

55. Савельев В. С. Влияние грунтовых вод на устойчивость склонов и возведенных на них сооружений в районах распространения вечномерзлых грунтов // *Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера*. — 1989. — № 4.
56. Совершаев В. А. Роль штормовых нагонов редкой повторяемости в динамике морских берегов // *Природные основы берегозащиты*. — М.: Наука, 1987. — С.131—137.
57. Солнцева Н. Т. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. — М.: МГУ, 1998. — 365 с.
58. Соломатин В. И., Коняхин М. А., Николаев В. И., Михалев Д. В. Условия залегания и состав пластовых льдов на п-ове Ямал // *Материалы гляциологических исследований*. — М.: МГУ, 1993. — № 7.
59. Ставицкий Б. П., Дьяконов В. Д. О геотермическом режиме верхней части разреза района Широкого Приобья // *Вопросы геологии бурения и добычи в зоне мерзлых пород на нефтяных и газовых месторождениях Западной Сибири*. — Тюмень, 1968.
60. Суздальский О. В. О генезисе моренных суглинков и подстилающих их отложений на Севере Западной Сибири // *Тр. ин-та геологии Арктики*. — Л., 1974. — Вып. 3. — С. 27—33.
61. В. Т. Трофимов и др. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк). — М.: МГУ, 1975.
62. Трофимов В. Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. — М.: МГУ, 1977. — 300 с.
63. Трофимов В. Т., Баду Ю. Б., Дубиков Г. И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. — М.: Недра, 1980. — 240 с.
64. Уваркин Ю. Т. К истории развития термокарстовых образований в арктической тундре Западной Сибири // *Палеокриология в четвертичной стратиграфии и палеогеографии*. — М.: МГУ, 1973.
65. Фельдман Г. М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. — Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. — 370 с.
66. Фотиев С. М. Возможные изменения температурного поля криогенной области России при глобальном потеплении климата // *Криосфера Земли*. — 2000. — Т. 4, № 3. — С. 14—29.
67. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. — Пуццо: Изд-во ПНЦ РАН, 1998. — 515 с.
68. Цытович Н. А. Механика грунтов. — М.: Высшая школа, 1979. — 530 с.
69. Чеховский А. Л. О распространении многолетнемерзлых пород под шельфом Карского моря // *Геокриологические исследования при инженерных изысканиях: Тр. / ПНИИС*. — М., 1977. — Т. 18.
70. Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (п-ов Ямал) / Е. М. Чувиллин, В. С. Якушев, Е. В. Перлова, В. В. Кондаков. // *Докл. РАН*. — 1999. — Т. 369, № 4. — С. 522—524.
71. Экспериментальное изучение нефтяного загрязнения мерзлых пород / Е. М. Чувиллин, Е. С. Микляева, Е. В. Козлова, А. Инстанес // *Материалы Второй конф. геокриологов России*. — М.: МГУ, 2001. — Т. 1. — С. 163—169.
72. Комплексное исследование реологических и адгезионных свойств нефтей в диапазоне температур кристаллизации А. М. Шаммазов, С. Е. Кутуков, А. А. Арсентьев, Г. Х. Самигуллин, А. А. Шматков // *Нефть и газ*. — 1998. — № 4. — С. 63—72.
73. Шешина О. Н. Оценка экологической опасности от воздействия на поверхность криолитозоны при общем освоении Западной Сибири // *Материалы Второй конф. геокриологов России*. — М.: МГУ, 2001. — Т. 4. — С. 323—329.
74. Швецов П. Ф. Вводные главы к основам геокриологии // *Материалы к основам учения о мерзлых зонах земной коры*. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — Вып. 1.
75. Шполянская Н. А. Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития. — М.: МГУ, 1981. — 186 с.

