

**К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ  
ГЛИНИСТЫХ ВОДОНОСНЫХ И НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПОРОД  
С МЕЖГРАНУЛЯРНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ**

**М.М.Элланский (РГУ нефти и газа им.И.М.Губкина)**

**Введение**

Проблема построения эффективной модели электропроводности горных пород весьма актуальна. Метод сопротивления – единственный из методов ГИС, позволяющий надежно оценивать водонасыщенность, а, значит, нефтегазонасыщенность продуктивных отложений.

Благодаря работам отечественных геофизиков и петрофизиков еще в 50-ые -60-ые годы было изучено влияние различных факторов на электропроводность продуктивных отложений и, в первую очередь, влияние глинистости, приводящее при одних условиях к повышению электропроводности, при других – к снижению электропроводности, при третьих – не изменяющее электропроводность породы. К сожалению, в руководствах по интерпретации данных ГИС, а также по использованию данных ГИС и керн при подсчете запасов эти разработки отечественных специалистов не нашли отражения. До настоящего времени эти руководства рекомендуют вводить поправки в сопротивление пород, учитывающие влияние «поверхностной проводимости». Ни о каком увеличении сопротивления пород за счет их глинизации не говорится ни слова. ТРФ<sup>1</sup>ФРТ

Между тем за рубежом в конце 70-ых годов была предложена так называемая модель «двойной воды»[10-15]. Авторы этой модели ни словом не обмолвились об отечественных разработках в этом направлении, выполненных, как мы уже отмечали, в конце 50-ых – начале 60-ых годов. И сегодня наши геологические, геофизические и др. нефтегазовые организации покупают дорогие зарубежные программные продукты с моделью «двойной воды», хотя наши собственные исследования этой проблемы (моделирования электропроводности нефтегазоносных отложений) ушли далеко вперед по сравнению с результатами, полученными за рубежом.

В настоящей статье подводятся итоги многолетнего изучения конструктивной модели электропроводности продуктивных и водоносных пород с межгранулярным типом пор. Эта

---

<sup>1</sup> Методические рекомендации по определению подсчетных параметров залежей нефти и газа по материалам геофизических исследований скважин с применением результатов анализов керн опробований и испытаний продуктивных пластов. Под редакцией Б.Ю.Вендельштейна, В.Ф.Козяра, Г.Г.Яценко. – Калинин: НПО «Союзпромгеофизика», 1990.

модель уже более 20-ти лет используется при комплексной интерпретации данных ГИС в различных районах бывшего СССР и России. Она применялась при подсчете запасов нефти и газа (с утверждением в ГКЗ СССР и России) залежей, представленных терригенными и карбонатными коллекторами в Средней Азии, на Украине, в Якутии, Западной Сибири, Волгоградской области, о-ва Сахалин и т.д. [6.7,9 ]

## 2.Краткий исторический обзор.

До конца 50-ых - начала 60-ых годов у советских и зарубежных специалистов, занимающихся изучением электропроводности продуктивных отложений и ее взаимосвязями с пористостью и водонасыщенностью, существовала одна - единственная точка зрения. Они считали, согласно теории поверхностной проводимости, что присутствие в породе глинистого материала при прочих равных условиях (постоянных объеме и структуре пустотного пространства) всегда приводит к увеличению электропроводности породы.

В конце 50-ых годов независимо друг от друга Б.Ю. Вендельштейн, И.Е.Эйдман и С.Д.Пирсон предложили модель электропроводности порового канала глинистой породы. В этой модели фигурировали два проводника электричества –пластовая вода и связанная вода (двойной ионный слой), занимающие различные части объема порового канала:

$$\frac{1}{\rho_{\text{кан}}} = \frac{Z_{\text{сл}}}{\rho_{\text{сл}}} + \frac{1 - Z_{\text{сл}}}{\rho_{\text{в}}} \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{канВ}}$ ,  $\rho_{\text{вВ}}$ ,  $\rho_{\text{слВ}}$  - соответственно удельные сопротивления канала, пластовой воды и двойного электрического слоя,  $Z_{\text{слВ}}$  - доля порового канала, занятая двойным слоем.

Б.Ю. Вендельштейн, задавая разные величины электропроводности пластовой воды и двойного слоя, впервые показал, что присутствие глинистого материала в породе может приводить как к увеличению, так и к уменьшению ее электропроводности. Если  $\rho_{\text{вВ}} > \rho_{\text{слВ}}$ , присутствие в породе глинистого материала приводит к снижению электрического сопротивления (увеличению электропроводности) порового канала и породы в целом. Если же  $\rho_{\text{слВ}} > \rho_{\text{вВ}}$ , заглинизированность способствует увеличению электрического сопротивления породы. При  $\rho_{\text{вВ}} = \rho_{\text{слВ}}$  наличие глинистого материала не влияет на сопротивление породы.

В 1963г. автор статьи эмпирически, а Б.Ю. Вендельштейн теоретически показали, что при высокой минерализации пластовой воды электропроводность породы с увеличением глинистости не увеличивается, а уменьшается. Этот результат был описан в диссертации ав-

тора в 1963 г. и в статье Б.Ю.Вендельштейна с автором в «Прикладной геофизике» в 1964г. [2].

Затем появился ряд работ (Д.А. Мельникова, Н.Н. Румянцевой и В.С.Неймана, О.Н.Кропотова, О.И.Ильсова и др.), в которых была подтверждена и уточнена выявленная закономерность [4,6]. Было показано, что не только для водонасыщенных, но и для продуктивных пород при высокой минерализации пластовой воды ( $\rho V_{\text{слВ}} > \rho V_{\text{вВ}}$ ) глинистость повышает сопротивление породы, а при низкой ( $\rho V_{\text{вВ}} > \rho V_{\text{слВ}}$ ) - понижает.

Автор статьи провел исследование многих коллекций водонасыщенных и нефтенасыщенных образцов терригенных пород с данными о сопротивлении породы, пористости и водонасыщенности, полученными при разных величинах минерализации пластовой воды [6].

Оказалось, что для всех коллекций образцов значение сопротивления воды, при котором глинистость не влияет на сопротивление породы, достаточно стабильно и изменяется в диапазоне 0.18 - 0,24 Ом·м, составляя в среднем 0.22 Ом·м. В работе (6) автором показано, что для терригенных пород с глинистым цементом при высокой минерализации воды ( $\rho V_{\text{вВ}} > 0,22$  Ом·м) удельное сопротивление двойного ионного слоя  $\rho V_{\text{слВ}}$  является постоянным, равным - 0,22 Ом·м. Оно не зависит ни от количества глинистого цемента, ни от минералогического состава глин (каолинит, иллит, бентонит, монтморрилонит). Для чистых рыхлых (насыпных) глин (экспериментальные данные И.Атлана и С.Бардона) величина  $\rho V_{\text{слВ}}$  также является константой, не зависящий от минерального состава глин и ее пористости. Но эта константа равна 0,80 Ом·м. На основе экспериментального изучения естественных уплотненных глин разного минералогического состава автором совместно с Г.О.Рынской установлено, что  $\rho V_{\text{слВ}}=0,60$  Ом·м.[6,8]

Таким образом, мы видим, что величина удельного сопротивления двойного ионного слоя, не завися от минералогического состава и количества глинистого материала, зависит от его структуры. Максимальное значение сопротивления слоя, соответствующее «рыхлой» глине, равно 0,8 Ом·м. Среднее – 0,60 Ом·м - соответствует «реальной», уплотненной глине. Минимальное - 0,22 Ом·м – соответствует глинистому цементу, имеющему наиболее упорядоченную структуру (чешуйки располагаются параллельно поверхности зерен скелета).

