

5. Дембицкий С. И. Оценка и контроль качества геофизических измерений в скважинах. М.: Недра, 1991.
6. Дембицкий С. И. Типовые конструкции контрольно-проверочных скважин // Повышение качества геофизических измерений. Уфа: ВНИИнефтепромгеофизика, 1981.
7. Калистратов Г. А., Козыряцкий Н. Г. Унифицированная конструкция контрольной скважины с имитаторами электрических, акустических и радиоактивных свойств пластов горных пород // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 10. С. 69–76.

УДК 550.832.57

B. A. Велижанин, N. G. Лобода

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АППАРАТУРЫ В ОТДЕЛЕ РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА ООО “НЕФТЕГАЗГЕОФИЗИКА”

Рассмотрены вопросы математического моделирования при разработке зондовых установок и интерпретационного обеспечения радиоактивного каротажа. Показана эффективность этих разработок.

Ключевые слова: радиоактивный каротаж, аппаратура, интерпретация, математическое моделирование.

Задача сопровождения математическим моделированием всего цикла “жизни” аппаратуры радиоактивного каротажа (РК) от создания зондовых установок до интерпретации данных исследования скважин позволяет выделить две области использования результатов решения прямых задач РК:

- разработка зондовых установок, включая их метрологическое, методическое и интерпретационное обеспечение;
- интерпретация результатов каротажа, в том числе и опробование методик обработки.

Требования, предъявляемые к результатам моделирования в этих областях их использования, на наш взгляд, в настоящее время не могут быть удовлетворены в рамках единого аппарата.

При моделировании РК с целью решения вопросов создания измерительных зондовых установок, метрологического и интерпретационного обеспечения аппаратуры требуется правильное отражение влияния произвольных геолого-технических условий измерений на показания аппаратуры при меняющихся параметрах измерительной установки. В качестве метода математического моделирования при решении задач данного класса в отделе радиоактивного каротажа ООО “Нефтегазгеофизика” давно был выбран и интенсивно используется и в настоящее время метод Монте-Карло.

При решении обратных задач особо высокие требования предъявляются ко времени получения результата, а правильное отражение влияния геолого-технических условий измерений, по существу, требуется лишь для серийной аппаратуры. Поэтому “быстрое” моделирование, которое необходимо при обработке и интерпретации материалов радиоактивного каротажа, может опираться на банк данных, полученных в рамках создания интерпретационного обеспечения аппаратуры. Именно такой подход используется в программах первичной обработки и интерпретации данных РК.

Объединяющими элементами обоих направлений служат модели горной породы и геолого-технических условий проведения измерений, являющихся составными частями математической модели РК, которая кроме того включает:

- модель измерительной установки;
- модель переноса излучений и методы решения прямой задачи.

Традиционно для описания горных пород используется объемная модель, в которой предполагается, что горная порода представлена набором минералов и флюидов с известными объемными содержаниями. Такая модель является классической для радиоактивных методов каротажа. Структура породы для условий нефтегазовых скважин практически не влияет на показания РК и, при необходимости, ее исследование может быть проведено путем перевода структуры породы в описание структуры пласта. Геолого-техническая модель условий проведения измерений сводится к геометрическому описанию пластов, скважины и зоны проникновения, параметров промывочной жидкости, ее фильтрата, глинистой корки, давления и температуры в скважине и пластах. Такая модель породы и условий измерений в большинстве случаев позволяет адекватно описать реальные геолого-технические

условия проведения РК как в задачах разработки зондовых установок, так и в задачах интерпретации результатов каротажа.

Два последних элемента модели РК, необходимые при моделировании показаний зондовых установок, определяют степень соответствия результатов моделирования результатам измерений реальной скважинной аппаратурой в условиях, определенных моделью породы и моделью геолого-технических условий каротажа. Строгое обоснование этой части модели РК может быть получено только сопоставлением с результатами натурного моделирования.

