

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ НЕФТЕНОСНУЮ ПОРОДУ

УДК 621.386+550.8

Е. И. Пальчиков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск

Цель данной работы — выяснение возможности создания простой рентгеновской методики для наблюдения за формой и положением границ жидкости внутри слабопористой плотной среды (нефтеносного песчаника) на стадии пропитки. Объем пор составляет $10 \div 15\%$ от объема образца. Вклад жидкости (воды или нефти) дает малозаметное изменение плотности. Близость атомных масс компонентов воды (O^{16}, H^1) и нефти (C^{12}, H^1), их стехиометрии (H_2O и $(CH_2)_n$) еще более затрудняют задачу наблюдения границ раздела вода — нефть на фоне слоя породы.

Проведенная в [1] компьютерная томография образцов нефтеносной породы слишком сложна для использования в рядовой исследовательской лаборатории. Методика, предложенная в [2], обладает рядом недостатков: пренебрегается изменением спектра излучения от пройденной в материале дистанции, для обработки изображения требуется составление специальных программ, на точность измерений оказывает влияние неидеальность характеристической кривой рентгеновской пленки. В [1, 2] исследуются уже пропитанные жидкостью образцы.

Задача изучения механизма пропитки сухого образца водой и нефтью возникла как часть работы, необходимой при подготовке образцов для изучения динамики вытеснения нефти водой из нефтеносной породы.

Представлялось интересным найти из экспериментов ответы на следующие вопросы.

1. Какие силы являются определяющими в процессе пропитки натурального образца размером ~ 30 мм — капиллярные или гравитационные?
2. Чем закончится конкуренция между водой и нефтью при зеркально-симметричных граничных условиях, когда пропитка идет одновременно с двух противоположных концов образца? Где они встретятся и какова будет форма границы?
3. С какой скоростью проходит процесс пропитки и как быстро устанавливаются равновесные условия?
4. Какой размер пор, определяющих скорость пропитки?

Описание эксперимента. Для эксперимента использовался очищенный высушенный образец песчаника длиной 30,7 мм и диаметром 29 мм, взятый из скважины № 838 Мортмыя-Тетеревского месторождения. Образец с лабораторным номером 1179-85 был предоставлен АО «ЛУКОЙЛ — Урайнефтегаз». Его параметры следующие: интервал отбора 1586 \div 1592 м, вынос керна 4,5 м, место взятия от верха 3,1 м, открытая пористость 15,7%, плотность породы 2,26 г/см³, газопроницаемость 0,0028 мкм². Нефть и спутная вода брались из этого же месторождения. Образец 1 с помощью силиконового герметика 4 был вклеен в лодочку 5 из тонкой алюминиевой фольги, как показано на рис. 1, а.

Между боковой поверхностью образца и стенкой лодочки был оставлен зазор b порядка 0,2 мм для беспрепятственного выхода воздуха из объема породы в начальной стадии эксперимента. Нефть 2 и вода 3 наливались с разных сторон одновременно на высоту, примерно равную половине диаметра образца. Торец специально оставлялся смоченным только частично, чтобы наблюдать продвижение жидкости вверх за счет капиллярных

