобран таким образом, чтобы значение параметра пористости образца с нулевой трещинной пористостью было равно фактически полученному значению параметра пористости этого образца. При выполнении этого условия показатель цементации $m=2.36$. Зная, что параметр пористости вычисляется как отношение удельного сопротивления насыщенной раствором солей горной породы к удельному сопротивлению насыщающего раствора (5), и, предполагая, что удельное сопротивление раствора в порах и трещинах одинаковое, были рассчитаны удельные сопротивления для межзерновой, трещинной и общей пористости (рис. 2). Можно видеть, что с ростом межзерновой и общей пористости уменьшается и удельное электрическое сопротивление. Для трещинной пористости (пустотности) надёжной статической зависимости не выявлено.

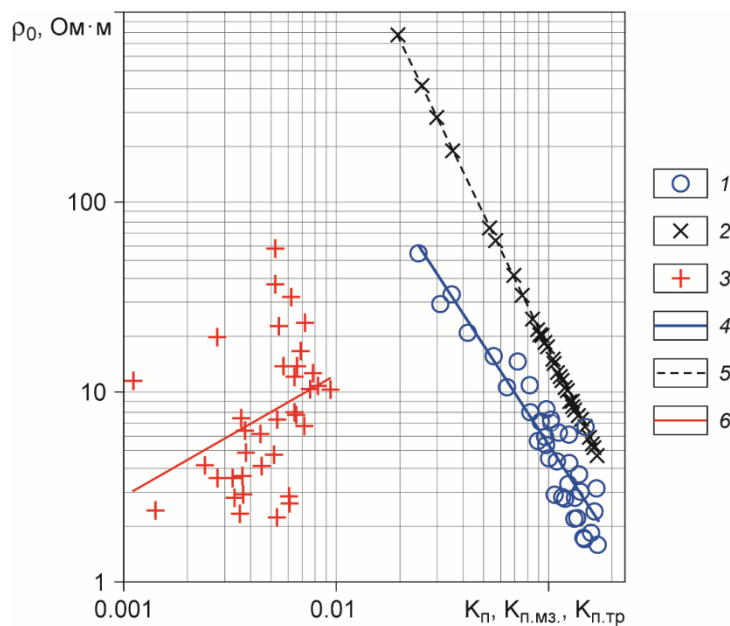


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления ρ_0 от общей K_n (1), межзерновой $K_{п.мз}$ (2) и трещинной $K_{п.тр}$ (3) пористости исследованных образцов горных пород. 4–6 – аппроксимирующие линии (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $\rho_0=0.10K_n^{-1.72}$, $R^2=0.86$ (4); $\rho_0=0.07K_{п.мз}^{-2.36}$, $R^2=1.00$ (5); $\rho_0=231.99K_{п.тр}^{0.64}$, $R^2=0.12$ (6)

Fig. 2. Dependence of the electrical resistivity ρ_0 on the total K_n (1), intergranular $K_{п.мз}$ (2) and fracture $K_{п.тр}$ (3) porosity of the studied rock samples. 4–6 – approximating lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $\rho_0=0.10K_n^{-1.72}$, $R^2=0.86$ (4); $\rho_0=0.07K_{п.мз}^{-2.36}$, $R^2=1.00$ (5); $\rho_0=231.99K_{п.тр}^{0.64}$, $R^2=0.12$ (6)

Из физических предпосылок можно ожидать, что с ростом доли трещинной пористости $v=K_{п.тр}/K_n$ будет расти и вклад электропроводности по трещинам. Для проверки этого предположения была построена зависимость удельной электропроводности всех исследованных образцов от полученной для каждого из них доли трещинной пористости (рис. 3). Видно, что для данной коллекции образцов горных пород уже при коэффициенте соотношения трещинной и общей пористости близком к 0.2 общая удельная электропроводность $1/\rho_0$ практически полностью определяется электропроводностью трещин. А при стремлении этого соотношения к нулю, т.е. при отсутствии трещин, общая электропроводность будет характеризоваться электропроводностью межзернового порового пространства.