Модель переноса излучения определяется алгоритмическим и постоянным обеспечением симулирования процессов взаимодействия излучения с веществом. Требуемые детальность и полнота процессов взаимодействия излучения с веществом в основном определяются задачей исследования, но зависят и от принятой модели скважинного прибора. Оценка достоверности константного обеспечения является самостоятельной задачей и может рассматриваться в отрыве от конкретной задачи моделирования РК. На практике контроль используемого константного обеспечения является постоянной задачей математического моделирования методом Монте-Карло. Выбор алгоритмического аппарата модели переноса излучения тесно связан с программной и алгоритмической организацией вычислительного процесса, которая определяется характером решаемой задачи, методами расчета оцениваемых величин, способами снижения погрешности.

Модель скважинного прибора существенно зависит от решаемой задачи (исследование влияния конструкции прибора либо геолого-технических условий измерений на показания аппаратуры) и может рассматриваться только совместно с ней. При выполнении математического эксперимента именно модель скважинного прибора, в конечном счете, определяет соответствие между расчетными и измеренными величинами.

Все перечисленные особенности и вопросы моделирования методом Монте-Карло задач РК приходилось и приходится решать как при использовании пакета программ DOS метода Монте-Карло, так и эксплуатируемого в настоящее время пакета программ MCNP5.

Рассмотрим один из примеров использования математического моделирования, который был связан с разработкой методического, метрологического и интерпретационного обеспечения аппаратуры

спектрометрического нейтронного гамма-каротажа (СНГК). Оценка массовых содержаний элементов горной породы по результатам СНГК выполняется путем разложения измеренного спектра на спектры отдельных элементов с выделением излучения скважины и прибора. Для проведения указанной процедуры необходимо создать набор эталонных спектров элементов для аппаратуры СНГК-89, минимальный список которых включает кальций, кремний, железо, титан, серу, хлор, водород, натрий и гадолиний. Натурные модели большинства из указанных элементов отсутствуют, а создание таких моделей требует немалых затрат. Кроме того, регистрируемый при натурном моделировании спектр включает излучение всех компонент модели (пласта, скважины, прибора), и выделение излучения пласта привносит дополнительные погрешности в получаемый эталонный спектр. Задача была решена математическим моделированием с использованием пакета программ MCNP5.

Использованная в этой работе модель переноса нейтронов учитывала упругое и неупругое рассеяние, а также радиационный захват нейтронов. Для моделирования рассеяния медленных нейтронов на атомах водорода использовалась $s(\alpha, \beta)$ -обработка, позволяющая учитывать эффекты химической связи в молекуле воды и тепловое движение атомов. Модель переноса гамма-излучения учитывала фотоэлектрическое поглощение с последующим розыгрышем флуоресцентных гамма-квантов, комптоновское рассеяние гамма-квантов, а также образование пар электрон–позитрон. Перенос электронов не моделировался, но гамма-излучение, индуцированное электронами, учитывалось по модели тормозного излучения в толстой мишени. На рис. 1 представлены спектры некоторых элементов, полученных математическим моделированием [5]. Качество эталонных спектров элементов тестировалось как путем разложения измеренных спектров с известным содержанием компонент на элементарные спектры элементов, так и путем сопоставления смоделированных показаний аппаратуры с измеренными спектрами в существующих моделях. Пример сопоставления приведен на рис. 2. Настройка модели зонда прибора СНГК-89, выбор библиотек и контроль качества используемого константного обеспечения в этой работе заняли значительное время. Кроме создания библиотек эталонных спектров, математическое моделирование СНГК позволило исследовать влияние условий измерений и на этой основе разработать методику и создать интер-

