

Каротажник №7 (205) 2011 стр.209-226

Материал взят с сайта <http://www.petrogloss.narod.ru>

Еникеев Б.Н. (ЗАО ПАНГЕЯ)

bne@pangea.ru

70 лет уравнению Дахнова-Арчи.

Аннотация

С момента публикаций В.Н.Дахновым (1940) и G.A.Archie (1942) степенного уравнения связи сопротивления пород и их пористости прошло 70 лет. С тех пор было сделано немало попыток улучшения и уточнения этого уравнения применительно к разным типам объектов и расширения области его применения для глинистых песчаников, карбонатов с двойной пористостью и других объектов. В статье рассматривается история развития наиболее интересных с позиций автора направления обобщения уравнения Дахнова-Арчи.

Enikeev B.T. (PANGEA)

bne@pangea.ru

70-th anniversary of Dakhnov-Archie equation

70 years have already passed since V.N. Dakhnov (1940) and G.A.Archie (1942) had published a power equation relating rocks resistance and porosity. Since then many attempts have been made to improve and specify it for various object types as well as expand its application area to argillaceous sandstone, double-porosity carbonate etc.

The report elaborates on the most interesting generalization ways of the Dakhnov-Archi equation.

70 лет уравнению Дахнова-Арчи.**Ранняя история**

Публикацией данной статьи автор пытается отдать долг памяти своим наставникам и старшим коллегам - основателям российской петрофизики В.Н.Дахнову, В.Н.Кобрановой, Б.Ю.Вендельштейну и М.М.Элланскому. Статья представляет собой попытку на концептуальном уровне отразить развитие идей в области расчета проводимости после Дахнова и Арчи. Недостаток объема данной публикации не позволяет поместить ссылки на все источники, ряд конкретных соотношений и выкладок и заинтересованные могут их найти в [18] и более полно в серии продолжающихся публикаций автора по моделированию в петрофизике, выходящей во ВНИИОЭНГ (2009-2011).

Понятию ПЕТРОФИЗИКА после переименования журнала Log Analyst в Petrophysics многие на западе, а наиболее бездумные и в России, стали придавать обесмысливающий широкий смысл как каротажу вообще и противопоставлять его Rock Physics. Вместе с тем само исходное понятие ПЕТРОФИЗИКА и этот термин и вовсе появился лишь в 50-е годы. Как разъяснил Thomas, в статье посвященной 50 летию уравнения Дахнова-Арчи, родилось оно в ходе товарищеского ужина Арчи и коллег из Shell в кафе Гааги. А собственно со слова-понятия ПЕТРОФИЗИКА и статьи Арчи, а потом книг Дж.Пирсона и В.Н.Кобрановой явилось то направление мысли и эксперимента, создавшее все течение мысли, которое сложило современное направление петрофизических исследований.

Но само понятие не могло появиться перед тем как возник и подтвержден принцип, согласно которому свойства горных пород взаимосвязаны по неким довольно жестким и определяемым правилам и соотношениям

И началось все это с уравнений Сликтера, Козени-Кармана и Дахнова-Арчи. Появлению понятия “Петрофизика” (конечно, в исконном смысле, а не в озадаченном стараниями западных редакторов) в работе G.A.Archie предшествовала публикация одного из наиболее известных ныне эмпирических

обобщений (степенной связи пористости и параметра пористости пород) в книге В.Н.Дахнова (1940) и немного позже в статье G.A. Archie (1942).

Во второй половине 30х годов прошлого века в России и США стали систематически проводить измерения пористости и сопротивления на керне. В России Дахнов [7] пытался подвести под них теоретическую базу (в виде формулы Максвелла), но упомянул и о степенном законе при низкой пористости (!!!). Есть подозрение, что Archie применял двойную логарифмическую бумагу. Пытался упорядочить измерения на таких бланках. В итоге появилось уравнение, называемое в России уравнением Дахнова-Арчи (1).

$$\frac{\rho_n}{\rho_s} = \frac{a}{K_n^m}$$

Но вначале это были отчеты 1935-39 годов, потом книга Дахнова и статья Archie. Перед этим и после этого были попытки устроить нечто подобное работам Слихтера – интегрировать по пространству, заполненному сферическими частицами (Славинский, Каган [19], Зундберг), но успеха эти попытки не имели и оказались забыты.

Уравнение Дахнова-Арчи отличалось от этих попыток несколькими важными элементами:

Уравнение учитывает требование размерности (безразмерные величины и слева и справа);

Оно параметрическое (не было зафиксировано значение константы – m , указывались лишь диапазоны);

Имеется конструктивная процедура адаптивной настройки параметров (вручную в двойном логарифмическом масштабе);

Оно работает во всем диапазоне пористостей (вернее на нем определено) и потому допускает экстраполяцию.

И уже в не менее знаменитой второй работе Арчи (где он и вводит понятие ПЕТРОФИЗИКИ) это различие констант для разных отложений анализируется. Столь же последовательно отстаивали разнообразие констант В.Н.Дахнов и В.Н.Кобранова.

Пара слов об G.A. Archie. Формально он написал немного работ, но три из них являются эмпирическими и концептуальными обобщениями и очень важны. Во второй (1950) он ввел понятие петрофизики (во вполне камерной обстановке).

Вообще говоря, Archie и В.Н.Дахнов были людьми с совершенно разным когнитивным и поведенческим стилем. Ниже приведена попытка формализовать свои соображения на сей счет, относя их ко всей деятельности этих авторов в области петрофизики.