Переходя к параметру пористости, получим зависимости параметра пористости от общей, межзерновой и трещинной пористости (рис. 4). В работе [Tiab, Donaldson, 2004] приводится выражение для параметра пористости (6) при условии присутствия только трещинной пористости, причём трещины открыты и взаимосвязаны (трещины первого типа). В этом случае коэффициент извилистости и показатель цементации для трещинной пористости примерно равны единице. Однако межзерновая пористость терригенной породы может быть равна нулю только тогда, когда пространство между зёрнами полностью заполнено глинистым цементом. На рис. 4 величины пористости приведены в десятичных единицах от объёма всего пустотного пространства и видно, что значения трещинной пористости образцов на порядок меньше значений их межзерновой пористости. При таком соотношении, естественно, трудно ожидать предельного случая взаимосвязанных трещин.

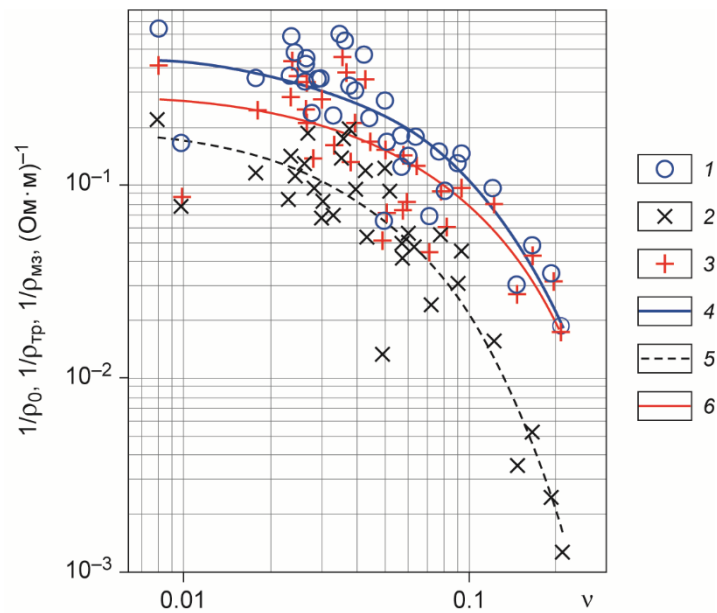


Рис. 3. Зависимость удельной электропроводности общей $1/\rho_0$ (1), межзерновой $1/\rho_{мз}$ (2) и трещинной $1/\rho_{тр}$ (3) от доли трещинной пористости ν исследованных образцов горных пород. 4–6 – аппроксимирующие линии (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $1/\rho_0=0.50e^{-15.83\nu}$, $R^2=0.76$ (4); $1/\rho_{мз}=0.21e^{-23.37\nu}$, $R^2=0.86$ (5); $1/\rho_{тр}=0.31e^{-13.93\nu}$, $R^2=0.65$ (6)

Fig. 3. Dependence of the total $1/\rho_0$ (1), intergranular $1/\rho_{тр}$ (2) and fracture $1/\rho_{мз}$ (3) electrical conductivity on the fraction of fracture porosity ν of the studied rock samples. 4–6 – approximating lines (with coefficients of determination R^2), described by the equations: $1/\rho_0=0.50e^{-15.83\nu}$, $R^2=0.76$ (4); $1/\rho_{мз}=0.21e^{-23.37\nu}$, $R^2=0.86$ (5); $1/\rho_{тр}=0.31e^{-13.93\nu}$, $R^2=0.65$ (6)

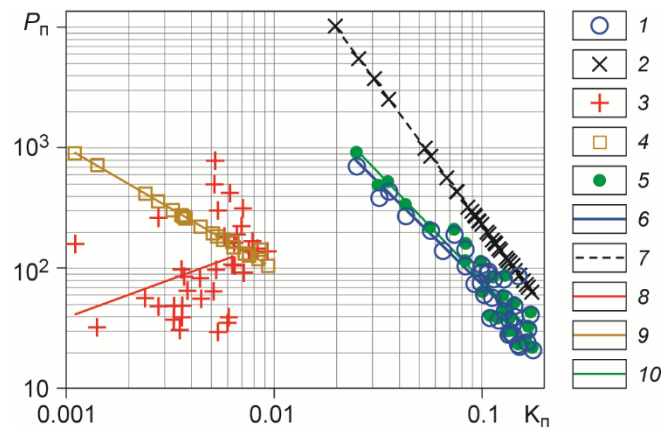


Рис. 4. Зависимость параметра пористости P_n : фактического (1), расчётного межзернового при $m=2.36$ (2), трещинного фактического (3), трещинного расчётного (4), рассчитанного по Агилера (5), от пористости K_n исследованных образцов горных пород. 6–10 – аппроксимирующие линии (с коэффициентами детерминации R^2): $P_n=1.37K_n^{-1.72}$, $R^2=0.86$ (6); $P_n=1.00K_n^{-2.36}$, $R^2=1.00$ (7); $P_n=3118.13K_n^{0.64}$, $R^2=0.12$ (8); $P_n=1.00K_n^{-1.00}$, $R^2=1.00$ (9); $P_n=1.14K_n^{-1.83}$, $R^2=0.87$ (10)