УДК 622.276.031.011.43:53.082.79

ОСОБЕННОСТИ РАДИОИЗОТОПНОГО КОНТРОЛЯ НАСЫЩЕННОСТЕЙ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

Г.И. Чернышев, А.Я. Хавкин
(ИПНГ РАН)

В процессе постоянного совершенствования методов и устройств, используемых для лабораторного контроля насыщенности пористой среды флюидами как наиболее современные выделились радиометрические методы и установки неразрушающего контроля, дающие полное представление о распределении флюидов в моделях пласта, в том числе при пластовых условиях [1—8].

Радиационные методы исследований обеспечивают бесконтактный способ измерения фильтрационно-емкостных свойств пористой среды передвижным на-

Проведен анализ методик определения насыщенности физических моделей пористых сред с применением радиоизотопных меток. Предложен подход для повышения точности определения насыщенности при двухфазной фильтрации в цилиндрической модели двойного пласта за счет введения промежуточного прослоя с особыми свойствами.

ружным (по отношению к модели) детектором, на который не воздействуют внутренние физико-химические условия в модели пласта. Соответствующий подбор индикаторов (радиоактивных меток) позволяет сохранить условия фильтрации.

Интенсивность замеренного радиоактивного излучения прямо связана с насыщенностью модели пласта меченой жидкостью. Сканирование вдоль линейной модели позволяет получить картину распределения насыщенности. Несомненным достижением является создание ряда методик, дающих возможность одно-

значно переходить от замеров интенсивности радиоактивного излучения к значениям насыщенности модели пласта флюидами. При этом для однородной линейной модели пласта интерпретация результатов замеров осуществляется сравнительно просто, а для слоистых моделей пласта или многофазной фильтрации флюидов потребовалось разработать достаточно сложные системы обработки данных измерений [1, 2, 5, 8].

Успешность использования различных технологий повышения нефтеотдачи пластов во многом зависит от структурных особенностей подвергаемого воздействию объекта, в частности от макро- и микронеоднородности нефтесодержащих пластов. Это подтверждено лабораторными экспериментами, показавшими, что для неоднородных пористых сред характеристики процесса нефтевытеснения значительно отличаются от аналогичных характеристик для однородных моделей [9, 10].

Среди моделей неоднородного пласта наибольший интерес представляют двухслойные модели с гидродинамически полностью связанными или разделенными слоями, имеющими различную конфигурацию и проницаемость [8—10].

Критический анализ метрологических особенностей многослойных моделей показал, что точность замеров на них недостаточна. Главным образом это объясняется тем, что в случае близких физических характеристик слоев многослойной модели при раздельном измерении радиометрическим методом насыщенности по слоям возникают значительные погрешности.

Кроме того, в таких моделях недостаточно отражена реально имеющая место в природе переменная по простиранию пород гидродинамическая связь нефтесодержащих пластов за счет непроницаемых и полупроницаемых прослоев.

Авторами была поставлена задача существенно усовершенствовать модельно-методический комплекс для цилиндрической слоистой модели пласта и радиометрический метод раздельного определения насыщенности ее слоев флюидами. Кардинально решить поставленную задачу удалось за счет введения в такую модель третьего промежуточного прослоя, обладающего аномальными радиационными и переменными гидродинамическими характеристиками. Это вполне соответствует реальной структуре нефтяных пластов, включающих в себя и относительно тонкие частично или полностью непроницаемые пропластки.

Особенности радиометрического метода определения насыщенности пористой среды флюидами следующие.

На модели пласта можно производить радиометрические измерения, используя лишь источник ионизирующего излучения и его детектор. Наиболее подходящим видом радиоактивного (ионизирующего) излучения для этого случая является гамма-(рентгеновское)излучение. Отсчеты, фиксируемые

детектором в разных точках модели пласта, прямо связаны с соотношением фаз флюидов. Вместе с тем на реальных линейных моделях пласта регистрируемый эффект при наиболее полном вытеснении нефти водой и даже газом невелик (около 10 % изменения величины отсчетов). Поэтому в данном способе используются специальные методические приемы. Наиболее удачными из них являются применение радиоактивного йода-131 как индикатора-излучателя, вводимого либо в воду, либо в нефть (в последнем случае в виде соединения йод—бензол), либо применение нерадиоактивного йода как индикатора-поглотителя, вводимого преимущественно в воду [1, 2]. При использовании этих приемов удается обеспечить погрешность в определении насыщенности среды флюидами пористой линейной модели в любой точке измерения до 1...2 %.