Таблица 1. Отличие работы по петрофизике G.A. Archie и В.Н.Дахнова

№	Фактор	G.A. Archie	В.Н.Дахнов
1	Дата публикации	1942	1940
2	Стиль	Эмпирический	Теоретико-эмпирический
3	База для обобщений	По собственным эмпирическим данным	Проблема рассмотрена комплексно, начиная от Maxwell
4	Объекты изучения	Чистые породы (песчаные и карбонатные)	Породы всех типов и многих месторождений, включая глинистые
5	Количество публикаций	Несколько интересных статей с эмпирическими обобщениями	Большой объем книг, обзоров и ссылок, переведенных на многие языки
5	Ссылки на других	Практически отсутствуют	Широко представлены

Знали ли эти авторы в момент публикации о работах друг друга? Мне непонятно, поскольку отношения с Западом тогда уже были прерваны сталинскими репрессиями. Впоследствии В.Н.Дахнов всегда ссылался на G.A.Archie и организовал перевод нескольких его публикаций (притом тогда, когда времена при

которых, что перевод мог служить поводом ”для обвинения в низкопоклонстве перед Западом” еще не были забыты).

Теоретические уравнения для сопротивления смеси частиц и композитов.

Как часто бывает в подобных случаях, только много позже удалось выяснить (А.В.Булатов, Б.Н. Еникеев (1970)), что к степенному уравнению можно прийти и чисто теоретически из уже опубликованных к этому времени уравнений (K.Lichtenecker&K.Roter (1933) и D.A.G.Bruggemana (1935), для частного случая $a=1$ и $m=1.5$). Вместе с тем, твердо установленный и многократно подтвержденный факт наличия указанной степенной взаимосвязи для пород с высокой минерализацией насыщаемой жидкости и простой структурой порового пространства породили целый ряд формальных обобщений, часть из которых малоизвестна и будет затронута в данном сообщении. При построении теоретических моделей расчета особенно популярны эллипсоиды (поскольку в постоянном внешнем поле их поляризация приводит к постоянному внутреннему, а кроме того они описывают эффект анизотропии и вырождаются в популярные геометрические фигуры, такие как сферы, цилиндры, пластины).

При расчете фактически речь идет о помещении поляризуемого внешним полем эллипсоида в некую однородную среду (причем ее свойства могут совпадать со свойствами искомой среды – самосогласование или той, в которую эллипсоиды погружают). Более сложная постановка требует задания взаимного расположения частиц (обычно регулярного или хаотического) для учета многочастичного взаимодействия [10, 12, 18,22, 35, 41].

Как вариант могут быть рассмотрены схемы иерархического строения. В первом случае (модель непрерывного вложения) однородные частицы погружаются в среду, включающую смесь таких же, но более мелких частиц. Во втором (модель непрерывного смешения) и среда и частицы состоят из частиц меньшего размера в разной пропорции.

Метод вложения в непрерывной постановке был предложен Бруггеманом, а в дискретной применялся многими авторами (в России наиболее популярны ссылки на давнюю работу Семенова [21]). Метод непрерывного смешения был впервые развит К. Lichteneker и К. Rother.

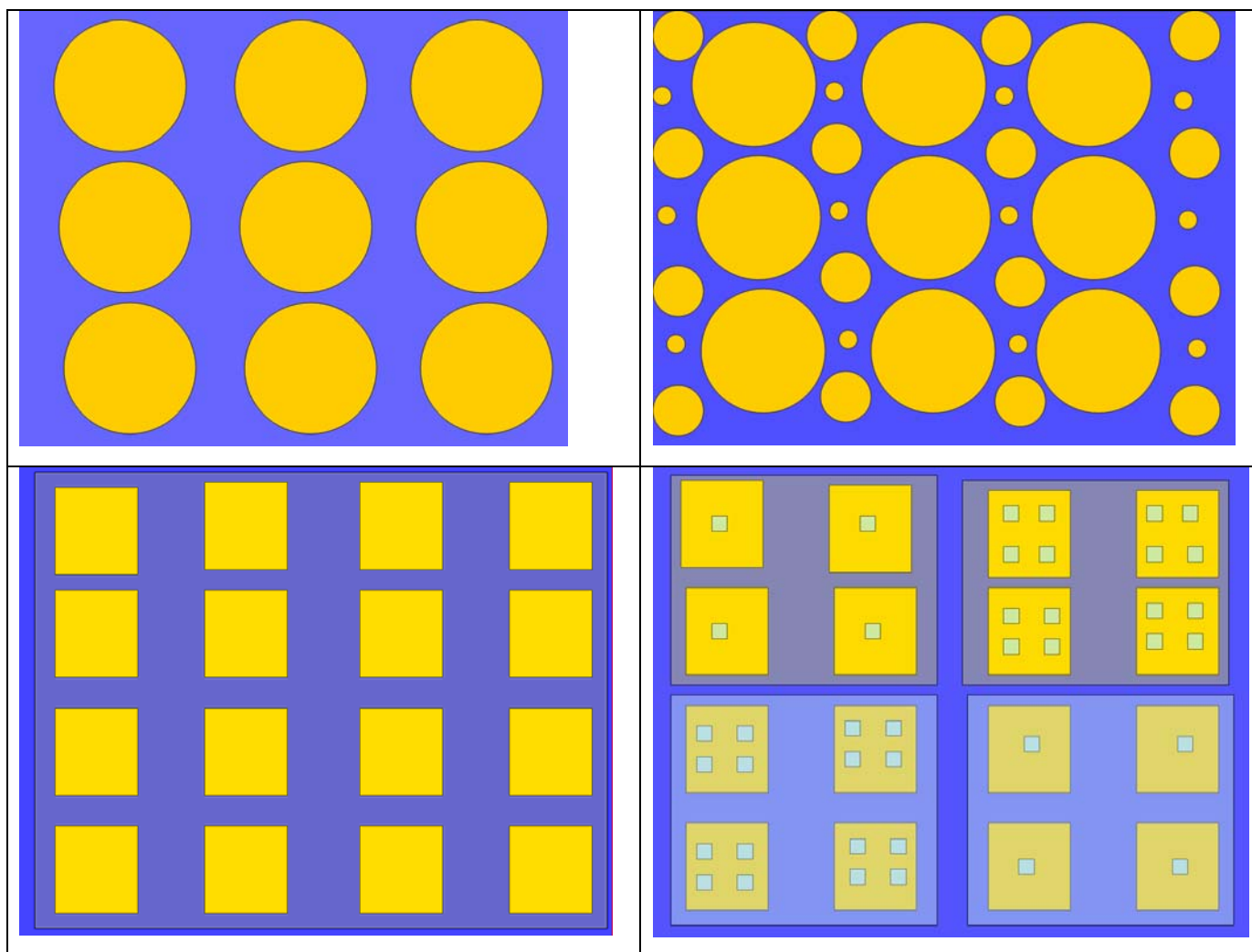
Оба метода в дискретном варианте имеют очевидные ограничения (не обоснованы границы, разделяющие фракции, и при разном числе фракций сходных размеров будут получаться разные результаты. В непрерывных вариантах этих методов подобные ограничения заретушированы, поскольку заложена автомодельность геометрии и подобные вопросы не стоят.