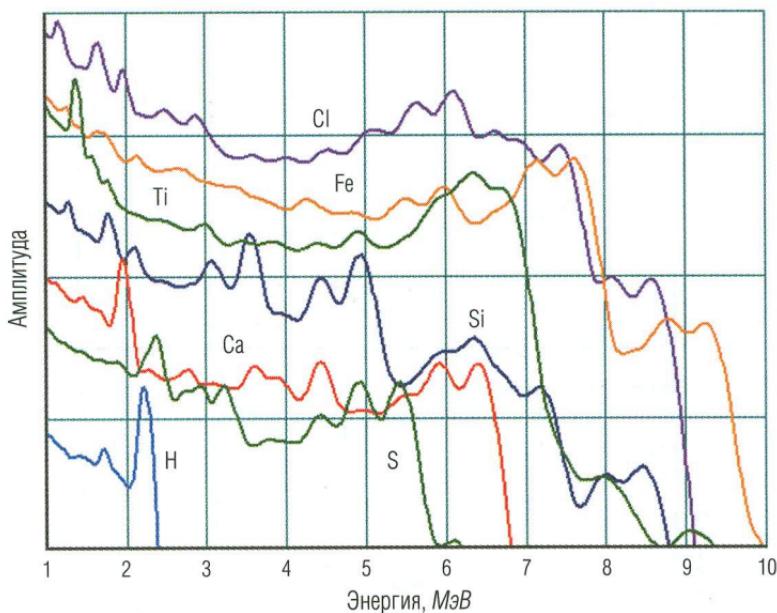


Рис. 1. Расчетные спектры элементов аппаратуры СНГК-89

претационное обеспечение обработки данных каротажа аппаратурой СНГК-89.

Еще одним примером использования аппарата математического моделирования стало исследование влияния галита на показания стационарных нейтронных методов каротажа. Задача возникла в связи с изучением коллекторов в условиях Восточной Сибири. Полученные ранее зависимости и поправочные коэффициенты для нейтронных методов касались только минерализации пластовых вод и промывочной жидкости [4, 6]. При этом влияние минерального состава породы, в том числе и галита, на результат определения пористости по нейтронному каротажу предполагалось линейным относительно объемного содержания всех минеральных компонент.

Математическое моделирование проводилось с использованием пакета программ MCNP5. Моделировались показания аппаратуры СРК-76, оснащенной зондами компенсированного нейтронного каротажа по тепловым нейтронам (2ННК-Т), компенсированного нейтронного каротажа по надтепловым нейтронам (2ННК-НТ) и нейтронного гамма-каротажа (НГК-60).