Fig. 4. Dependence of the porosity parameter P_n : actual (1), calculated intergranular at $m=2.36$ (2), actual fractured (3), calculated fractured (4), calculated by Aguilera (5) on the porosity K_n of the studied rock samples. 6–10 – approximating lines (with coefficients of determination R^2): $P_n=1.37K_n^{-1.72}$, $R^2=0.86$ (6); $P_n=1.00K_n^{-2.36}$, $R^2=1.00$ (7); $P_n=3118.13K_n^{0.64}$, $R^2=0.12$ (8); $P_n=1.00K_n^{-1.00}$, $R^2=1.00$ (9); $P_n=1.14K_n^{-1.83}$, $R^2=0.87$ (10)

Зависимость (6) и полученные расчётным путём значения параметра трещинной пористости также показаны на рис. 4. Сопоставление параметра пористости для трещин первого типа и вычисленного нами параметра трещинной пористости говорит о том, что полученная нами трещинная пористость весьма далека от предельного случая взаимосвязанных трещин, а параметр трещинной пористости не имеет явно выраженной и надёжной статической зависимости от трещинной пористости.

Анализ рис. 4 и сопоставление уравнений зависимости параметра пористости от пористости для различных видов пористости позволяет предположить, что показатель цементации m в уравнении Арчи–Дахнова связан с величиной трещинной пористости. В случае взаимосвязанных трещин (уравнение (6)) он равен 1.00, а для случая взаимосвязанных межзерновых пор составляет от 1.83 по уравнению Агилера (4) или 2.36 по уравнению Нечай (2) в предположении, что исследованные образцы имели только межзерновую пористость.

Результаты определения зависимости параметра пористости от доли трещинной пористости приведены на рис. 5, на котором по горизонтали отложена величина соотношения трещинной и общей пористости, а по вертикали параметр общей пористости образцов и две составляющие его компоненты – параметры межзерновой и трещинной пористости.

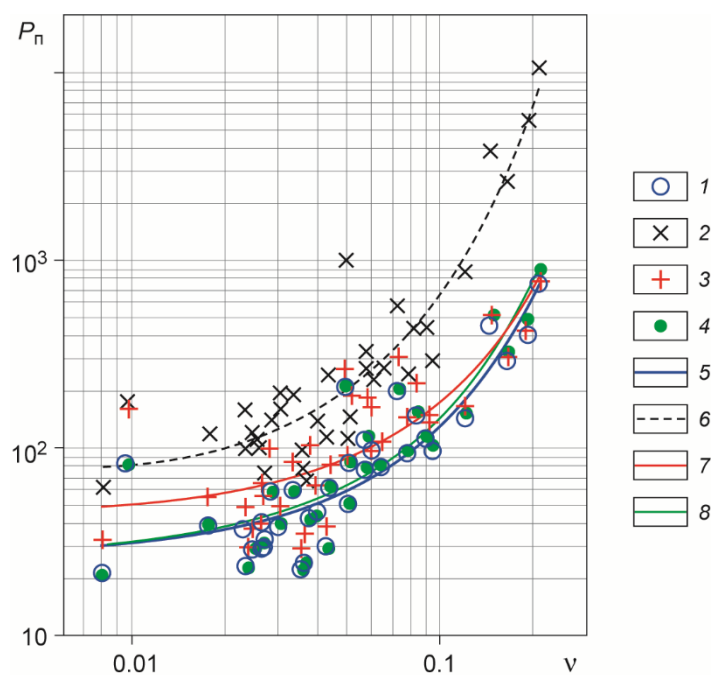


Рис. 5. Зависимость параметра пористости P_n : фактического (1), расчётного межзернового при $m=2.36$ (2), трещинного (3) и рассчитанного по Агилера (4) от доли трещинной пористости v в общей пористости исследованных образцов горных пород. 5–8 – аппроксимирующие линии (с коэффициентами детерминации R^2), описываемые уравнениями: $P_n=26.74e^{15.83v}$, $R^2=0.76$ (5); $P_n=62.97e^{23.37v}$, $R^2=0.86$ (6); $P_n=43.47e^{13.93v}$, $R^2=0.65$ (7); $P_n=26.55e^{16.92v}$, $R^2=0.79$ (8)