При построении модели электрического сопротивления горных пород с межгранулярной пористостью было сделано допущение о том, что двойной ионный слой и адсорбированная на глинистой поверхности пор вода занимают один и тот же объем:

$$Z_{\text{сл}} = \beta_{\text{гл}} = \frac{K_{\text{гл}} \omega_{\text{адс}}}{K_{\text{п}}} \quad (2)$$

где  $\beta V_{\text{гл.В}}$  – доля объема открытых пор, занятая адсорбированной водой,  $\omega_{\text{адс.В}}$  – содержание адсорбированной воды в долях объема глинистого материала.

Такое допущение практически всегда делается в электрохимии. Оно означает, что двойной слой, находясь в том же объеме, что и адсорбированная дистиллированная вода, обеспечивает ее электропроводность.

С учетом допущения (2) нами была предложена следующая модель электрического сопротивления продуктивных глинистых пород с межгранулярной пористостью:

$$\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{1}{(K_{\text{п}} K_{\text{в}})^m} \frac{1}{1 - \frac{K_{\text{гл}} \omega_{\text{адс.В}}}{K_{\text{п}} K_{\text{в}}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{сл}}}{\rho_{\text{в}}}\right)} \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  – соответственно удельные сопротивления породы и пластовой воды,  $K_{\text{пв}}$ ,  $K_{\text{вв}}$  и  $K_{\text{глв}}$  – открытая пористость, водонасыщенность и объемная глинистость породы.

В модели (3) использовано соотношение (1), то есть, сделано допущение о параллельном соединении пластовой воды и двойного ионного слоя в электрической цепи.

Модель (3) хорошо описывает влияние глинистости на электрическое сопротивление горных пород при относительно высокой минерализации пластовой воды, то есть при  $\rho_{\text{вв}} < 0.22$  Ом·м ( что соответствует минерализации раствора хлористого натрия  $С_{\text{вв}} > 30$  г/л.). В этих условиях хорошо “работает” допущение о том, что сопротивление двойного слоя - константа, не зависящая от глинистости породы и минерализации пластовой воды.

В области низких значений минерализации воды ( $\rho_{\text{вв}} > 0.22$  Ом·м,  $С_{\text{вв}} < 30$  г/л) картина усложняется: и количество адсорбированной воды, и величина удельного сопротивления двойного слоя становятся функциями минерализации поровой воды. В нашей работе [6] были предложены формулы, выражающие эти зависимости. Эти формулы были «подобраны» по материалам коллекции образцов глинистых песчаников Ваксмана-Смита таким образом, чтобы расхождение между фактическими и расчетными значениями удельных сопротивлений образцов были минимальны. Получая формулы, мы не анализировали физическую основу процессов изменения характеристик адсорбированной воды и двойного слоя в зависимости от минерализации поровой воды.

При практическом использовании модели (3) в автоматизированных методиках интерпретации данных ГИС «Талалаевка», «Хапчагай», «Карбонаты - Универсал» и др. эти формулы не использовались. Предполагалось, что доля открытых пор, заполненных адсорбированной водой и двойным ионным слоем, а также удельное сопротивление двойного слоя не зависят от минерализации поровой воды [7,9]. Это предположение обусловлено тем, что для большинства нефтегазоносных районов России и СНГ минерализация пластовой воды в

терригенных и карбонатных коллекторах чаще всего или более 30 г/л, или ненамного ниже. Несомненно, что даже в этих условиях обе названные характеристики пород не остаются постоянными, а возрастают с уменьшением минерализации пластовой воды. Однако, как показало опробование модели (3), допущение о а) постоянстве доли пор, заполненных адсорбированной водой и двойным слоем и б) неизменности удельного сопротивления двойного ионного слоя при изменении минерализации поровой воды от 300 до 30 г/л приводит к погрешности в оценке водонасыщенной пористости по данным метода сопротивлений не более 10 относительных процентов [6,7,9]. Поэтому при использовании модели (3) для комплексной интерпретации данных ГИС и подсчета запасов нефти и газа месторождений разных нефтегазоносных территорий России и СНГ (Западной Сибири и Якутии, Украины, Волгоградской и Оренбургской областей, о-ва Сахалина и др.) были получены хорошие результаты, а подсчитанные запасы нефти и газа утверждены ГКЗ России (ранее – ГКЗ СССР) [7.9].

В последние годы за рубежом и в нашей стране появился ряд работ, посвященных попыткам усовершенствовать модель электропроводности глинистых пород [1,3,5, 10-15]. Сначала остановимся на отечественных публикациях. Не анализируя их подробно, отметим, что среди них мы не видим ни одного удачного варианта.

Наиболее известны в настоящее время модели В.С.Афанасьева, С.В.Афанасьева и В.Н.Орлова. Эти модели построены на основе неверных физико-химических и геологических представлений об изучаемой закономерности. Авторы первой модели, допуская, что емкость катионного обмена может достигать бесконечно большого значения (что абсолютно неправильно), в то же время используют для описания процесса ионного обмена между поверхностью глин и пластовой водой изотерму адсорбции Лангмюра. Вводя некий коэффициент активности  $\alpha$ , отражающий связь между емкостью катионного обмена и проводимостью двойного ионного слоя, изменяющийся от 0 до 1, они в своих расчетах используют значение этого коэффициента, большее 1. Мало того, этот же коэффициент они рассматривают как долю слоя в объеме порового пространства.

В.Н.Орлов, используя принципы смешения и вложения (без всяких ссылок на работы Б.Н.Еникеева с автором статьи, обосновавших применимость этих принципов для описания пористых гетерогенных сред), предлагает совершенно нелепую, противоречащую имеющимся геологическим представлениям модель двухкомпонентной смеси пористой среды. В этой модели сначала первая компонента «вкладывается» во вторую, а потом вторая в первую. Любому здравомыслящему геологу известно, что подавляющее большинство представителей глинистых терригенных макрооднородных пород – коллекторов имеют жесткий скелет, состоящий из песчано-алевролитовых зерен. В поровом пространстве скелета находится це-

мент, чаще всего глинисто-карбонатный. Взаимодействие скелета и цемента можно описать с помощью принципа вложения, но не смешения. Правда, встречаются представители терригенных пород, имеющие глинистость и карбонатность так называемого структурного типа. В этом случае образования глинистого и карбонатного материала находятся между зерен скелета породы и имеют примерно такие же, как и зерна, размер и форму. Такую терригенную породу можно описать с помощью обоих принципов, применяя их последовательно: сначала принцип смешения, а потом – принцип вложения. Схема моделирования, предложенная В.Н.Орловым, абсолютно непригодна для описания глинистых терригенных пород.