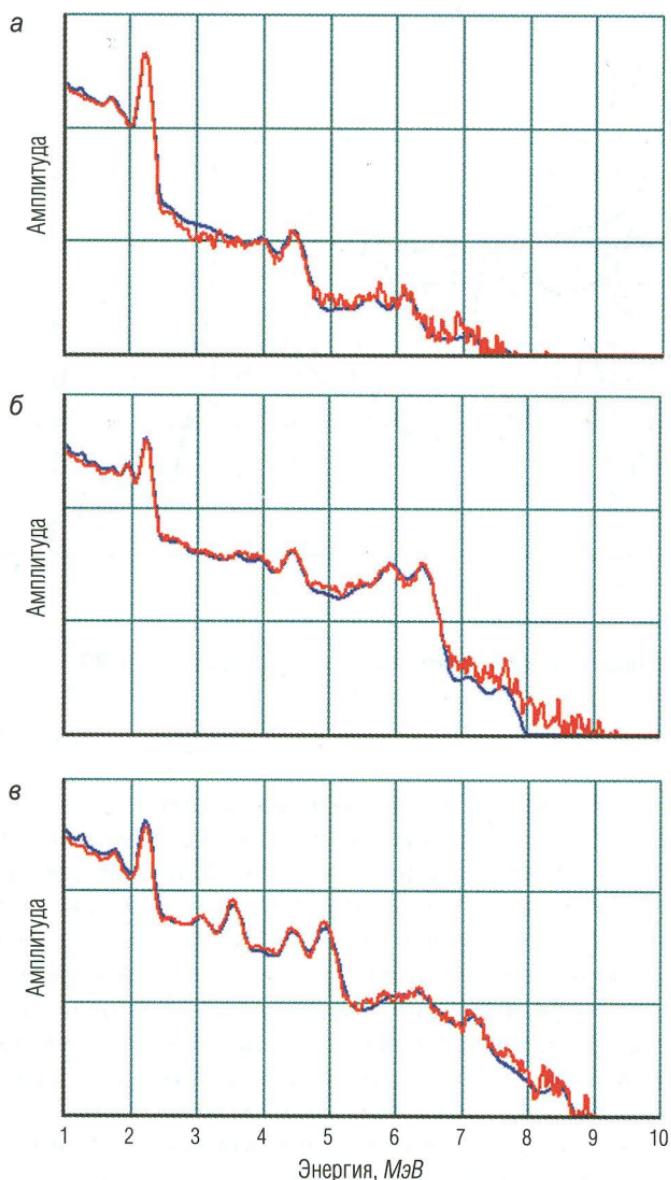


Рис. 2. Сопоставление измеренных и расчетных спектров:

а – бак с водой; *б* – водонасыщенный кальцит пористостью 0,8%, $D_c = 216$ мм; *в* – водонасыщенный кварцит пористостью 16,5%, $D_c = 216$ мм. Синий цвет – спектр математического моделирования, красный цвет – измеренный спектр

Настройка и контроль математической модели были выполнены по результатам измерений на натурных моделях пластов в метрологическом центре г. Раменское.

Результаты моделирования показаний аппаратуры СРК-76 с зондом 2ННК-Т существенно скорректировали наши представления о характере влияния осолонения горной породы на результат измерения [3], а именно:

- минерализация промывочной жидкости (после введения поправки за технические условия измерений в скважине) не оказывает заметного влияния на величину поправки $\Delta k_n = k_n(\text{НК}) - k_n$ за содержания галита в породе, где k_n – водонасыщенная пористость породы; $k_n(\text{НК})$ – измеренная пористость по нейтронному каротажу;
- поправка за влияние галита при постоянной водонасыщенной пористости породы не является линейной относительно его (галита) объемного содержания (рис. 3 и 4);
- величина поправки за содержание галита в породе зависит от минерализации пластового флюида, увеличение которой от 0 до 250 г/л NaCl приводит более чем к двукратному уменьшению поправки (рис. 3 и 4);
- существенное влияние на величину поправки оказывает литология пласта. Разница в величине поправки за осолонение породы галитом, обусловленная литологией, наиболее заметна при нулевой минерализации пластового флюида и уменьшается с ростом минерализации пласта (рис. 5–6).

Моделирование показаний зонда 2ННК-НТ аппаратуры СРК-76 позволило лишь уточнить величину самого влияния, подтвердив ранее известный характер влияния [6]:

- эффект влияния засолонения породы галитом на показания зонда 2ННК-НТ в основном обусловлен разницей минералогической плотности песчаника ($2,65 \text{ г}/\text{см}^3$), известняка ($2,71 \text{ г}/\text{см}^3$), доломита ($2,86 \text{ г}/\text{см}^3$), с одной стороны, и галита ($2,15 \text{ г}/\text{см}^3$), с другой. По этой причине величина поправки за влияние осолонения породы минимальна для песчаника и максимальна для доломита (рис. 7);
- изменение минерализации пласта не вносит существенных изменений в характер и величину поправки за присутствие галита в породе (рис. 8–9), величина которой (поправки) уменьшается с ростом минерализации пластового флюида;

- зависимость величины поправки от объемного содержания галита в породе практически линейна при условии постоянства водонасыщенной пористости (рис. 8–9).

Моделирование показаний зонда НГК-60 аппаратуры СРК-76 также позволило лишь уточнить характер и величину влияния осолонения породы галитом на результат измерений [6], а именно:

- наличие галита в породе приводит к завышению пористости, определяемой по показаниям НГК-60, в областях низких и средних значений водонасыщенной пористости. Величина завышения пористости не превышает 2% абс. в широком диапазоне содержания галита в породе (рис. 10);
- увеличение водонасыщенной пористости, равно как и содержания галита, приводит к изменению знака влияния (рис. 10). Величина занижения пористости может превышать 10% абс.;
- изменение знака влияния галита на показания зонда НГК-60 аппаратуры СРК-76 зависит от содержания галита в породе, смещаясь в сторону меньших значений водонасыщенной пористости с увеличением его содержания (рис. 10).