Fig. 5. Dependence of the porosity parameter P_n : actual (1), calculated intergranular at $m=2.36$ (2), fractured (3) and calculated by Aguilera (4) on the fraction of fractured porosity v in the total porosity of the studied rock samples. 5–8 – approximating lines (with coefficients of determination R^2) described by the equations: $P_n=26.74e^{15.83v}$, $R^2=0.76$ (5); $P_n=62.97e^{23.37v}$, $R^2=0.86$ (6); $P_n=43.47e^{13.93v}$, $R^2=0.65$ (7); $P_n=26.55e^{16.92v}$, $R^2=0.79$ (8)

Видно, что для рассматриваемой коллекции образцов горных пород уже при коэффициенте соотношения трещинной и общей пористости, близком к 0.2, параметр общей пористости близок к параметру трещинной пористости. При стремлении этого соотношения к нулю, т.е. при отсутствии трещин, параметр общей пористости будет определяться параметром межзерновой пористости.

Заключение

Таким образом, ясно, что межзерновая и трещинная пористости оказывают разное влияние на удельное электрическое сопротивление и параметр пористости горных пород. Так, влияние межзерновой пористости хорошо описывается уравнением Арчи–Дахнова с коэффициентом цементации m , характеризующим структуру межзернового пространства. В отличие от него влияние наличия взаимосвязанной трещинной пористости аппроксимируется уравнением (6). Показатель цементации m в уравнении Арчи–Дахнова, возможно, связан с величиной трещинной пористости и изменяется от 1.00 для случая взаимосвязанных трещин до 2.36 в предположении, что изученные образцы имели только межзерновую пористость.

Параметры пористости, рассчитанные по Нечай и по Агилера, удовлетворительно описывают зависимости параметра пористости от значений межзерновой и трещинной пористости исследованных образцов горных пород и могут быть использованы как для уточнения подсчёта запасов углеводородов, так и для проектирования процесса разработки месторождения.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Авалиани З.С.* Зависимость электрических свойств горных пород и минералов от трещиноватости и температуры: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Тбилиси: Институт геофизики АН Грузинской ССР, 1984. 166 с.
- Барсуков О.М.* О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами // Известия АН СССР. Физика Земли. 1970. № 1. С.84–89.
- Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А.* Геофизические методы определения параметров нефтегазовых коллекторов. М.: Недра, 1978. 318 с.
- Дахнов В.Н.* Каротаж скважин: Интерпретация каротажных диаграмм. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1941. 496 с.
- Дахнов В.Н.* Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Недра, 1985. 310 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.* 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. Бюл. № 8 от 20.05.2014.
- Жуков В.С., Моторыгин В.В. Влияние различных видов пористости на скорости упругих волн и электропроводность коллекторов Чаюдинского месторождения // Вести газовой науки. 2017. № 2(30). С.223–233.
- Кобранова В.Н. Петрофизика. Учебник для вузов. Издание 2-е, дополненное и переработанное. М.: Недра, 1986. 392 с.
- 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. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2007. № 1. С.33–40.
- Нечай А.М. Вопросы количественной оценки вторичной пористости трещиноватых коллекторов нефти и газа // Прикладная геофизика. 1964. Вып. 38. С.201–212.
- Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.
- Пархоменко Э.И., Бондаренко А.Т. Влияние одноосного давления на электросопротивление горных пород // Известия АН СССР. Сер. Геофизическая. 1960. № 2. С.326–332.
- Рязанцев П.А. Оценка трещиноватости скального массива на основе моделей электротомографии // Геофизика. 2015. № 1. С.41–50.
- Соболев Г.А., Семерчан А.А., Салов Б.Г., Шпетцлер Х.А., Сондергельд К.Х., Баданов В.Н., Кольцов А.В., Лось В.Ф., Насимов Р.М., Пономарев А.В., Стаховский И.Р., Терентьев В.А., Турецкий И.М. Предвестники разрушения большого образца горной породы // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. № 8. С.29–43.
- Сизин П.Е., Шкуратник В.Л. Теоретическая оценка влияния микротрещиноватости горных пород на их проводимость в приближении Максвелла // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 3. С.212–218.
- Aguilera R. Analysis of Naturally Fractured Reservoirs from Conventional Well Log // Journal of Petroleum Technology. 1976. V. 28, N 7. P.764–772.
- Amadu C.C., Gawu S.K.Y., Abanyie K.S. Experimental Study of Electrical Resistivity to Rock Fracture Intensity and Aperture Size // International Journal of Physics. 2018. V. 6, N 3. P.85–92.
- Archie G.E. The Electrical resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // Transactions of the AIME. 1942. V. 146. P.54–62.
- Jones G., Sentanac P., Zielinski M. Desiccation Cracking using 2-D and 3-D Electrical Resistivity Tomography: Validation on a Flood Embankment // Journal of Applied Geophysics. 2014. V. 106. P.196–211. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.04.018>
- Kuzmin Y.O. Induced Deformations of Fault Zones // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2019. V. 55, N 5. P.753–765. DOI: 10.1134/S1069351319050069
- Szalai S., Kovács A., Kuslits L., Facskó G., Gribovszki K., Kalmár J., Szarka L. Characterization of Fractures and Fracture Zones in a Carbonate Aquifer Using Electrical Resistivity Tomography and Pricking Probe Methods // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2018. N 6. P.1–21. <https://doi.org/10.4236/gep.2018.64001>
- Tiab D., Donaldson E.C. Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties, 2nd ed. Oxford: Gulf, 2004. 866 p.
- Zhukov V.S., Kuzmin Y.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. V. 56, N 4. P.470–480. DOI: 10.1134/S1069351320040102