Результаты опробования моделей В.С. и С.В. Афанасьевых и В.Н.Орлова, демонстрируемые в работах [1,5], представлены в виде, не позволяющем их проверить читателю. Вместо того, чтобы показать сходимость фактических и модельных значений электропроводности образцов пород, описываются некие интегральные эффекты или рассматривается сходимость коэффициентов модели, установленных разными методами.

И, наконец, последнее замечание, которое мы считаем необходимым сделать. Авторы обеих моделей [1,5] обладают непомерными амбициями. Опубликовав первые свои работы по проблеме моделирования электропроводности, они тут же дали моделям свои имена. Это, кстати, первые два случая в большом коллективе специалистов, занимающихся многие годы решением названной проблемы и имеющих гораздо больше оснований для подобной акции. Единственный пример «модели с именем» – формула Дахнова – Арчи. Но имя этой формуле дал не В.Н.Дахнов, а его ученики.

Перейдем к рассмотрению зарубежных публикаций. С конца 70-ых годов в этих публикациях впервые была сформулирована концепция «двойной воды» [10,11,12,13,14,15]. Хочу еще раз подчеркнуть, что эта концепция ничего нового не содержит. Она повторяет уже рассмотренные результаты, полученные Б.Ю.Вендельштейном, автором статьи и другими отечественными исследователями.

К модели «двойной воды» [10 - 15] имеются следующие замечания. Первое и главное - эффект влияния снижения минерализации пластовой воды на увеличение доли порового канала, занятого двойным слоем, описывается на основе результатов, полученных в теории двойного слоя для бесконечной полуплоскости. Как будет показано далее, для реальных горных пород, имеющих поровые каналы конечных размеров, этот эффект существенно слабее.

Второе – в модель «двойной воды» входят характеристики (подвижность, коэффициент активности и др.), которые на практике чаще всего невозможно оценить.

### **3.Усовершенствованная модель электропроводности**

При усовершенствовании модели электропроводности глинистых терригенных пород мы исходили из следующих постулатов, сформулированных на основании предшествующих исследований:

1. два проводника электричества в поровом канале -пластовая вода и двойной слой - соединены как последовательно, так и параллельно,
2. доля сечения порового канала, занятая двойным слоем -  $ZB_{\text{слВ}}$  или, что то же самое, доля открытых пор, заполненных адсорбированной водой  $\beta V_{\text{глВ}}$ , возрастает с уменьшением минерализации пластовой воды,
3. удельное сопротивление двойного ионного слоя  $\rho V_{\text{слВ}}$  при высокой минерализации поровой воды ( $\rho V_{\text{вВ}} < 0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) является константой, зависящей только от структуры глинистого материала, а при снижении минерализации воды начинает возрастать вплоть до того момента, пока глинистый песчаник не превратится в идеальную мембрану, то есть когда  $ZB_{\text{слВ}} = \beta V_{\text{глВ}} = 1$ .

Сразу оговоримся, что при усовершенствовании модели электрического сопротивления мы не ставили целью в очередной раз доказать, что а) *эта модель должна единообразно описывать как водоносные, так и продуктивные породы* и б) *известные модели зависимости параметра пористости от открытой пористости и параметра увеличения сопротивления от водонасыщенности являются частными случаями единой модели, отражающей взаимосвязь относительного сопротивления породы с объемом ее водонасыщенных пор.*

Впервые единый характер взаимосвязи относительного сопротивления с водонасыщенной пористостью терригенных водоносных и продуктивных пород был показан еще в 1956 г Ф.Ф. Котяховым. В 1976г автор статьи подтвердил этот вывод эмпирически и теоретически[6]. Наконец, геофизики уже более 20-ти лет при интерпретации данных метода сопротивления используют эмпирически установленные взаимосвязи параметра  $PV_{0В} = \rho V_{\text{п/в}} \rho V_{\text{вВ}}$  с водонасыщенной пористостью  $KV_{\text{пВ}} KV_{\text{вВ}}$ . И, наконец, с чисто физических позиций, непонятно, как можно разделять две компоненты объема водонасыщенных пор, определяющих сопротивление породы?

Кстати, если бы специалисты в области скважинной геофизики и петрофизики согласились с приведенными доводами о необходимости строить и использовать единую модель сопротивления водонасыщенных и продуктивных пород, они бы наверняка отказались от покупки дорогих зарубежных установок для измерения сопротивления частично водонасыщенных пород. В таких установках никогда нельзя воссоздать реальную нефтегазонасыщенность и реальную степень гидрофобизации частично водонасыщенных пород. Вместо этого можно было бы изучать модель взаимосвязи сопротивления водонасыщенных пород с от-

крытой пористостью, а затем распространять полученные результаты на модель сопротивления продуктивных пород. Не исключено, что при таком подходе пришлось бы использовать разные значения структурного коэффициента  $m$  для водоносных и продуктивных пород, если степень их гидрофобизации разная.

### УЗ.1. Замена параллельного соединения поровой воды и двойного слоя в электрической цепи смешанным соединением.

В модели (3) использовано параллельное соединение двух проводников электричества: поровой воды и двойного ионного слоя. В реальных условиях, без всяких сомнений, эти проводники должны быть включены как параллельно, так и последовательно. Поэтому при усовершенствовании модели электропроводности глинистых песчаников мы попытались учесть это обстоятельство.

В ряде наших работ подробно рассматривалась модель пористой среды, состоящая из трех групп поровых каналов: «свободных» макрокапилляров, микрокапилляров и макрокапилляров, заблокированных микрокапиллярами [9]. В рамках этой модели заблокированные макрокапилляры и блокирующие их микрокапилляры соединены последовательно в электрической цепи. Эта система каналов включена параллельно с двумя другими системами: свободными макрокапиллярами и микрокапиллярами. Таким образом, в отличие от ранее предложенной нами модели электропроводности с параллельно включенными проводимостями пластовой воды и двойного ионного слоя, предлагаемая модель характеризуется смешанным соединением этих двух проводников электричества.

Точное выражение сопротивления порового канала в нашей модели довольно громоздкое. Нам удалось его заменить хорошей аппроксимацией, имеющей следующий вид:

$$\frac{\rho_{\text{кан}}}{\rho_{\text{в}}} = \left( \frac{\rho_{\text{сл}}}{\rho_{\text{в}}} \right)^{\beta} \quad (4)$$

Подставив (4) в модель электропроводности и учтя, что в случае продуктивной породы нужно относительную глинистость  $\beta V_{\text{гЛВ}} = \frac{K_{\text{гЛ}} \omega_{\text{адс.}}}{K_{\text{П}}}$  разделить на водонасыщенность

$K_{\text{ВВ}}$ , получим модель удельного электрического сопротивления породы в следующем виде:

$$\frac{\rho_{\text{П}}}{\rho_{\text{В}}} = \frac{1}{(K_{\text{П}} K_{\text{В}})^m} \left[ \frac{\rho_{\text{сл}}}{\rho_{\text{В}}} \right] \frac{K_{\text{гЛ}} \omega_{\text{адс.}}}{K_{\text{П}} K_{\text{В}}} \quad (5)$$



Модель (5) имеет более простой вид, чем ранее предложенная нами модель (3). Она отражает все возможные варианты влияния глинистости на удельное электрическое сопротивление породы. В зависимости от соотношения удельных сопротивлений пластовой воды и двойного ионного слоя сопротивление породы может возрастать при увеличении ее глинистости, убывать и оставаться неизменным.