Рассмотрение эллипсоидов приводит к естественной морфологической таблице, исключающей размерность геометрии включений. В [12, 18, 34] автором статьи вычленяются пять типов соотношений для расчета подобных физических свойств, сведенных ниже в таблицу 2 (параллельно и независимо во многом сходная работа была выполнена В.А. Ефимовым).

Таблица 2. Морфологическая таблица для простых схем расчета композитов

Тип	Одноранговый	Промежуточный	Дифференциальный
Матричный	Максвелл-Эйкен	Релей-Балагуров	Бруггеман-Низель
Самосогласованный	Бруггеман-Финкельберг	Беттхер-Онзагер	Лихтенеккер&Ротер – Луэнга-Еникеев

Интуитивное строение о характере строения модельных сред указанного в Таблице 2 вида можно попытаться составить из схем, приведенных ниже.



История задачи расчета проводимости (сопротивления) многокомпонентных смесей в основном следовала заполнению этой таблицы, идя от сфер к эллипсоидам, и результаты, полученные в интересующем нас ракурсе, приведены ниже в таблица 3 (в основном суммирующей материалы, приведенные автором публикации в статье [12] и частично вошедшие в книги [18, 24,25]). В этой таблице не различаются результаты, формализованным в разных областях знания, но основное внимание уделяется полученными и проинтерпретированными применительно к задачам петрофизики. При прочих равных условиях (в этой области много переоткрытий и плагиата) дается ссылка на первую известную автору работу.

Таблица 3. Некоторые результаты по физике неоднородных сред

№	Год	Автор	Особенности публикации
1	1873	Maxwell	Решение задачи для поляризующейся сферы и суспензии сфер
2	1910	Rayleigh	Точное решение в виде ряда для кубической укладки (в решении были ошибки найденные позже Runge (1924) и новая – Meredith&Tobias (1960)
2	1910	Wiener	Суспензия эллипсоидов
3	1933	K.Lichtenecker & K.Roter	Степенное уравнение для смесей (уравнение “непрерывного смешения”), вырождающееся в уравнение Дахнова-Арчи
4	1935	D.A.G Bruggeman	Уравнение самосогласования (уравнение “смешения”) для упадок сфер
5	1935	D.A.G Bruggeman	Уравнение интегрального типа (уравнение “непрерывного вложения”) для смесей сфер разного диаметра (вырождающееся в (1) с $a=1$ и $M=1.5$.)
6	1950	Niesel	Обобщение уравнения “непрерывного вложения” для смесей эллипсоидов.
7	1965	Looenga	Оригинальный способ вывода уравнения непрерывного смешения для сфер
8	1973	Б.Н.Еникеев	Пять схем расчета смесей проводников из разных по проводимости и геометрии эллипсоидов
9	1975	В.А.Ефимов	Две схемы смесей проводников (аналогично)
10	1980	P.N.Sen	Схема смесей проводников - непрерывное вложение
11	1988	Shwartz-Sen	Попытка обобщить схему непрерывного вложения используя поляризацию двойного слоя
12	2007	Балагуров	Обобщение подхода Релея на случай эллипсоидов

Вариационные оценки

Можно сформулировать довольно общее утверждение наподобие «теоремы упрочнения Хилла»: при прочих равных условиях любая локальная замена свойств элемента неоднородности на худшие (лучшие) будет приводить к ухудшению (улучшению) их эффективных свойств. В этой связи при расчете ряда эффективных свойств в разных полях применяется прием введения абсолютных изоляторов или абсолютных проводников, что дает возможность сделать поля плоскими и расчетным путем построения вилки для эффективных свойств (это относится как к электрическому полю, так и к упругим полям).

Если эффективную проводимость среды обозначить как Λ_{eff} , а проводимости и объемные содержания компонент как Λ_k и V_k , то справедливы строгие границы (по краям арифметические или гармонические средние) для Λ_{eff} .

$$1/(\sum V_k / \Lambda_k) \leq \Lambda_{eff} \leq \sum V_k * \Lambda_k$$

Полезно отметить, что это утверждение справедливо как для среды, состоящей из укладок частиц, так и для среды в виде решетки капилляров.

К указанному случаю удастся редуцировать более сложные, используя концепцию изоляторов и сверхпроводников (позволяющую выпрямить токовые линии и делающих потому правомерным простое интегрирование). Однако получаемые таким образом неравенства в общем случае дают слишком широкую вилку для оценок обобщенной проводимости. Указанная вилка может быть заметно сужена путем использования оценок Хашина-Штрикмана для случая изотропных сред (предполагается справедливость известной формулы Максвелла для проводимости многослойного шара, причем, проводимости слоев упорядочены в порядке возрастания или убывания). Интуитивно решение понятно (надо спрятать внутрь или наиболее проводящие или наиболее изолирующие элементы, а условие изотропии позволяет выбрать конфигурацию такого способа размещения неоднородностей только сферической).