Сведения об авторе

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

INFLUENCE OF INTERGRANULAR AND FRACTURED POROSITY ON THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF RESERVOIRS OF THE CHAYANDINSKY FIELD (EASTERN SIBERIA)

V.S. Zhukov

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

Abstract. The results of laboratory studies of the influence of intergranular and fractured porosity of the reservoirs of the Chayandinsky field (Eastern Siberia) on the electrical resistivity and the formation factor under conditions simulating reservoir conditions are presented. It is shown that with an increase in the intergranular and total porosity of rocks, the electrical resistivity also decreases. No reliable statistical dependence was found for fracture porosity. When the fracture porosity of the studied rock samples is 0.2 or more of the total porosity, their electrical conductivity is practically determined by the electrical conductivity of the fractures. It is revealed that the cementation index in the Archie–Dakhnov equation is related to the value of fracture porosity, and for the studied samples in the case of interconnected fractures it is 1.00, and in the presence of only intergranular porosity is equal to 2.36.

The difference in the influence of intergranular and fracture porosities on the electrical resistivity of rocks and the formation factor is shown. The effect of intergranular porosity is well described by the Archie–Dakhnov equation. The presence of an interconnected fracture porosity is approximated by a special case of the Aguilera equation. The obtained values of intergranular and fracture porosity indicate that the fracture porosity of the studied samples consists of cracks that are weakly interconnected. For the real values of intergranular and fracture porosity of the studied rock samples, the formation factors are calculated using the Archie–Dakhnov and Aguilera equations, which describe adequately the dependences of the formation factor on the porosity of rocks and can be used both for calculating hydrocarbon reserves and for designing the field development process.

Keywords: rock, porosity, fracture porosity, intergranular porosity, electrical resistivity, formation factor.

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 he has no conflict of interest.

References

- Aguilera R., Analysis of Naturally Fractured Reservoirs from Conventional Well Log, *Journal of Petroleum Technology*, 1976, vol. 28, no. 7, pp. 764-772.
- Amadu C.C., Gawu S.K.Y., Abanyie K.S., Experimental Study of Electrical Resistivity to Rock Fracture Intensity and Aperture Size, *International Journal of Physics*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 85-92.
- Archie G.E., The Electrical resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, *Transactions of the AIME*, 1942, vol. 146, pp. 54-62.
- Avaliani Z.S., Dependence of the electrical properties of rocks and minerals on fracturing and temperature, *Cand. Sci. (Phys.- Math.) Dissertation*, Tbilisi: Institute of Geophysics of the Academy of Sciences of the Georgian SSR, 1984, 167 p. [In Russian].
- Barsukov O.M., On the connection of electrical resistance of rocks with tectonic processes, *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (Izvestia of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth), 1970, no. 1, pp. 84-89. [In Russian].