Особый интерес представляют эксперименты с радиометрическим определением насыщенности на двухслойных моделях пласта. В этом случае погрешность возрастает, что определяется взаимным радиационным влиянием слоев модели и необходимостью осуществления дополнительных преобразований с измеряемыми величинами [8].

Критический анализ используемой для таких экспериментов технической базы, методических приемов и приемов расчета показал, что далеко не все возможности, предоставляемые физической сущностью радиометрического метода, были ранее использованы для его совершенствования.

Конкретно были рассмотрены два случая геометрии измерений на двухслойной модели.

В первом случае из общего потока радиоактивного излучения от двух его слоев с помощью коллиматора выделяется и детектируется узкий пучок (геометрия I). Это обеспечивает достаточно высокое отличие излучений, регистрируемых от слоев модели, в 5,5 раза (при насыщении радиоактивным индикатором только одного из слоев). Однако при неравномерном распределении индикатора в модели (что практически всегда имеет место) достоверность таких замеров низкая, так как количество индикатора в зоне узкого пучка излучения может заметно отличаться от среднего количества в данном поперечном сечении модели.

С учетом этих данных для практики более важен второй случай геометрии (геометрия II) излучения, при котором фиксируется излучение, поступающее из достаточно представительного элемента пористой среды двухслойной модели пласта. При этом варианте метрологические характеристики модели резко ухудшаются.

Для обоснованного выбора возможного способа повышения измерительных характеристик системы слоистая модель—радиометрический блок были выполнены расчеты для двух охарактеризованных выше геометрий измерения, результаты которых представлены в таблице.

Сравнительные характеристики двухслойных моделей пласта

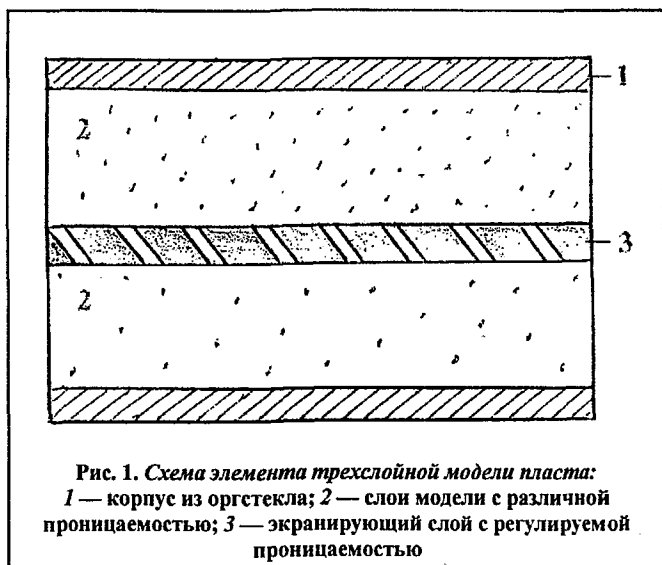
Наружные ($d_{нар.}$) и внутренние ($d_{вн.}$) диаметры двухслойных моделей, $d_{нар.}/d_{вн.}$, мм	Коэффициент K		Относительное качество моделей	
	Геометрия I	Геометрия II	Геометрия I	Геометрия II
80/60	4,85	1,25	0,88	0,96
100/80	5,5	1,3	1	1
140/120	6,25	1,35	1,14	1,04
180/120	6,78	1,5	1,23	1,15
220/200	7,18	1,6	1,3	1,23
260/240	7,36	1,7	1,31	1,3
300/280	7,8	1,9	1,42	1,4

Качество моделей оценивалось как отношение коэффициентов K (коэффициент ослабления излучения слоем модели) для модели, имеющей длину 1 м, наружный диаметр 0,1 м, внутренний диаметр 0,08 м.