Интрига с непостоянством констант

(история использования в 50-е годы)

Чисто организационно и технически жизнь сильно упрощается, если известно единое уравнение со всемирно применимыми универсальными значениями констант. Именно поэтому многие геофизики Запада тяготели к подбору таких значений констант, в частности известно знаменитое своей экзотичностью уравнение Hamble в котором уравнение Дахнова-Арчи (1) переписывается с константами $a=0.62$ и $M=2.15$

Однако практика показала, что такой подход плохо применим и появилось много альтернатив, включая другие наборы констант, правила их изменения с пористостью (притом нередко противоположные у разных авторов).

В частности это разнообразие породило совет 6-й из “ВРЕДНЫХ СОВЕТОВ ПЕТРОФИЗИКУ”:

“6. Не разменивайтесь по мелочам.

Вершиной петрофизики является уравнение Дахнова-Арчи. Поэтому сосредоточьтесь все свои усилия на поиске совершенного уравнения связи сопротивления с пористостью.

Как только вы его найдете - все станут на Вас молиться и будут вспоминать не Дахнова и Арчи, а Вас.

Если же с уравнением не получается, попробуйте отыскать точные значения его коэффициентов. Никто не знает кто такой Хамбл, но он обессмертил свое имя значениями $a=0.62$ и $M=2.15$.

Хорошо бы выразить Ваши новые константы через такие фундаментальные числа как "ПИ" или "Е" или (на худой конец) через гравитационную постоянную.

Если и это не получается, попробуйте переписать известные уравнения в новых обозначениях (введя побольше редко используемых греческих букв).

Это заменит отсутствующую новизну на элегантность и загадочность”.

“Десять вредных советов петрофизику”

<http://petrophysics.borda.ru/?1-0-0-00000010-015>

Подробнее на различных эмпирических соотношениях мы остановимся во второй статье, печатаемой в материалах конференции.

Проблема учета глинистости (полуэмпирические модели)

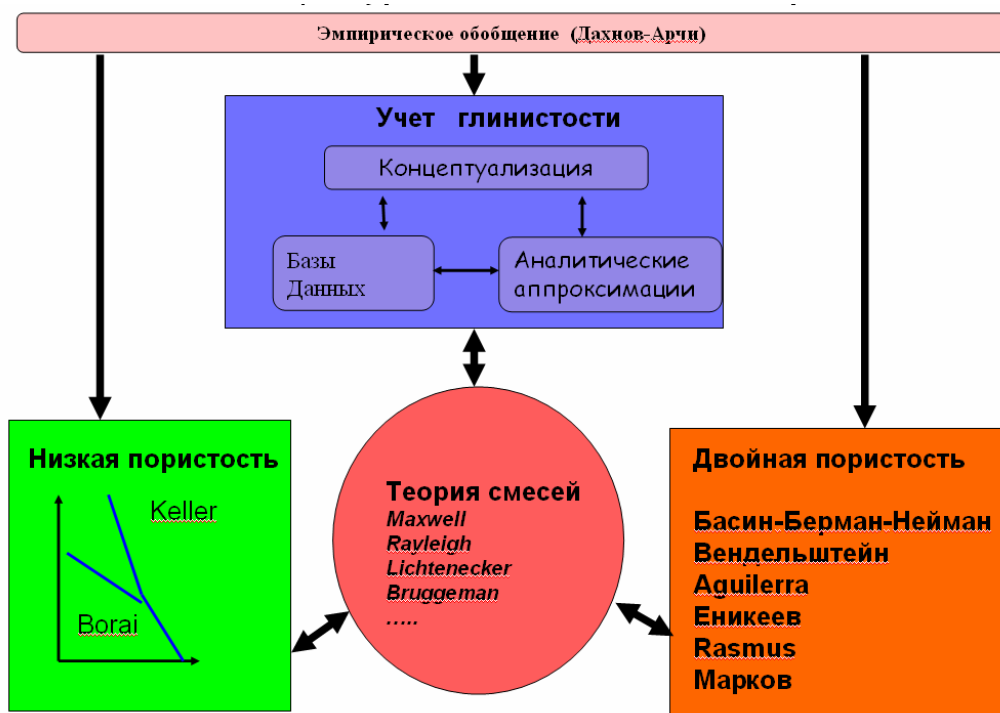
Практические потребности и теоретический интерес вызвала у многих исследователей (начиная с В.Н.Дахнова и De Witte) проблема интерпретации глинистых песчаников. Эта проблематика породила большое число формальных соотношений и построений, часть из которых проанализирована Дж.Пирсоном и

Р.Дебрантом. Основным эвристическим принципом при генерации подобных соотношений было требование их вырождения в частном случае в уравнение Дахнова-Арчи [9,42,43]. При этом в традициях западной геофизики, часто не ориентированной на использование кернавого материала, было порождение большого числа формальных соотношений с жестко зафиксированными на основе частных эмпирических данных константами (к ним можно отнести известное уравнение Humble или более поздние уравнения Simandoux или Poupon-Levo).

Выстраивались эти соотношения обычно по простой схеме путем аддитивного включения дополнительной к уравнению Дахнова-Арчи проводимости, притом по форме поправка зачастую также удовлетворяла уравнению Дахнова-Арчи [42, 43].

Важное направление связано с попытками распространить подход, выработанный для капиллярных систем и чистых глин (характерной чертой которых при низких минерализациях является наличие “дополнительной проводимости связанных ионов”) на описание глинистых пород. Одной из альтернативных попыток такого рода явилась работа Hill&Milbern (1955). Для описания подобного механизма был предложен ряд эмпирических соотношений (Waxman&Smith (1968), М.М.Элланский (1970-2005)).

В этой области были предложены и другие теоретические (Revil [40]) и эмпирические (М.М.Элланский (1970-2005), В.С.Афанасьев (1992)) аппроксимации (причем первые с прагматической точки зрения имеют мало преимуществ перед вторыми, поскольку уравнение Пуассона-Больцмана практически не работает при минерализации выше 0.01N). В этой связи уместно упомянуть попытку Bassioni использовать уравнения для ионных двойников и тройников при расчете сопротивления [44].