- Dakhnov V.N., *Geofizicheskie metody opredeleniya kollektorskikh svoystv i neftegazonasyschleniya gornykh porod. 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe* (Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. 2-nd edition, revised and enlarged), Moscow: Nedra, 1985, 310 p. [In Russian].
- Dakhnov V.N., *Karotazh skvazhin: Interpretatsiya karotazhnykh diagramm* (Well logging: Interpretation of logging diagrams), Moscow, St. Petersburg: Gostoptekhizdat, 1941, 496 p. [In Russian].
- Jones G., Sentanac P., Zielinski M., Desiccation Cracking using 2-D and 3-D Electrical Resistivity Tomography: Validation on a Flood Embankment, *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 106, pp. 196-211. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.04.018>
- Kobranova V.N., *Petrofizika. Uchebnik dlya vuzov. Izdanie 2-e, dopolnennoe i pererabotannoe* (Petrophysics. Textbook for universities. 2-nd edition supplemented and revised), Moscow: Nedra, 1986, 392 p. [In Russian].
- Kuzmin Y.O., Induced Deformations of Fault Zones, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 753-765. DOI 10.1134/S1069351319050069
- Kuzmin Yu.O., Recent anomalous geodynamics of the subsurface 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. Vol. 2), Moscow: GEOS, 2002, pp. 418-427. [In Russian].
- Kuzmin Yu.O., Recent geodynamics of faults and ecological and industrial safety of oil and gas facilities, *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* (Geology, geophysics and development of oil and gas fields), 2007, no. 1, pp. 33-41. [In Russian].
- Nechay A.M., Questions of quantitative assessment of secondary porosity of fractured reservoirs of oil and gas, *Prikladnaya geofizika* (Applied Geophysics), 1964, vol. 38, pp. 201-212. [In Russian].
- Parkhomenko E.I., *Elektricheskie svoystva gornykh porod* (Electrical properties of rocks), Moscow: Nauka, 1965, 164 p. [In Russian].
- Parkhomenko E.I., Bondarenko A.T., The influence of uniaxial pressure on the electrical resistance of rocks, *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Geofizicheskaya* (Izvestia of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Geophysical), 1960, no. 2, pp. 326-332. [In Russian].
- Ryazantsev P.A., Assessment of fracturing of a rock massif based on electrotomography models, *Geofizika* (Geophysics), 2015, no. 1, pp. 41-50. [In Russian].
- Sizin P.E., Shkuratnik V.L., Theoretical assessment of the influence of micro-fracturing of rocks on their conductivity in the Maxwell approximation, *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* (Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)), 2015, no. 3, pp. 212-218. [In Russian].
- Sobolev G.A., Semerchan A.A., Salov B.G., Shpettsler Kh.A., Sondergel'd K.Kh., Badanov V.N., Kol'tsov A.V., Los' V.F., Nasimov R.M., Ponomarev A.V., Stakhovskii I.R., Terent'ev V.A., Turetskii I.M., Forerunners of the destruction of a large sample of rock, *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth), 1982, no. 8, pp. 29-43. [In Russian].
- Szalai S., Kovács A., Kuslits L., Facskó G., Gribovzski K., Kalmár J., Szarka L., Characterization of Fractures and Fracture Zones in a Carbonate Aquifer Using Electrical Resistivity Tomography and Pricking Probe Methods, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018, no. 6, pp. 1-21. doi: 10.4236/gep.2018.64001
- Tiab D., Donaldson E.C., *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties, 2nd ed.*, Oxford: Gulf, 2004, 866 p.
- Vendelstein B.Yu., Rezvanov R.A., *Geofizicheskie metody opredeleniya parametrov neftegazovykh kollektorov* (Geophysical methods for determining the parameters of oil and gas reservoirs), Moscow: Nedra, 1978, 318 p. [In Russian].
- Zhukov V.S., Assessment of fracturing of reservoirs by the velocity of propagation of elastic waves, *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., Kuzmin Y.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. DOI 10.1134/S1069351320040102
- Zhukov V.S., Lyugay D.V., *Opredelenie fil'tracionno-emkostnykh i uprugikh svoystv i elektricheskikh parametrov obraztsov 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., Motorygin V.V., Influence of various types of porosity on elastic wave velocities and electrical conductivity of collectors of the Chayandinsky deposit, *Vesti gazovoi nauki* (Lead Gas Science), 2017. no. 2(30), pp. 223-233. [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