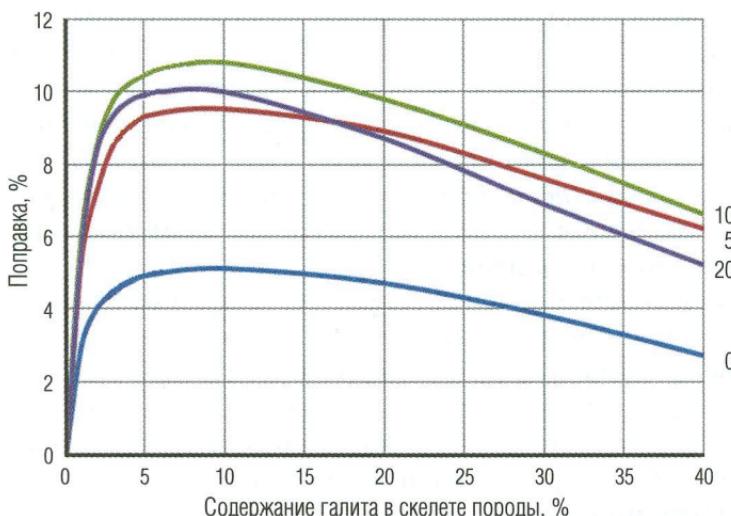


Рис. 3. Поправка $\Delta k_p(2\text{ННК-Т})$ за влияние осолонения пласта доломита галитом (аппаратура СРК-76, зонд 2ННК-Т): $D_c = 216 \text{ мм}$, $C_{\text{пл}} = 0 \text{ г/л} \text{ NaCl}$. Шифр кривых – водонасыщенная пористость

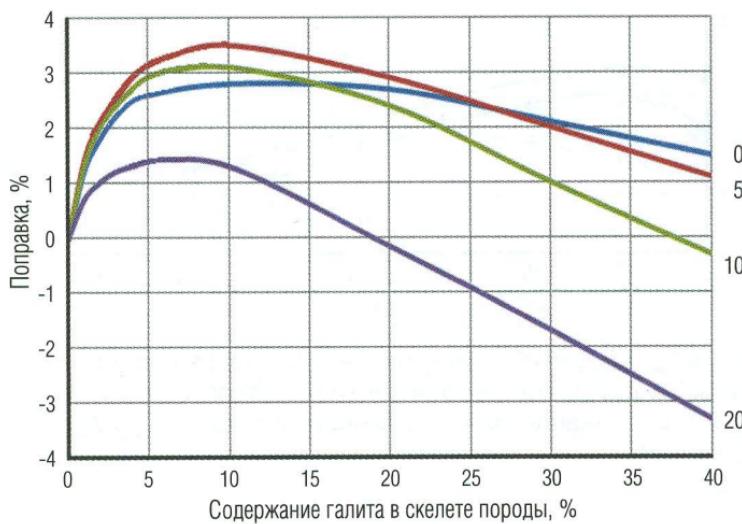


Рис. 4. Поправка Δk_n (2HHK-T) за влияние осолонения пласта доломита галитом (аппаратура СРК-76, зонд 2HHK-T): $D_c = 216 \text{ мм}$, $C_{\text{пл}} = 250 \text{ г/л} \text{ NaCl}$.
Шифр кривых – водонасыщенная пористость