В таблице показано, что добиться значительного увеличения дифференциации отсчетов от слоев слоистой модели за счет увеличения ее диаметра при приемлемой геометрии измерений (геометрия II) практически невозможно.

Метрологические характеристики двухслойной модели резко улучшаются при введении в нее тонкого промежуточного прослоя с аномальными радиационными характеристиками (высоким коэффициентом ослабления радиоактивного излучения). Схема элемента такой модели изображена на рис. 1. Ее особенность состоит в том, что средний прослой 3 выполняется с множеством наклонных (например, под углом 45°) отверстий, частота которых определяет степень гидродинамической связи остальных слоев модели.

На базе изложенных выше предложений разработана конструкция двухслойной модели пласта с корпусом, изготавливаемым из оргстекла с внутренним диаметром 60 мм, в которой коэффициент K повышен



до 6...8. Для модели с таким внутренним диаметром при стандартном исполнении коэффициент $K = 1,25$ (см. таблицу).

Основные уравнения (метка—радиоактивный йод-131) для расчета насыщенности каждого из слоев двухслойной модели, не имеющей экранирующего слоя, имеют вид:

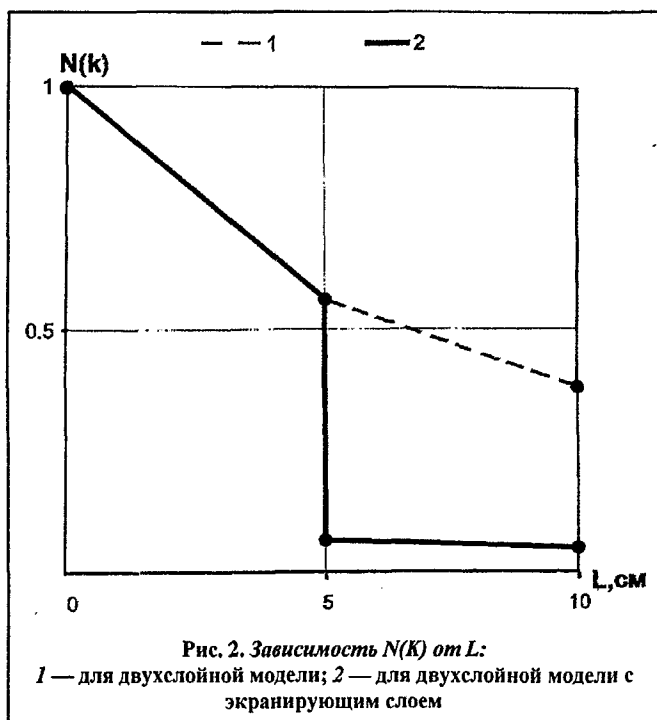
$$I_1 = N_1 - KN_2; \quad I_2 = N_2 - KN_1,$$

где I_1 и I_2 — истинные отсчеты от слоев модели, прямо пропорциональные насыщенности их меченым флюидом;

N_1 и N_2 — замеренные отсчеты со стороны каждого слоя модели.

Для традиционной двухслойной модели пласта [9, 10] эти уравнения имеют лишь ограниченное применение. При их использовании подразумевается, что коэффициент ослабления излучения одинаков для обоих слоев. При этом предусматривается их геометрическая тождественность. В них использован коэффициент K , интегрально характеризующий ослабление излучения слоем модели. При этом не учитывается степень изменения K вдоль слоя. Хотя датчик наиболее сильно облучает поверхностный слой порового пространства модели, значительная часть радиоактивного излучения приходит из внутренних (по отношению к датчику) зон ее порового пространства. С учетом этого и принимая во внимание малое по амплитуде изменение K для всего поперечного сечения двухслойной модели, брать его полное значение, соответствующее всему слою, можно лишь в первом, весьма относительном, приближении.