К идеологии работы со смесями примыкает одна из альтернативных попыток всестороннего описания систем порода-цемент-вода в работах M.R.Wyllie с сотрудниками (1953-1962), которые последовательно развивали схему расчета проводимости неоднородных систем как смеси последовательного, параллельного и смешанного соединения проводников разного типа (в первую очередь, воды и глин). Существенным принципиальным отличием такого подхода являлось постулирование отдельных фаз – воды и глины – вместо добавок к проводимости за счет противоионов. Эти работы имели большой резонанс и широко цитировались до недавнего времени специалистами в области теории ионитов [6].

Идеология, исходящая из идей о породе как о гомогенной смеси компонент начала развиваться после работы Hill&Milbern (1953) и в СССР (И.Е.Эйдманом (1956), Б.Ю.Вендельштейном (1957-1972), М.М.Элланским (1960-1968)). В рамках этого подхода в уравнения для сопротивления вводилась мультипликативная поправка ("параметр поверхностной проводимости" Π), связанная с долей поверхностных зарядов на единицу объема пор породы [1-5, 23-26]. Такая модель гомогенна и не учитывает хорошо известной естественной анизотропии свойств пород.

Впоследствии Б.Ю.Вендельштейном (1968-1972) и М.М.Элланским (1972-2004) параметр Π стал рассчитываться в рамках гетерогенных моделей горных пород (глина обволакивает стенки капилляра). Эта работа [1-3] на несколько лет опередила сходную по идее публикацию о модели Dual Water (история вопроса описана в [5]).

Сходное по идеологии направление как попытка записать расчетные уравнения, применяя разного типа формальные соотношения (начиная от формулы Maxwell и заканчивая формулой с параллельным соединением воды и глин в рамках единого капилляра), было предложено В.Н. Дахновым (1965).

Дальнейшим развитием этого направления можно считать последующие публикации Б.Н.Еникеева (1972-1979), В.А.Ефимова (1975-1990), P.N.Sen (1980), в которых был рассмотрен вопрос применимости ряда соотношений, полученных в физике микронеоднородных сред, к глинистым песчаникам, включая и объяснение связи Π с мембранными потенциалами (Б.Н. Еникеев (1978)).

Особенно компактно и просто до наглядности выглядят соотношения, получаемые из метода непрерывного смешения. В варианте дисперсной глинистости для них достаточно заменить сопротивление пластовой воды на сопротивление смеси, получаемое из уравнения (2)

$$\frac{\rho_{см}}{\rho_g} = \left(1 + \frac{K_{nзл} K_{зл}}{K_n K_g} \left(\left(\frac{\rho_{зл}}{\rho_g} \right)^\alpha - 1 \right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

В отличие от реакции в России на эти результаты, работы P.N.Sen (1980) были с огромным интересом встречены на Западе. Впоследствии западными авторами (Sen&Goode(1988) и Argard&etc (1989)) были получены интересные результаты в попытке описать поляризацию двойного слоя в электрическом поле вокруг частиц породы в рамках первых приближений, развитых в теории проводимости микронеоднородных сред [32]. Практического применения эти попытки не нашли как ввиду громоздкости конечных выражений, так и по причине их теоретической ограниченности (уравнение Пуассона-Больцмана практически не работает при минерализации выше 0.01N).

Попытка суммировать и описать, что же происходило исторически с уравнениями для глинистых песчаников, приведена в таблице 4.

Таблица 4. Некоторые публикации по учету влияния глинистости

№	Год	Автор	Особенности публикации
1	1940	В.Н.Дахнов	При малых K_p R_p зависит от K_p как степень
2	1941	G. A.Archie	Графическое представление и степенная форма
3	1947-49	А.С. Семенов	Принцип вложения
4	1950	L. de Witte	Эффект глинистости как дополнительное слагаемое
5	1953-56	M.R.Wyllie	Часть породы соединена последовательно, а часть параллельно и смешано. Ввел КВАДРАТ ВИЛЛИ
6	1953-56	Hill-Milbern	Проведен большой цикл эмпирических исследований. Введена как мера глинистости (автоматом учитывающая их дисперсность) емкость обмена – Q
7	1956-57	И.Е.Эйдман	Концептуальная работа – поверхностная проводимость Π как параметр, умножаемый на R_p
8	1959	Б.Ю.Вендельштейн	Экспериментальная работа по Волго-Уралу-Туймазы. Переворачивание параметра Π Эйдмана Палетки Π как функция Q и R_w
9	1962	Вендельштейн-Элланский	Параллельная и последовательная модель порового канала и обработка по данным Вендельштейна
10	1968	Waxman-Smith	Вехой явилось публикация данных Hill&Milbern и собственных (их потом использовали все) и свой вариант эмпирического уравнения
11	1970-2006	М.М.Элланский	Полуэмпирические регрессии по статье Hill&Milbern и нащупывание точки, отвечающей случаю $R_v=R_{\text{слоя}}$ (знаменитое 0.22 Омм)

12	1970-	Е.И.Леонтьев- Мамяшев	Учет поверхностной проводимости по схеме Wyllie Доля параллельной проводимости порядка 85%
13	1977-	Dual Water	Попытка ввести вместо аддитивной схемы наложения проводимостей у Ваксмана и Смита схемы параллельных проводников

Полезно знать некоторые часто не афишируемые вещи про самые распространенные на Западе уравнения (такие как уравнение Waxman-Smith и Dual Water):

1. Входящая в них емкость обмена редко и трудно измеряется (особенно для сильно глинистых образцов);
2. Способы пересчета емкости обмена в глинистость весьма недоопределены и сомнительны;
3. Такие уравнения принципиально не описывают анизотропию сопротивления (ведь и пористость и емкость не зависят от направления);
4. Уравнение тестировалось и его константы подбирались только по молодым песчано-глинистым отложениям (данные Hill&Milbern и Waxman&Smith).