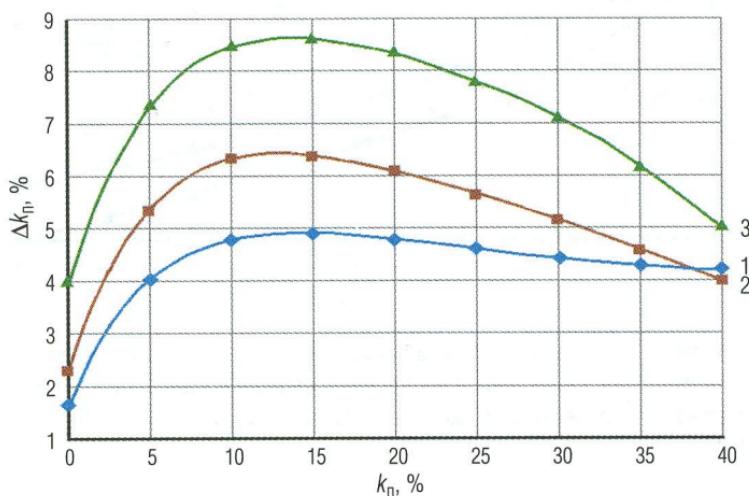


Рис. 5. Поправка Δk_n (2HHK-T) за влияние осолонения пласта известняка (1), песчаника (2) и доломита (3) галитом (аппаратура СРК-76, зонд 2HHK-T): $D_c = 216 \text{ мм}$, содержание галита в скелете породы $(V_{\text{NaCl}}/V_{\text{ск}}) \times 100 = 2\%$, $C_{\text{пл}} = 0 \text{ г/л} \text{ NaCl}$

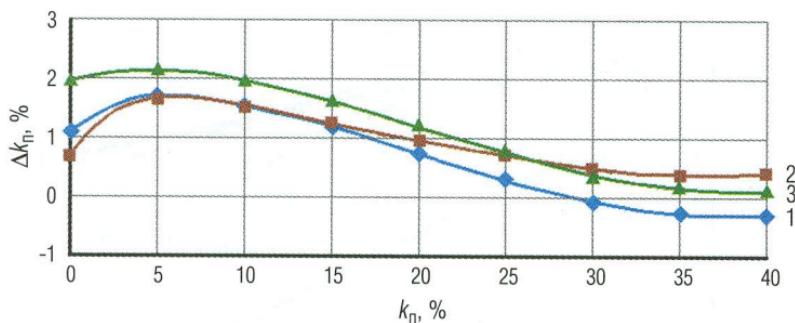


Рис. 6. Поправка Δk_n (2ННК-Т) за влияние осолонения пласта известняка (1), песчаника (2) и доломита (3) галитом (аппаратура СРК-76, зонд 2ННК-Т): $D_c = 216$ мм, содержание галита в скелете породы $(V_{\text{NaCl}}/V_{\text{ск}}) \times 100 = 2\%$, $C_{\text{пл}} = 250$ г/л NaCl

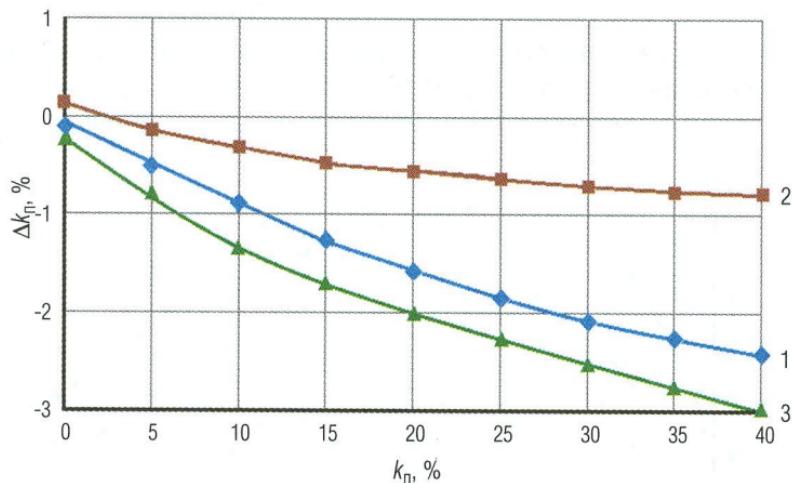


Рис. 7. Поправка Δk_n (2ННК-HT) за влияние осолонения пласта известняка (1), песчаника (2) и доломита (3) галитом (аппаратура СРК-76): $D_c = 216$ мм, содержание галита в скелете породы $(V_{\text{NaCl}}/V_{\text{ск}}) \times 100 = 10\%$, $C_{\text{пл}} = 250$ г/л NaCl