Для практического использования модели (5) необходимо знать, как изменяются в зависимости от минерализации воды, насыщающей поры породы а) доля пор, заполненных адсорбированной водой и двойным ионным слоем  $\beta_{\text{глВ}}$  и б) удельное сопротивление двойного ионного слоя.

### У3.2. Изменение количества адсорбированной воды в порах породы и удельного сопротивления двойного ионного слоя в зависимости от минерализации поровой воды.

Допущение о зависимости доли порового канала, занятой адсорбированной водой или находящимся с этой водой в одном и том же объеме двойным ионным слоем, от минерализации поровой воды основывается, во-первых, на теории двойного слоя, согласно которой толщина слоя  $Z_{\text{слВ}}$  на бесконечной полуплоскости возрастает при уменьшении минерализации воды следующим образом:

$$Z_{\text{сл}} \approx \frac{1}{\sqrt{C_{\text{В}}}}, \quad (6)$$

где  $C_{\text{ВВ}}$  - минерализация воды.

Во-вторых, это допущение отражает результаты анализа экспериментальных исследований остаточной водонасыщенности образцов терригенных пород, согласно которым количество остаточной воды возрастает при снижении минерализации поровой воды [8,9]. Было установлено, что доля открытых пор глинистого песчаника, заполненных адсорбированной водой  $\beta_{\text{глВ}}$  следующим образом зависит от минерализации поровой воды:

$$\beta_{\text{глВ}}(C_{\text{В}}) = \beta_{\text{глВ}}(C_{\text{В.о}}) \left\{ \frac{C_{\text{В.о}}}{C_{\text{В}}} \right\}^{0,235},$$

(7) где  $C_{\text{В.о}}$  и  $C_{\text{ВВ}}$  - высокая и «текущая» минерализация пластовой воды.

Так, если фильтрат бурового раствора имеет более низкую минерализацию, чем пластовая вода, соотношение (7) примет вид:

$$\beta V_{\text{гл.}(C_{\Phi})B} = \beta_{\text{гл.}(C_B)} \left\{ \frac{C_B}{C_{\Phi}} \right\}^{0,235}, \quad (7a)$$

где  $C_{B_{\Phi}}$  и  $C_{B_{\text{ВВ}}}$  – минерализация фильтрата бурового раствора и пластовой воды.

Как видно из сравнения соотношений (6) и (7) эффект возрастания доли пор, заполненных адсорбированной водой и двойным ионным слоем, более слабый, чем это следует из теории двойного слоя. Разница легко объяснима: теоретические результаты получены для бесконечной плоскости, экспериментальные результаты – для порового канала, имеющего конечный размер.

Априори, можно было предположить, что и в модели остаточной водонасыщенности, и в модели электрического сопротивления породы должна быть отражена одна и та же закономерность изменения относительной глинистости как функции минерализации воды, описываемая выражением (7).

Для выяснения этого вопроса мы обратились к классической коллекции водонасыщенных образцов глинистых песчаников Ваксмана-Смита. У каждого из 27 образцов этой коллекции были измерены удельные электрические сопротивления при различных величинах минерализации пластовой воды. Удельное электрическое сопротивление воды варьировало в диапазоне 0,0428 – 4,796 Ом·м.

Были рассчитаны значения так называемого истинного параметра пористости  $P_{\text{п.ист}B}$  для образцов рассматриваемой коллекции, равные относительно сопротивлению водоносной породы при  $\rho_{\text{ВВ}} = \rho_{\text{сл}B} = 0,22$  Ом·м. [6 ]:

$$P_{\text{п.ист.}} = \frac{1}{K_{\text{п}}^m} \quad (8)$$

После этого для каждого образца были рассчитаны значения доля открытых пор, заполненных адсорбированной водой при самой высокой минерализации пластовой воды-  $\beta V_{\text{гл.об}}$  и эта же характеристика при других значениях минерализации воды-  $\beta V_{\text{гл.В}}$ . Исследование взаимосвязи между ними при удельных сопротивлениях воды  $\leq 0,22$  Ом·м показало, что эта взаимосвязь описывается соотношением (7).

При увеличении сопротивления пластовой воды ( $\rho_{\text{ВВ}} > 0,22$  Ом·м) показатель степени в соотношении (7) снижается. Снижение этого показателя можно объяснить увеличением сопротивления двойного слоя при уменьшении минерализации воды.

Полагая, что показатель степени в соотношении (7) должен оставаться постоянным при всех значениях минерализации воды, мы рассчитали сопротивление двойного слоя для каждой минерализации воды в зависимости от величины  $\beta_0$ . Полученные результаты хорошо ап-

$$\rho_{\text{сл}} = (0,22)10^{0,2\beta_0\rho_{\text{В}}}$$

проксимируются следующим выражением, применимым для удельных сопротивлений воды, превышающих 0,22 Ом·м :

(9)

Формула (9) может рассматриваться лишь как аппроксимация, позволяющая оценивать сопротивление двойного ионного слоя в поровом пространстве глинистых терригенных пород.

Попытаемся на ее основе получить более «физичную» модель для расчета удельного сопротивления двойного слоя. Для этого, прежде всего, оценим границы применимости модели сопротивления двойного слоя.

«Левая» граница модели характеризуется постоянством удельного сопротивления двойного ионного слоя, равного 0,22 Ом·м при наивысшей минерализации поровой воды, то есть когда слой предельно сжат. Почему величина  $\rho_{\text{слВ}}$  в этих условиях не зависит от доли пор, заполненных двойным слоем и адсорбированной водой?

Удельную электропроводность двойного слоя  $\sigma_{\text{слВ}}$  можно выразить через емкость катионного обмена породы  $q_{\text{пВ}}$  и подвижность катионов двойного слоя  $u'$ :

$$\sigma_{\text{слВ}} = (u' q_{\text{пВ}}) / Z_{\text{слВ}} \quad (10)$$

Подставим в соотношение (10) долю сечения канала, занятую двойным слоем при самой высокой минерализации воды  $Z_{\text{сл.оВ}} = \beta V_{\text{оВ}}$ . Выразим эту характеристику через емкость катионного обмена. Как видно из рис.1, между обеими характеристиками имеется тесная корреляционная связь, описываемая выражением:

$$Z_{\text{сл.оВ}} = 0.3326 q_{\text{пВ}} \quad (11)$$

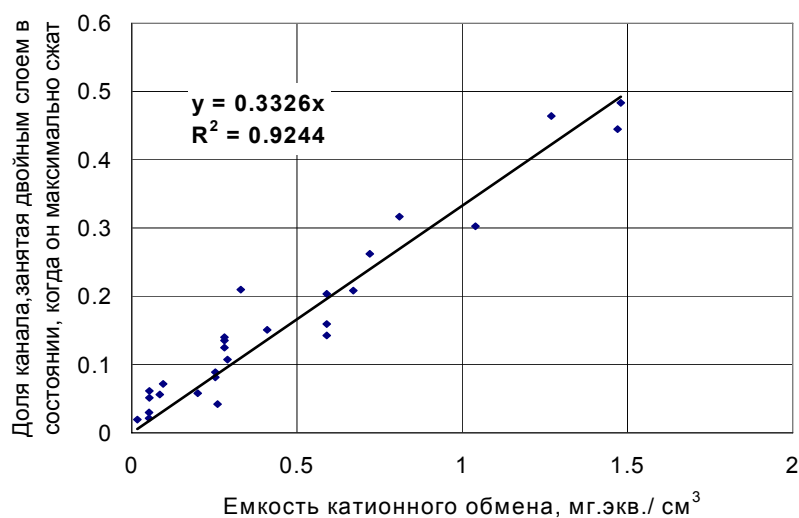
Максимальная емкость катионного обмена, соответствующая полному заполнению порового канала двойным слоем, равна 3 мг·экв. /смР<sup>3Р</sup>.

Выразив из (11) величину  $q_{\text{пВ}}$  и подставив в  $Z_{\text{слВ}}$  в (10), получим очень интересный результат:

$$\sigma_{\text{слВ}} = 3u' \quad (12)$$

Этот результат означает, что при  $Z_{\text{слВ}} = Z_{\text{сл.оВ}}$ , то есть когда двойной слой предельно сжат (а, значит, и количество адсорбированной воды минимально), *удельная электропроводность породы, независимо от ее глинистости, равна произведению максимальной емкости катионного обмена на подвижность катионов двойного слоя.* Если подвижность катионов также сохраняется постоянной, что должно иметь место при высокой минерализации пластовой воды, то *электропроводность двойного слоя будет постоянной вели-*

чиной независимо от доли открытых пор, им заполненных. Этот результат был ранее установлен эмпирически как автором настоящей статьи, так и авторами модели «двойной воды» [9,10, 12 ]

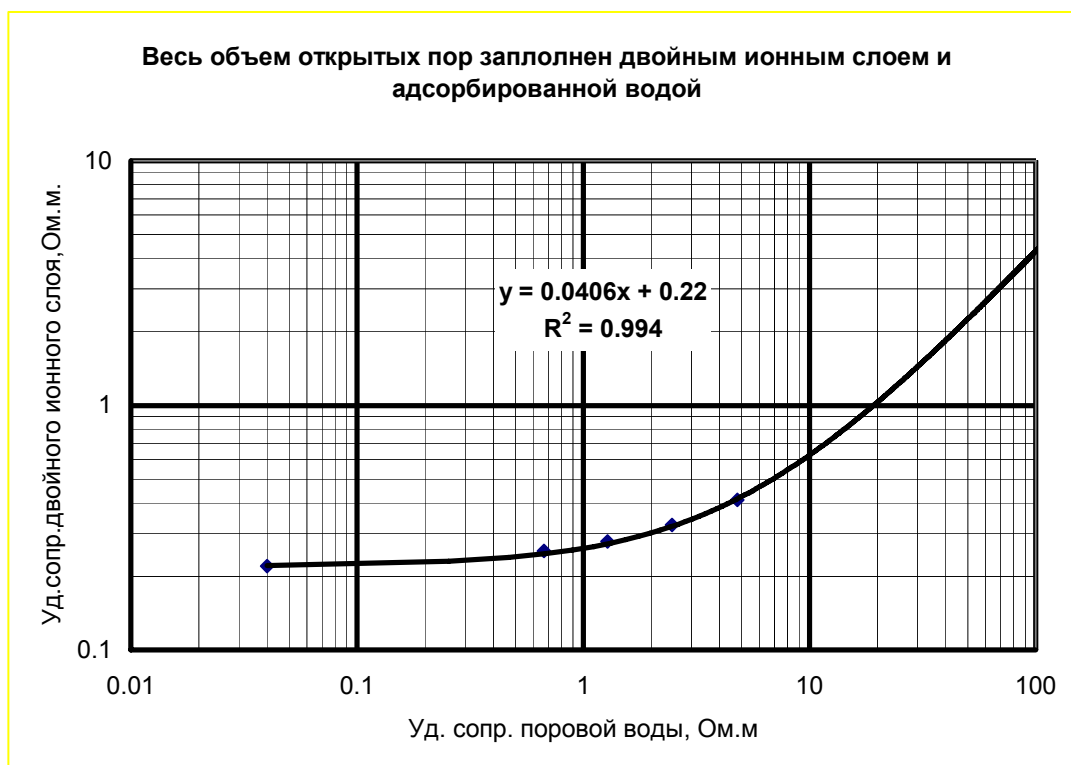


**Рис.1.Взаимосвязь между долей порового канала, занятого двойным ионным слоем при высокоминерализованной поровой воде, и емкостью катионного обмена образцов песчаных пород коллекции Ваксмана-Смита.**

Таким образом, мы объяснили постоянство удельного сопротивления двойного ионного слоя в условиях, когда он предельно сжат.

«Правая» граница применимости рассматриваемой модели должна характеризоваться значениями  $\rho_{\text{сл. в}} \text{ при } Z_{\text{сл. в}} = 1$ , то есть когда порода превращается в идеальную мембрану.

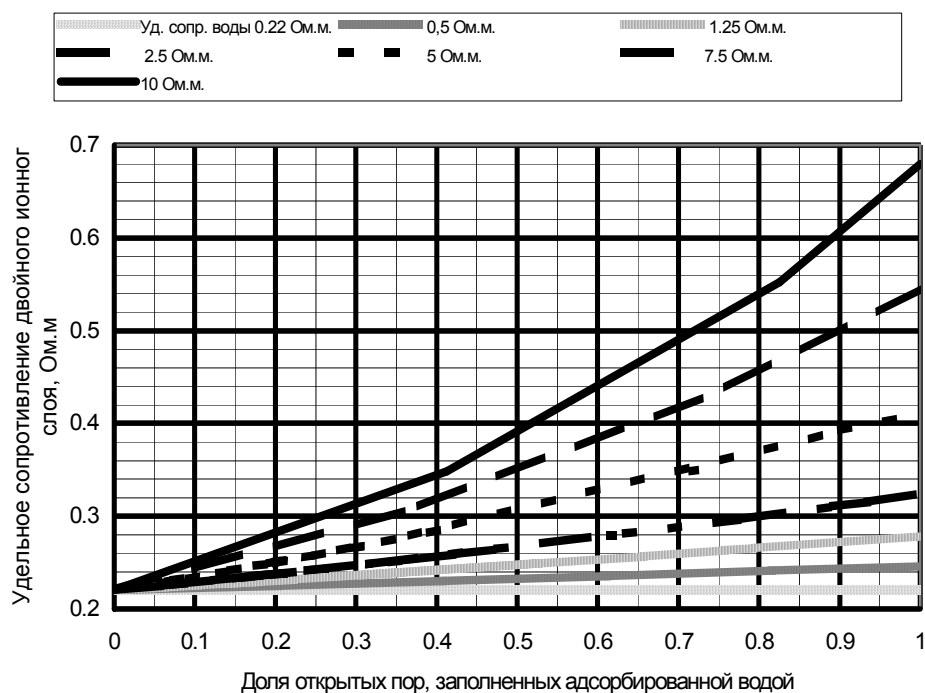
У образцов коллекции Ваксмана-Смита такая картина начинает наблюдаться уже при  $\rho_{\text{в. в}} = 0,67 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . На рис. 2 показано изменение величины  $\rho_{\text{сл. в}} \text{ при } Z_{\text{сл. в}} = 1$  в зависимости от удельного сопротивления поровой воды. При этом принято во внимание, что удельное сопротивление двойного ионного слоя идеальной мембраны, имеющей  $Z_{\text{сл. о. в}} = 1$  при наиболее высокой минерализации поровой воды (удельное сопротивление такой воды, представляющей раствор хлористого натрия равно  $0,04 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . при  $18^\circ \text{ Цельсия}$ ), равно  $0,22 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .



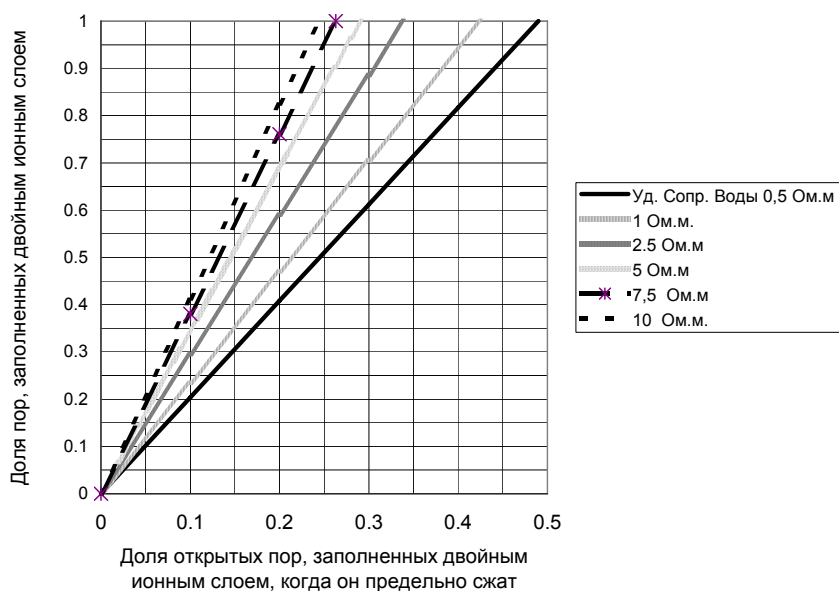
**Рис.2. Удельное сопротивление двойного ионного слоя при превращении породы в идеальную мембрану.**

С учетом найденных границ применимости соотношения (9) мы построили палетку для определения удельного сопротивления двойного ионного слоя в зависимости от доли пор, заполненных слоем и адсорбированной водой, и удельного сопротивления поровой воды (рис. 3).

Таким образом, построенная нами палетка представляет собой физически обоснованную модель удельного сопротивления двойного ионного слоя терригенных пород с глинистым цементом. Чтобы ей воспользоваться, нужно предварительно оценить долю открытых пор, заполненных двойным ионным слоем и адсорбированной водой при интересующем пользователя удельном сопротивлении поровой воды. Это можно сделать либо с помощью формулы (7), либо, используя палетку на рисунке 4.



**Рис. 3.** Палетка для оценки удельного сопротивления двойного слоя в зависимости от удельного сопротивления пластовой воды и доли открытых пор, заполненных двойным ионным слоем и адсорбированной водой.



**Рис.4.** Палетка для оценки доли открытых пор, заполненных двойным ионным слоем и адсорбированной водой в зависимости от этой же доли состоянии, когда слой предельно сжат и удельного –сопротивления поровой воды.

#### 4. Опробование модели электрического сопротивления глинистых терригенных пород

Рассмотрим результаты опробования построенной модели на материалах а) коллекции 27 образцов глинистых песчаников и алевролитов Ваксмана-Смита и б) выборки 8 образцов глинистых песчаников.

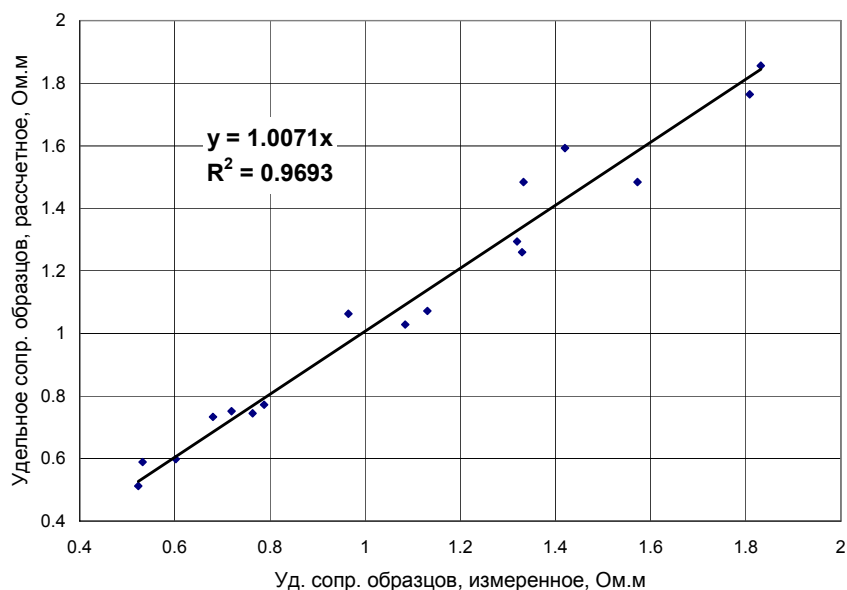
Для первой из этих коллекций сопоставим расчетные и измеренные значения сопротивлений образцов для самой высокой и самой низкой минерализации поровой воды.

**Таблица 1. Измеренные и расчетные значения удельного электрического сопротивления образцов глинистых песчаников  $\rho_{п.в}$  коллекции Ваксмана-Смита при удельном сопротивлении поровой воды  $\rho_{в.в} = 0.043 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .**

№ обр.	Рп.ист	Емкость катионного обмена, мг.экв./см $P^{ЗРРР}$	Доля открытых пор, заполненных двойным ионным слоем	Уд.сопр. образцов	
				измеренное, Ом·м	расчетное, Ом·м
1	11.80	0.017	0.006	0.52	0.51
2	13.50	0.052	0.017	0.60	0.60
6	17.00	0.095	0.032	0.79	0.77
7	24.20	0.053	0.018	1.13	1.07
8	23.20	0.053	0.018	1.08	1.03
9	16.50	0.085	0.028	0.76	0.74
12	35.00	0.280	0.093	1.81	1.76
14	25.00	0.280	0.093	1.33	1.26
18	12.50	0.59	0.196	0.72	0.75
19	12.20	0.59	0.196	0.68	0.73
20	9.80	0.59	0.196	0.53	0.59
22	20.00	0.72	0.239	1.32	1.29
23	13.70	1.04	0.346	0.97	1.06
24	21.80	0.81	0.269	1.57	1.48
25	21.00	1.27	0.422	1.83	1.86
26	15.00	1.47	0.489	1.33	1.48
27	16.00	1.48	0.492	1.42	1.59