Перколяция и фракталы

В последующем интерес к проблематике физики микронеоднородных сред привел к анализу применимости теории перколяции и теории фракталов к описанию решеток капилляров. Направление исследования решеток капилляров (начатое еще ранними публикациями Ir.Fatt (1956) и продолженное в Германии J.Schopper (1966- 1992) и его коллегами и учениками) привело к интересным выводам о роли координационного числа решетки и дисперсии капилляров по размерам. Уравнения же эффективной среды и перколяции приводили к соотношениям, отличным от уравнения Дахнова-Арчи.

Особый интерес в этой связи вызывает переход и сопряжение уравнений теории эффективной среды и перколяции. В этой связи автором тезисов предложено и опубликовано в материалах конференции Geomodel-2008 одно из обобщений метода степенных средних K.Lichtenecker&K.Rother (1933). Уравнения

K.Lichtenecker&K.Rother связаны с описанием самоподобия и потому хорошо отражают фрактальные свойства многокомпонентных сред, которые традиционный фрактальный подход по сути игнорирует.

Как известно, степенное среднее, имеющее вид $\Lambda_{эфф} = (V^* \Lambda_1^a + (1-V)^* \Lambda_2^a)^{1/a}$ может быть выведено как следствие нескольких постулатов относительно функции среднего $\Lambda_{эфф} = F(\Lambda_1, \Lambda_2, V)$, где Λ_1 - свойство первой компоненты, Λ_2 - второй и V – объемная доля первой компоненты.

Используемые при выводе постулаты отражают представления о линейном характере исходного свойства, фрактальном характере среды с неизменной геометрией включения компонент (т.е. о неизменном характере формулы для расчета смесей более высокого уровня из смесей более мелкого уровня). Итогом их применения является обыкновенное дифференциальное уравнение вида: $F * (d^2F/dV^2) / (dF/dV)^2 = 1 - a$.

Его интегралом служит алгебраическое уравнение: $V = C_1 * F^a + C_2$. При использовании новых краевых условий: $F(\Lambda_1, \Lambda_2, V_c) = \Lambda_2$; $F(\Lambda_1, \Lambda_2, 1-V_c) = \Lambda_1$. Интегрирование в этом случае приводит к уравнению, аналогичному степенным средним, но с W вместо V . При этом W получается из V , по сути, перенормировкой на исключенный объем – V_c , т.е. имеем $W = (V - V_c) / (1 - V_c)$.

Трещинные и трещинно-кавернозные породы

Особый интерес вызывает обобщение уравнения Дахнова-Арчи на случай трещинно-кавернозных пород. Отдельно эту проблематику долгое время изучал А.М.Нечай, касаясь в частности вопроса о роли изменения сопротивления блоков в ходе их пропитки.

В этой же связи уместно упомянуть ранние работы Горюнова (ВНИГРИ), Басина-Бермана-Неймана (1966) и Нечая-Вендельштейна (ориентированные на использование уравнений Maxwell или близких к нему) и работы R.Aguilerra (1995) и Patricola&Waff (1995).

В этих публикациях делаются попытки учесть два уровня неоднородностей, причем уравнение Дахнова-Арчи формально может применяться на первом (для оценки проводимости блока по пористости его матрицы).

Более естественным в тех случаях, когда есть и вертикальные и горизонтальные трещины равного раскрытия и регулярная решетка включений, представляется использование для расчета точных результатов Балагурова.

Заключение

Завершая изложение, представляется уместным зафиксировать момент крайне неадекватного поведения ряда отечественных и западных петрофизиков в плане отношения к своим предшественникам. Особенно наглядно показывает это Google metrics. Для примера автор провел поиск на русском и английском языке средствами Google и свел результаты в таблицу. Запрос на русском: “Имярек” “параметр пористости” “пористость”, а запрос на английском: “Имярек” “formation factor” “porosity”

Таблица 5. Число ссылок в Google на авторов по запросам (апрель 2010)

Автор (уравнение)	Русский запрос	Английский запрос
Дахнов	18	4
Арчи	30	6050
Добрынин	18	49
Вендельштейн	18	1
Элланский	5	3(6)
Еникеев	5	2(10)
Dual water	3	923
Indonesia	0	817
Simandoux	0	229
Doll	0	738
Sen	0	1 820

Humble	0	192
--------	---	-----

Наверняка имеется несколько причин, приводящих к умалению достижений отечественных исследователей, но ряд из них (пренебрежительно-хамоватое отношение к отечественным предшественникам, незнание первоисточников, стремление умолчанием чужих публикаций повысить значимость собственных) наверное просматриваются у целого ряда авторов (в частности трудно в этой связи не упомянуть обзорную статью нашей соотечественницы в "Каротажник", в которой изложение истории вопроса применения уравнения Дахнова-Арчи произведено без упоминания В.Н.Дахнова, Б.Ю.Вендельштейна и М. М.Элланского).

На мой взгляд часть вины за подобное упущение лежит не только на авторах, самонадеянно и поверхностно пытающихся вторгаться в чуждую им проблемную область, но и на рецензентах, не мешающих формироваться институциональной ловушке [15, 16].

Из переписки с редакцией КАРОТАЖНИК

Я с Вами говорил с Вами по телефону о просьбе добавить сноску в одну публикацию (уж больно я жестко прошелся в адрес Нестеровой). Мне хотелось бы в статью "70 лет уравнению Дахнова-Арчи" в конце(после абзаца): "На мой взгляд часть вины за подобное упущение вина лежит не только на авторах, самонадеянно и поверхностно пытающихся вторгаться в чуждую им проблемную область, но и на рецензентах не мешающих формироваться институциональной ловушке [15, 16]" добавить нижеприводимую сноску

"Волей судеб автор статьи имел возможность на ГЕОМОДЕЛИ-2010 побеседовать с хулимым им автором и лишний раз убедиться, что проблема обычно не в людях и их коварных умыслах, а традициях и институтах, искажающих представление о нормах работы. Так что ничего личного в адрес автора цитируемой публикации и надеюсь, что в дальнейшем повод для подобных инвектив ни у кого не появится".