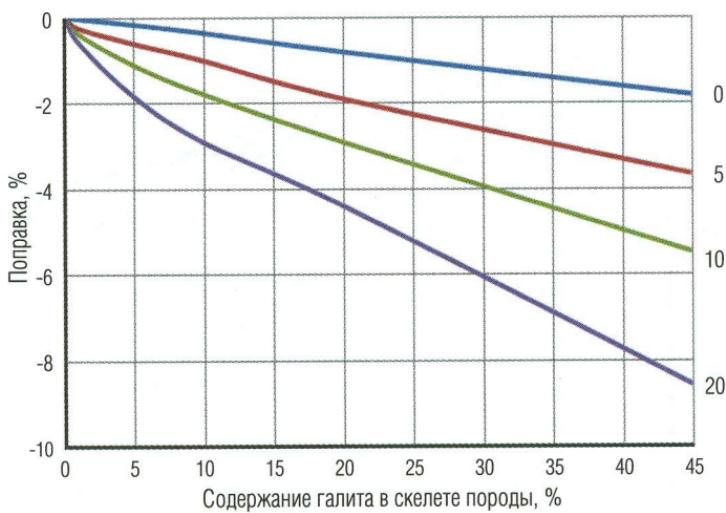


Рис. 8. Поправка Δk_n (2ННК-НТ) за влияние осолонения пласта доломита галитом (аппаратура СРК-76, зонд 2ННК-НТ): $D_c = 216$ мм, $C_{\text{пп}} = 0$ г/л NaCl.
Шифр кривых – водонасыщенная пористость

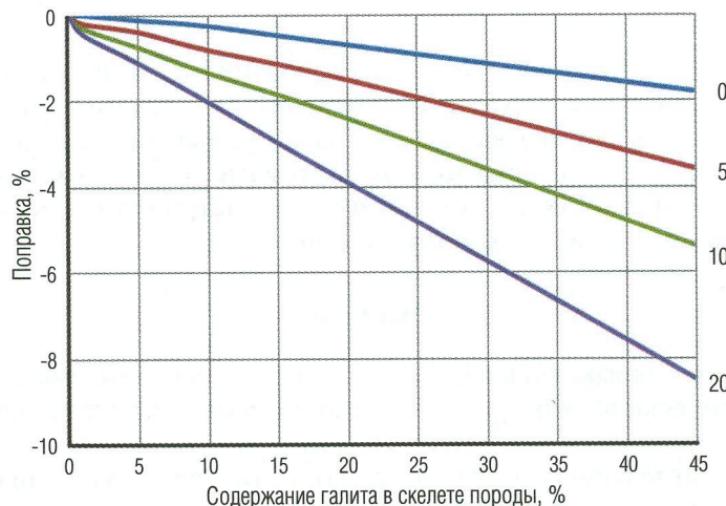


Рис. 9. Поправка Δk_n (2ННК-НТ) за влияние осолонения пласта доломита галитом (аппаратура СРК-76, зонд 2ННК-НТ): $D_c = 216$ мм, $C_{\text{пп}} = 250$ г/л NaCl.
Шифр кривых – водонасыщенная пористость