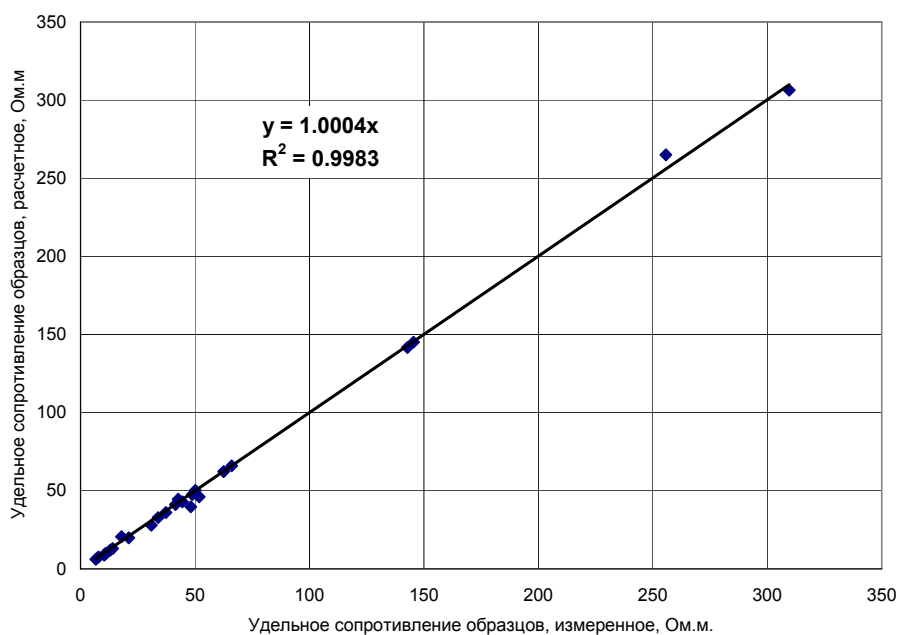
В таблице 1 и на рис. 5 сопоставлены расчетные и измеренные значения удельных сопротивлений образцов при высокой минерализации поровой воды (удельное сопротивление воды равно  $0.043 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Доля пор, заполненных двойным ионным слоем, оценивалась по величине емкости катионного обмена с помощью графика рис.1. Истинный параметр пористо-

сти находился как относительное сопротивление образца при удельном сопротивлении воды, равном 0,22 Ом·м. Как видно из таблицы и рисунка, сходимость фактических и расчетных данных хорошая.



**Рис.5. Сопоставление расчетных и измеренных удельных значений удельного электрического сопротивления образцов коллекции Ваксмана-Смита при  $\rho_{ВВ} = 0,043$  Ом·м.**

И при самой низкой минерализации поровой воды (удельное сопротивление ее равно 4,8 Ом·м), как это видно из таблицы 2 и рис.6, предложенная нами модель (5) позволяет рассчитывать удельные сопротивления образцов с высокой точностью.





**Рис.6. Сопоставление расчетных и измеренных удельных значений удельного электрического сопротивления образцов коллекции Ваксмана-Смита при  $\rho_{ВВ} = 4.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .**

В коллекции образцов Ваксмана – Смита не очень широк диапазон изменения минерализации пластовой воды. Поэтому предложенную модель электропроводности мы опро-

**Таблица 2. Измеренные и расчетные значения удельного электрического сопротивления образцов глинистых песчаников  $\rho_{ВВ}$  коллекции Ваксмана-Смита при удельном сопротивлении поровой воды  $\rho_{ВВ} = 4.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .**

№ обр.	Рп.ис т	Доля пор, заполненных двойным слоем при его	Уд. сопр. двойного слоя, Ом·м.	Доля пор, заполненных двойным	Исправленная доля пор, заполненных двойным слоем	Исправленное удельное сопротивление двойного слоя, Ом·м.	Уд.сопр. образцов	
							измеренное, Ом·м	расчетное, Ом·м
1	11.80	0.019	0.230	0.067	0.067	0.230	51.84	46.16
2	13.50	0.023	0.231	0.078	0.102	0.235	48.80	47.65
3	10.70	0.021	0.231	0.073	0.073	0.231	41.53	41.06
4	45.50	0.042	0.241	0.144	0.144	0.241	142.86	141.75
5	13.60	0.039	0.240	0.136	0.200	0.250	37.36	36.13
6	17.00	0.046	0.243	0.157	0.246	0.258	48.24	39.68
7	24.20	0.051	0.246	0.176	0.211	0.252	62.54	62.30
8	23.20	0.051	0.246	0.176	0.176	0.246	66.01	65.93
9	16.50	0.045	0.243	0.154	0.193	0.249	42.70	44.72
10	127.00	0.103	0.276	0.355	0.306	0.268	255.75	251.96
11	144.00	0.081	0.263	0.280	0.280	0.263	309.60	306.34
12	35.00	0.112	0.282	0.387	0.430	0.290	50.18	50.27
13	34.00	0.136	0.297	0.470	0.482	0.300	44.52	42.84
14	25.00	0.130	0.293	0.448	0.465	0.297	34.01	32.84
15	105.00	0.162	0.315	0.558	0.519	0.307	145.56	121.06
16	38.30	0.208	0.349	0.717	0.717	0.349	31.01	28.02
17	27.50	0.210	0.350	0.722	0.722	0.350	21.14	19.92
18	12.50	0.179	0.326	0.615	0.701	0.345	10.63	9.48
19	12.20	0.159	0.313	0.548	0.548	0.313	14.01	13.11
20	9.80	0.143	0.301	0.491	0.491	0.301	13.09	12.08
21	12.20	0.097	0.273	0.334	0.369	0.279	17.91	20.48
22	20.00	0.262	0.393	0.902	0.902	0.393	11.17	10.03
23	13.70	0.302	0.429	1.041	1.000	0.410	7.86	5.62
24	21.80	0.317	0.443	1.090	1.000	0.410	10.30	8.94
26	15.00	0.445	0.588	1.531	1.000	0.410	6.65	6.15

бовали еще на одной, очень «старой» коллекции образцов терригенных пород, данные о которых приведены в сборнике статей, переведенных с английского языка «Вопросы промышленной геофизики» (Гостоптехиздат, 1957 г.).

Диапазон изменения величин минерализации воды, при которых измерялось электрическое сопротивление образцов пород, составляет 5,00 – 0,005 нормалей хлористого натрия. Иными словами, минерализация воды изменялась в 1000 раз. Минимальная величина удельного электрического сопротивления используемой воды равна 16 Ом·м при комнатной температуре.

Из таблицы 3 видно, что и в рассмотренных условиях предложенная модель электрического сопротивления дает хорошие результаты.