В ответ я получил из редакции "Каротажник"

Уважаемый Борис Николаевич, при редактировании подлежащий изменению фрагмент теста был исключен из статьи. Редакция НТВ.

Мой ответ:

Вообще-то немного странно редактировать текст не согласуя изменения с автором (если это не техническое редактирование, но обычно и его согласуют, вплоть до запятых и гранок). При исключении может быть и потеря смысла и внесение своего нового смысла (отличного от авторского). Насколько я в теме это не сильно законно и в России и есть где это выяснять. Но не судиться же с Вами (если изменения не фатальные). Впрочем это лишь упрощает мою задачу разместить в интернете первоначальный вариант текста (препринт)

=====

Но, не взирая на проблемы, информационные барьеры и замалчивание, росток, заложенный небольшими по размеру замечаниями В.Н.Дахнова и статьей G.A.Archie, оказался на весьма благодатной почве и разросся до дерева с сотнями ссылок и аналитических соотношений.

Ограниченность объема публикации вынудила автора данной статьи проигнорировать ряд субъективно менее интересных с его точки зрения работ не только из США и России, но и из таких стран, как Франция, Мексика, Австралия, Германия, Бразилия и Китай. Тем не менее, наверное целесообразно отметить, что в данной области долго и активно работают многие авторы, в том числе Torquato Sahimi и М.А.Марков.

Приведенные материалы развернуты в виде серии публикаций в журнале “Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса” ВНИИОЭНГ 2009-2011. Кроме того, часть этих материалов планируется разместить на сайте www.petrogloss.narod.ru и обсудить на petrophysics.borda.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. Вендельштейн Б.Ю. О связи между параметрами пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионно-адсорбционной активностью и

- адсорбционными свойствами терригенных пород. М. Гостоптехиздат. Труды МИНХ и ГП, вып. 31, 1960.
2. Вендельштейн Б.Ю., Элланский М.М. О влиянии адсорбционных свойств пород на зависимость относительного сопротивления от пористости. Прикладная геофизика, вып. 40, 1964.
 3. Вендельштейн Б.Ю. Исследование разрезов нефтяных и газовых скважин методом собственных потенциалов. М.: Недра. 1966
 4. Вендельштейн Б.Ю., Еникеев Б.Н. Некоторые особенности методологии построения, оформления построения, оформления и использования петрофизического знания и пути его совершенствования. ГЕОФИЗИКА 10 лет ПАНГЕЕ М.: ЕАГО 2004 стр. 65-73 <http://petrogloss.narod.ru/geoph10p.htm>
 5. [Вендельштейн Б.Ю. О модели "двойной воды" \(к истории вопроса\).
http://www.petrogloss.narod.ru/DualWat.htm](http://www.petrogloss.narod.ru/DualWat.htm)
 6. “Вопросы промысловой геофизики” Сб, переводов ГосТопТехИздат 1957 (в этом сборнике в частности опубликованы переводы статей Archie, Hill&Milbern и Wyllie)
 7. Дахнов В.Н. Интерпретация каротажных диаграмм. М-Л. 1941 496стр.
 8. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. Недра. М., 1975.
 9. 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).
 10. Дмитриева Т.А., Еникеев Б.Н., Чуринова И.М. Фундаментальные уравнения и неравенства в петрофизике и их сравнительная эффективность в условиях терригенного разреза. Сборник докладов второго научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике. т.2 Промысловая геофизика. М.: СЭВ 1981 стр.68-77.
 11. Еникеев Б.Н., Элланский М.М. Обобщенный принцип непрерывного смешения и расчет проницаемости и электропроводности горных пород.

12. Еникеев Б.Н. К проблеме построения моделей удельного электрического сопротивления горных пород (некоторые проблемы теории обобщенной проводимости многокомпонентных смесей). Саратов: СГУ Математические методы в геологии. 1979 стр.70-96.
13. Еникеев Б.Н. Математические модели расчета эффективных физических свойств горных пород (модель решетки капилляров). Исследования и разработки в области нефтяной геофизики в странах – членах СЭВ т. II М.: СЭВ 1988 стр.308-316. http://mmell.narod.ru/Enikeev_SEV-2a.pdf
14. Еникеев Б.Н., Кашик А.С., Чуринова И.М., Шпикалов Ю.А. Системный подход к задаче оценки свойств пласта по данным каротажа. М.: ВНИИОЭНГ 1980. 38 стр.
15. Еникеев Б.Н. Об истоках заблуждений в геолого-математических построениях. // Математические методы анализа цикличности в геологии М.: Московский Государственный Открытый Университет 1992 стр.76-86.
16. Еникеев Б.Н. Институциональные ловушки при синтезе прикладного знания. Материалы IV Российского философского конгресса МГУ 2004
17. Еникеев Б.Н. Попытка морфологического сравнения некоторых направлений комплексной интерпретации ГИС Современные проблемы промысловой геофизики (Дахновские чтения) Тезисы докладов М.: РГУНГ 2005 стр.39-41.
http://www.pst.h1.ru/Enik_Sum1-5.htm
18. Еникеев Б.Н. Моделирование в петрофизике (решения, проблемы и перспективы). В сб.: “Актуальные вопросы петрофизики сложнопостроенных коллекторов.” Краснодар “Просвещение- Юг”. 2010. стр.6-68.
19. Каган А.С. К расчету удельного электрического сопротивления горных пород ЖТФ т.IX №2 1939
20. Нестерова Г.В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций) Каротажник 1985 (175) стр.81-101.