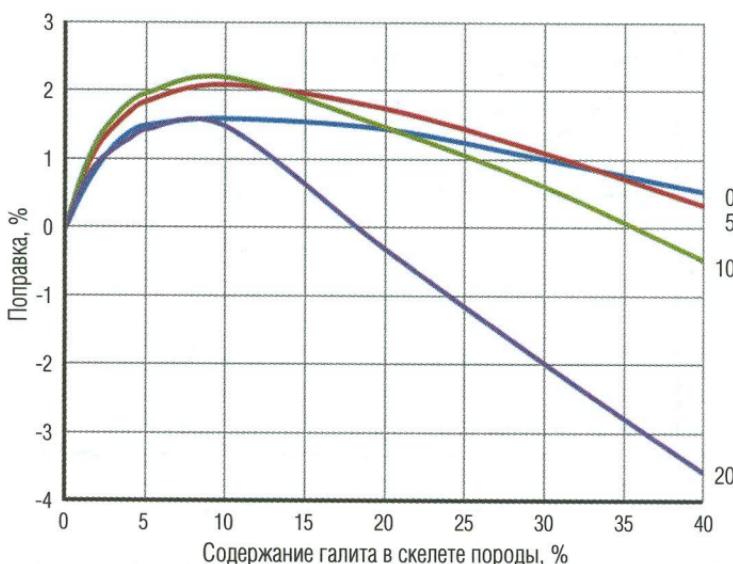


Рис. 10. Поправка Δk_n (НГК) за влияние осолонения пласта известняка галитом (аппаратура СРК-76, зонд НГК-60): $D_c = 216$ мм, $C_{пл} = 250$ г/л NaCl. Шифр кривых – водонасыщенная пористость

Очевидно, что проведенные исследования влияния осолонения пластов галитом на результаты измерений пористости аппаратурой нейтронного каротажа выполнить на натурных моделях в приемлемые сроки просто невозможно. Математическое моделирование при решении данной задачи фактически выступило единственным способом получения необходимых данных.

Выводы

1. Математическое моделирование является неотъемлемой частью практических разработок, выполняемых в отделе радиоактивного каротажа ООО “Нефтегазгеофизика”.
2. С использованием результатов математического моделирования за последние годы в отделе радиоактивного каротажа ООО “Нефтегазгеофизика” было выполнено следующее:
 - разработано интерпретационное обеспечение аппаратуры нейтронного каротажа СРК-43, СРК-76, АПРК-2, АПРК-5 [4];

- разработано методическое и интерпретационное обеспечение автономной аппаратуры плотностного гамма-гамма-каротажа АПРК-ГГК-102, АПРК-ГГК-90 [1];
 - осуществлена разработка зонда, метрологического и интерпретационного обеспечения аппаратуры спектрометрического нейтронного гамма-каротажа СНГК-89 [2, 5];
 - исследовано влияние осолонения породы галитом на показания аппаратуры стационарного нейтронного каротажа (НГК, ННК-Т, ННК-НТ) в условиях высокой минерализации пластовых вод и промывочной жидкости [3], а также решен ряд других задач.
3. С использованием базы расчетных данных создано программное обеспечение первичной обработки радиоактивных методов исследования скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велижсанин В. А., Волнухина А. А., Емельянов А. В. Математическое моделирование при разработке и обосновании интерпретационного обеспечения автономной аппаратуры плотностного гамма-гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 5 (170). С. 79–85.
2. Велижсанин В. А., Бубеев А. А., Лобода Н. Г. Способ и алгоритм обработки данных спектрометрического нейтронного гамма-каротажа, выполненного аппаратурой СНГК-89 // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 8 (206). С. 55–71.
3. Велижсанин В. А., Бубеев А. А., Лобода Н. Г., Мызников Ю. Г. Влияние галита на результаты определения пористости по данным нейтронного каротажа аппаратурой СРК-76 // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2012. Вып. 5 (215). С. 83–95.
4. Велижсанин В. А., Климок В. В., Лобода Н. Г., Точиленко Г. К. и др. Инструкция по проведению нейтронного и гамма-каротажа аппаратурой СРК-76 и обработка результатов измерений. МИ 41-17-1400-04. Тверь: ООО “Нефтегазгеофизика”, 2004. 54 с.
5. Лобода Н. Г., Велижсанин В. А., Бубеев А. А. Математическое моделирование спектрометрического нейтронного гамма-каротажа // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2010. Вып. 7 (196). С. 50–69.
6. Хаматдинов Р. Т., Еникеева Ф. Х., Велижсанин В. А. и др. Методические указания по проведению нейтронного и гамма-каротажа в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой СРК и обработке результатов измерений. Калинин: НПО “Союзпромгеофизика”, 1989. 81 с.