На рис. 2 приводится зависимость (кривая 1), связывающая величину отсчета N (в относительных единицах) с местоположением дискретного (точечного) источника излучения (йод-131), перемещаемого вдоль



поперечного сечения двухслойной модели по ее диаметру, численно равному 10 см. Считается, что датчик, регистрирующий отсчет, находится в точке начала координат. Очевидно, что $N = K$ для зависимости I на рис. 2. Положение границы между гидродинамически полностью связанными слоями модели соответствует точке $L = 5$ см.

При равномерном насыщении ближнего к датчику слоя модели меченым флюидом полный регистрируемый отсчет соответствует площади под ломаной линией I от $L = 0$ до $L = 5$, при этом K изменяется от 1 до 0,53. Для удаленного слоя эта площадь ограничена линией I от $L = 5$ до $L = 10$ и K изменяется от 0,53 до 0,38. Более обосновано в расчетах насыщенности брать средние значения K для каждого слоя модели, тогда исходное уравнение примет вид:

$$N' = 0,8 I_1 + 0,45 I_2.$$

Так как N' фиксируется в условных единицах, например в импульсах в минуту, и зависит от конкретных аппаратных характеристик, можно привести данное уравнение к упрощенному виду:

$$\frac{N'}{0,8} = N = I_1 + \frac{0,45}{0,8} I_2, \text{ откуда } N = I_1 + 0,56 I_2.$$

Таким образом, в традиционной двухслойной модели интенсивность излучения от противоположного датчику слоя соизмерима с интенсивностью излучения от прилежащего слоя, что вносит заметную дополнительную ошибку в регистрируемую величину последней.

Действительно, стандартное отклонение для отсчета 10 000 импульсов от прилежащего к датчику слоя модели:

$$D_1 = \sqrt{10000 \text{ имп}} = \pm 100 \text{ имп},$$

а для противоположного:

$$D_2 = \sqrt{0,56 \cdot 10000 \text{ имп}} = \pm 75 \text{ имп}.$$

Следовательно, в данной модели пласта погрешности из-за взаимного радиационного влияния слоев значительно возрастают, что отрицательно сказывается на достоверной фиксации перетоков из одного слоя модели в другой.

Оценки показывают, что достоверность фиксации значения насыщенности в зоне перетока в слое, в который происходит переток, может достигать 30...40 % порового объема этого слоя, что характеризует результаты такого фильтрационного эксперимента скорее как качественные, чем как количественные.

Введение в слоистую модель пласта третьего, экранирующего, слоя, расположенного между двумя основными полуцилиндрическими ее слоями ($L = 5$ на рис. 2), кардинально улучшает метрологические характеристики слоистой модели пласта и расширяет методические возможности выполняемых на ней фильтрационных экспериментов.

Этим конструктивным усовершенствованием создаются предпосылки для реализации более точной

системы расчетов насыщенности меченым флюидом йод-131 каждого из двух слоев такой модели.

Вследствие радиационного эффекта от экранирующего слоя для такой модели резко (до 10 раз, см. рис. 2) уменьшается отсчет от противоположного по отношению к датчику слоя:

$$D_2 = \sqrt{0,056 \cdot 10000 \text{ имп}} = \pm 24 \text{ имп}.$$

Резкое уменьшение погрешности измерений создает благоприятные условия для регистрации перетоков через регулируемую перфорацию среднего экранирующего слоя. Действительно, переток, заполняющий 12,5 % порового пространства прилежащего к датчику слоя, создает радиационный эффект, равный эффекту от всего противоположного слоя при полном заполнении его порового пространства меченым флюидом.