21. Семенов А. С. Влияние структуры на удельное сопротивление агрегатов // Геофизика. ВСЕГЕИ. 1948. Т. 12. С. 43–61.
22. Ханай Т. Электрические свойства эмульсий. В кн.: Эмульсии. Под. ред. Ф. Шермана. Л. Химия, 1972 с. 313-415.
23. Эйрман И.Е. Об электрокаротажных параметрах. Прикладная геофизика, вып. 14, 1956.
24. Элланский М.М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики - М.: Недра, 1978.
25. Элланский М.М., Еникеев Б.Н.. Использование многомерных связей в нефтегазовой геологии - М.: Недра, 1991.
26. Элланский М.М.. К вопросу о моделировании электропроводности глинистых водонасыщенных пород с межгранулярной пористостью Геофизика. 2001 №2 Геофизика. 2001 №2 http://mmell.narod.ru/Ell_Rp_Geoph_2001_2.pdf
27. Archie G. E. The Electrical resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // Transactions of the AIME. 1942. Vol. 146. P. 54–62.
28. Arns, J. Y., Sheppard, A. P., Arns, C. H., Knackstedt, M. A., Yelkhovsky, A., Pinczewski, W.V., 2007, “Pore-level validation of representative pore networks obtained from micro-ct images”. SCA-2007-15, pp.1-12.
29. Bussian, A. E., 1982, “A generalized Archie equation”. Trans. SPWLA 23rd Annual Logging Symposium, July 6-9, Paper E
30. Bussian, A. E., 1983, “Electrical conductance in a porous medium”. Geophysics, 1983 V.48, N9, pp. 1258-1268.
31. Clavier, C., Coates, G. R., Dumanoir, J. L., 1977, “The Theoretical and Experimental Basis for the Dual Water Model for the Interpretation of Shaly Sands” Society of Petroleum Engineers, Paper 6859.
32. Goode, P.A., Sen, P.N., 1988, “Shaly sand conductivity at low and high salinities”. Trans. SPWLA 29th Annual Logging Symposium, Paper F.
33. Ioannidis, M.A., Chatzis, I., 2000, “A Dual-Network Model of Pore Structure for Vuggy Carbonates”. SCA-2000, pp. 1-12.

34. Jenikeev B.N. Die Modellierung physikalischer Eigenschaften des Gesteins im Rahmen von Schemata der granularen Komponenten und des Kapillarnetzes Bohrlochgeophysik. Freiburger Forschungshäfte C.447, Geowissenschaften Geophysik 1990 s.17-21.
35. Kazatchenko, E., Markov, M., Mousatov, A., Pervago, E., 2007, "Joint inversion of conventional well logs for evaluation of double-porosity carbonate formations". Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 56, No 4, pp. 252–266.
36. Korvin G. Fractals Models in the Earth Sciences. Elsevier Amsterdam, London, New York, Tokyo 1992. 396pp.
37. Pape, H-G., Riepe, L., Schopper, J.R., 1987, "Theory of self-similar network structures in sedimentary and igneous rocks and their investigations with microscopical and physical methods". Journal of Microscopy, V. 148, pp. 121-147.
38. Poupon, A., Clavier, C., Durmanoir, J., Gaymard, R., Misk, A., 1970, "Log Analysis of Sand-Shale Sequences - A Systematic Approach". Journal of Petroleum Technology, July.
39. Poupon, A., Levoux, J., 1971, "Evaluation of water saturation in shaly formation". Log analyst, N4, pp. 3-8.
40. Revil, A., L. M. Cathles III, S. Losh, and J. A. Nunn (1998), Electrical conductivity in shaly sands with geophysical applications, *J. Geophys. Res.*, 103(B10), 23,925–23,936
41. Sen P.N., Scala C., and Cohen M.H. Self similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads: Geophysics, 1981, Vol.4 pp. 781-795.
42. Sierra, O., 1986, "Fundamentals of Well-Log Interpretation: The Interpretation of Logging Data", Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
43. Simandoux, P., 1963, "Mesures Dielectriques en Milieu Poreux, Application a la Measure des Saturations en Eau, Etude du comportements des Massifs Argileux

(Dielectric Measurements in Porous Media and Application to Shaly Formations)”.
Revue de l’institut Francais du Petrole, Supplementary Issue.

44. Silva, L.P., Bassiouni, Z., 1985, “A shaly sand conductivity and dual water concepts”. Trans. SPWLA 26-th Annual Logging Symposium, Paper 1985-RR.
45. Wyllie, M.R.J., Rose, W.D., 1950, “Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock for electrical log data”. Paper 950105 in: Petroleum Transactions AIME Vol. 189, pp. 105–118.

About the authors

Enikeev Boris Nikolaevitch, born in 1947. Graduated from Moscow Institute of Oil and Gas by Gubkin in 1971. PhD in 1979. Worked in Central Geophysical Expedition (USSR, Russia) 1971-2008. Chief of Petrophysicist of JSC 'PANGEA' (Moscow, Russia) since 2001. SPWLA member since 1992. EAGE member since 2007.

bne@pangea.ru, bnenator@gmail.com (495) 912-10-53

Борис Николаевич ЕНИКЕЕВ

Главный петрофизик ЗАО "Пангея". Закончил МИНХиГП (1971). Кандидат технических наук (1979). С момента окончания института работает в ЦГЭ МНП, МИНХи ГП, ГлавНИВЦ (по совместительству). Соработчик систем машинной интерпретации каротажа Ц-2, Ц-3, АСОИГИС, ИНГИС, PetroSoftTools, работ по восприятию амбивалентных образов. Автор направления в петрофизике и интерпретации по построению, настройке и использованию математических моделей горных пород с применением методов прикладной статистики и численной нелинейной оптимизации. Член МОИП 1970, SPWLA 1992, EAGE 2007 Автор более 100-ти статей и книг. bne@pangea.ru, bnenator@gmail.com (495) 912-10-53