**Таблица 3. Результаты опробования модели электропроводности на образцах коллекции Ф. М. Перкинса, Х. Р. Бреннона и В. О. Винзауэра.**

Концентрация раствора хлористого натрия, $U$ в нормальных уд. сопр. воды, Ом·м	Значения параметра пористости							
	УР <sub>п.изм.</sub> Рп.рассч.							
	№1 $K_{пв}=0,23$ , $P_{п.ив}=12,3, \beta_{ов}=0,096$	№2 $K_{пв}=0,268$ , $P_{п.ив}=8,3, \beta_{ов}=0,0675$	№3 $K_{пв}=0,183$ , $P_{п.ив}=14,9, \beta_{ов}=0,127$	№4 $K_{пв}=0,182$ , $P_{п.ив}=18,8, \beta_{ов}=0,05$	№5 $K_{пв}=0,155$ , $P_{п.ив}=23,2, \beta_{ов}=0,118$	№6 $K_{пв}=0,20$ , $P_{п.ив}=16,54, \beta_{ов}=0,12$	№7 $K_{пв}=0,13,6$ , $P_{п.ив}=42,2, \beta_{ов}=0,025$	№8 $K_{пв}=0,126$ , $P_{п.ив}=20,65, \beta_{ов}=0,10$
$U_{5,00}$ 0,04	$U_{15,3}$ 15,3	$U_{9,7}$ 9,7	$U_{20,0U}$ 20,0	$U_{21,1}$ 21,1	$U_{30,4}$ 30,4	$U_{21,8}$ 21,8	$U_{44,7}$ 44,7	$U_{26,0}$ U 26,0
$U_{1,00}$ 0,12						$U_{15,7}$ 18,3	$U_{40,7}$ 43,2	$U_{19,7}$ 22,8
$U_{0,970}$ 0,128	$U_{13,5}$ 13,55	$U_{8,7}$ 8,81	$U_{16,1}$ 16,7	$U_{20,0}$ 19,8	$U_{26,0}$ 25,2			
$U_{0,310U}$ 0,300		$U_{7,8}$ 8,3			$U_{21,8}$ 20,8			
$U_{0,138}$ 0,600	$U_{9,7U}$ 9,7		$U_{10,2}$ 11,2				$U_{36,4}$ 38,2	
$U_{0,100}$ 1,000						$U_{7,65U}$ 7,50		$U_{10,0}$ 13,9
$U_{0,087}$ 1,100		$U_{5,9}$ 6,1						
$U_{0,060}$ 1,600				$U_{13,5}$ 14,3				
$U_{0,025}$ 3,500	$U_{6,30}$ 5,24	$U_{3,10}$ 4,26	$U_{4,60}$ 4,50					
$U_{0,010}$ 8,500				$U_{8,00}$ 8,50	$U_{4,80}$ 3,82	$U_{2,26}$ 2,85	$U_{28,2}$ 28,0	$U_{4,10}$ 4,65
$U_{0,006}$ 15,00	$U_{3,60}$ 2,50							
$U_{0,005}$ 16,00			$U_{1,30}$ 1,70	$U_{6,60}$ 6,46	$U_{3,20}$ 2,72	$U_{1,45}$ 1,87	$U_{24,5}$ 24,2	$U_{3,15}$ 3,08

### ВЫВОДЫ

1. В статье описана усовершенствованная модель электрического сопротивления продуктивных терригенных отложений с межгранулярным типом пустотного пространства. Эта модель представлена в виде

- формулы (5) для расчета удельного сопротивления породы в зависимости от объема водонасыщенных пор, доли открытых пор, заполненных адсорбированной во-

дой и двойным ионным слоем, а также удельных сопротивлений поровой воды и двойного ионного слоя,

- формулы (7) и реализующей эту формулу палетки(рис.4) для расчета доли открытых пор, заполненных адсорбированной водой и двойным ионным слоем,
- палетки (рис. 3 ) и формулы (9) для расчета удельного сопротивления двойного ионного слоя в зависимости от удельного сопротивления поровой воды и доли открытых пор, заполненных адсорбированной водой и двойным ионным слоем..

2.Предложенная модель опробована на двух коллекциях образцов глинистых песчаников и алевролитов, у которых были измерены величины удельного сопротивления при поровой воде, представленной раствором хлористого натрия, минерализация которого изменялась от 5 до 0,005 нормалей. Рассчитанные с помощью предложенной модели величины удельного сопротивления образцов обеих коллекций хорошо согласуются с измеренными значениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.С., Афанасьев С.В.. Новая петрофизическая модель электропроводности терригенной гранулярной породы - Тверь: НППП "ГЕРС", 1993.
2. Вендельштейн Б.Ю., Элланский М.М.. Влияние адсорбционных свойств породы на зависимость относительного сопротивления от коэффициента пористости. - Прикладная геофизика, вып. 40, М.: Недра, 1964. С. 181-193 .
3. Диева Э.В., Фоменко В.Г., Понтюхин В.А.. Интерпретационные модели для определения водонасыщенности песчано-глинистых пород по данным ГИС (на примере Западной Сибири) - М.: 1988. (Разведочная геофизика: Обзор ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ. ВИЭМС).
4. Астоян С.Г., Кропотов О.Н., Топорков В.Г. и др. Методические указания по проведению геофизических исследований поисковых и разведочных скважин в Тюменско-Печорской нефтегазоносной провинции и интерпретации полученных материалов. - Калинин: ВНИИГИК, 1986.
5. Орлов В.Н., Шилина И.Д. Нетрадиционные петрофизические модели пород-коллекторов по электропроводности.: Геофизика, 1998, № 5. С.29-43.
6. Элланский М.М.. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики - М.: Недра, 1978.
7. Элланский М.М Еникеев Б.Н.. Использование многомерных связей в нефтегазовой геологии - М.: Недра, 1991.

8. Элланский М.М., Рынская Г.О., Дмитриева Т.А.. Влияние минерализации пластовой воды на остаточную водонасыщенность глинистых терригенных пород. - М.: 1987. Деп.в ВИНТИ 26.05.1987. N 3788 - В87.

9. Элланский М.М. Использование современных достижений петрофизики и физики пласта при решении задач нефтегазовой геологии по скважинным данным : Учебное пособие, М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 1999 .

10.Clavier C, CoatesG., DumanoirJ. Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands. Soc. Pet. Engrs. J.,1984. Vol. 24.P. 153-167.

11.Ferenczy L. Direct determination of cementation exponent for dual water type models from logs . Trans. SPWLA, Ann. Logging Symph.,1991. X.

12.Hill H.J, ShirleyO.J., KleinG.E. Bond water in shaly sands - its relation to  $Q_v$  and other formation properties. Log Analyst.1979. Vol. XX. P. 3-19.

13.Lawrence M.S., Stephen K. Analysis of electrical conduction in the grain consolidation model . Geophysics. Vol. 52. N 10 (October 1987). P. 1402-1411.

14.Sen P.N.t GoodeP.A. Shaly sand conductivity at low and high salinities. Trans. SPWLA Ann. Logging Symph.1988.

15.SilvaL.P., Bassiouni Z. A shaly sand conductivity and dual water concepts. Trans. SPWLA Ann. Logging Symph.1985. RR-14.