Для слоистой модели пласта с экранирующим слоем (кривая 2 на рис. 2) уточненное основное уравнение принимает вид:

$$N = I_1 + \frac{0,056}{0,8} I_2 = I_1 + 0,07 I_2 \text{ и}$$

$$D_3 = \sqrt{10000 \cdot 0,07} = \pm 26 \text{ имп}.$$

Расчетные уравнения для трехслойной модели, приведенной на рис. 1, имеют вид:

$$I_1 = N_1 - 0,07 I_2;$$

$$I_2 = N_2 - 0,07 I_1.$$

Таким образом, коэффициент K при I_1 , определяющем искомую насыщенность, в 14 раз больше, чем при I_2 , определяющем погрешность от негативного радиационного влияния удаленного слоя модели. Поэтому изменение K для этого слоя модели существенно не влияет на погрешность определения насыщенности.

Более того, неизбежные трудности возникают при экспериментальном определении действительной зависимости вида 1 на рис. 2 для данной конкретной модели. В случае наличия в модели экранирующего слоя в расчетных уравнениях фактически используют $K = K_{\text{слоя}} \cdot K_{\text{экр. слоя}}$, где $K_{\text{экр. слоя}}$ — коэффициент ослабления радиоактивного излучения йода-131 экранирующим слоем, $K_{\text{слоя}}$ — коэффициент ослабления радиоактивного излучения самим слоем модели. Экспериментальное определение величины $K_{\text{экр. слоя}}$ трудностей не вызывает. Погрешность при таком определении может быть сделана сколь угодно малой. При этом ориентировочный учет ослабления радиоактивного излучения телом модели пласта (ее слоем) может дать меньшую ошибку, чем неточное экспериментальное определение этого фактора (при отсутствии экранирующего слоя).

В заключение отметим, что методические возможности фильтрационных исследований на двухслойной модели пласта с экранирующим слоем значительно расширяются за счет возможности использования третьего слоя с заранее заданной, в том числе и с переменной, проницаемостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1220472 СССР, МКИ G 01 V 5/04. Способ определения насыщенности пористой среды флюидами / Г.И. Чернышев, П.И. Забродин, Я.А. Пруслин. — Приоритет от 27.03.1984.
2. А. с. 1222 066 СССР. Устройство для радиометрии / П.И. Забродин, Я.А. Пруслин, Г.И. Чернышев. — Приоритет от 16.05.1984.
3. Oak M.J., Eprlich R. A new x-ray absorption for measurement of three-phase relative permeability // 60-th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE. Las Vegas. September 22—25 1985.
4. Lien J.R., Graue A., Koillveit A. A nuclear imaging technique for studying multiphase flow in a porous medium at oil reservoir conditions // Nuclear instruments and methods in Physics research (1988) North-Holland, Amsterdam.
5. А. с. 1626910 СССР, МКИ G 01 V 5/04. Способ определения насыщенности пористой среды флюидами / Г.И. Чернышев, П.И. Забродин. — Приоритет от 16.02.1989.
6. Пат. 2077672 РФ, МКИ E 21 B 47/00, G 01 N 23/12. Устройство для исследования процесса фильтрации жидкости в пористой среде / А.Я. Хавкин, Г.И. Чернышев, В.Н. Ходаков. — Приоритет от 19.08.1994. 20.04.97. // Бюл. № 11.
7. Хавкин А.Я., Чернышев Г.И., Ходаков В.П. Установка визуализации движения флюидов при моделировании процессов вытеснения нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — М.: ВНИИОЭНГ, 1994. — Вып 8. — С. 4—6.
8. Хавкин А.Я., Чернышев Г.И., Забродин П.И. Разработка методики радиоизотопных исследований многофазной фильтрации на объемных моделях нефтяного пласта // Нефтепромысловое дело. — М.: ВНИИОЭНГ, 1993. — Вып. 1. — С. 14—17.
9. Применение углекислого газа в добыче нефти / В. Балитт, А. Бан, Ш. Долешал и др. — М.: Недра, 1977. — С. 79—83.
10. Работы ВНИИ по применению радиоактивных излучений для лабораторных и промысловых исследований / П.И. Забродин, В.Н. Павлов, Я.А. Пруслин, Г.И. Чернышев // Тр. ВНИИ. — Недра, 1970. — Вып LIII. — С. 100—16.