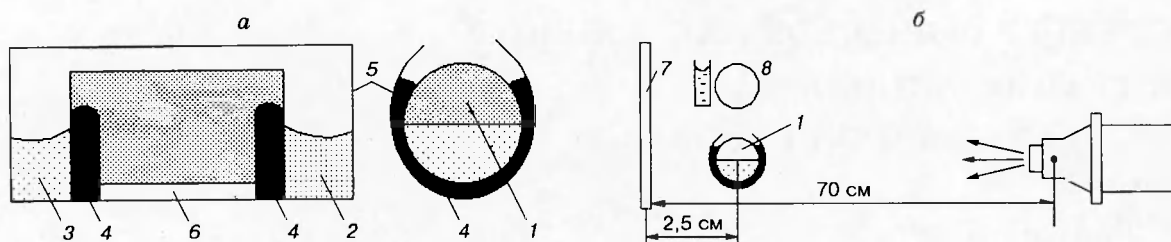


Рис. 1

сил. Для улучшения контраста в дистиллированную воду добавлялось рентгеноконтрастное вещество KI до концентрации 0,1 моль раствора. Предполагалось, что это не должно принципиально изменить взаимодействие воды с породой, так как реально в спутной воде присутствуют растворы галогенидов щелочных металлов. Рентгеноконтрастные вещества в нефть не добавлялись специально для того, чтобы не уменьшать контраст границы нефть — вода внутри образца породы.

Источником излучения служил импульсный частотный рентгеновский аппарат собственного изготовления с максимальным напряжением на трубке 150 кВ и эффективной энергией излучаемых квантов 75 кэВ. Конструкция и принцип действия аппарата аналогичны описанным в [3].

Фокус рентгеновской трубки помещался на расстоянии 70 см от пленки, центр образца — на расстоянии 2,5 см от пленки. На рис. 1,б показана схема размещения блоков установки. Для регистрации рентгенограмм использовалась пленка РКМ 7 без усиливающих экранов. Выбиралась экспозиция, достаточная для выхода на линейный участок экспозиционной кривой с коэффициентом контрастности $\gamma = 3 \div 4$, при котором лучшим образом реализуется фотографическая широта рентгеновской пленки. Доза контролировалась дозиметром ДК-02 и составляла 0,83 Р на расстоянии 70 см от фокуса. Пленка обрабатывалась в проявителе «Рентген-2» в течение 7 мин. Для упрощения дальнейшей цифровой обработки обращалось особое внимание на постоянство времени проявления (точность 30 с) и температуры проявителя ($\pm 0,5$ °С).

Оцифровка изображения. Изображения с полученных негативов вводились на просвет сканером фирмы «Кора», построенным на основе кремниевой линейки фотодиодов ЛФ1024-25/1 производства НПО «Восток» (г. Новосибирск). Для ввода изображений на просвет был самостоятельно изготовлен осветитель с равномерным полем засветки, состоящий из восьми рядов люминесцентных ламп и матового рассеивателя, отодвинутого от плоскости резкого изображения негатива на расстояние ~ 10 мм. С помощью объектива изображение проектировалось на линейку из 1024 фотоприемников, которая перемещалась в поперечном направлении шаговым двигателем. Масштаб и пространственное разрешение вводимого изображения регулировались изменением расстояния от объектива до негатива и установкой удлинительных колец.

Диапазон почернений, передаваемый рентгеновской пленкой, во много раз превосходит стандартный 8-битовый диапазон, использующийся в IBM-совместимых компьютерах для серых полутоновых форматов изображения. Чтобы не терять имеющуюся на рентгенограмме информацию, при вводе изображений аппаратно-программными средствами сканера производилось сжатие динамического диапазона γ -коррекцией с показателем $\gamma = -4$. С учетом собственного коэффициента контрастности пленки РКМ ($\gamma \approx 4$) такое преобразование одновременно линейаризовывало передаточную функцию получаемого изображения, облегчая последующую количественную обработку яркостного сигнала. В результате оцифровки все рентгенограммы переводились в файлы tiff-формата, и вся дальнейшая работа проводилась с ними.

Обработка оцифрованных изображений. Координаты и яркость точек на снимке измерялись с помощью пакета Aldus PhotoStyler в среде Windows. Пространственное разрешение в 11 пикселей на 1 мм позволяло измерять расстояния на рентгенограмме с точностью не хуже $\pm 0,05$ мм.

Перед количественным определением положения и формы фронта жидкости в образце для снижения шума зерен пленки проводилось медианное усреднение с размером ячейки 3×3 . С учетом размера фокуса рентгеновского источника и дистанций пленка-образец и пленка-фокус это практически не ухудшало пространственного разрешения снимка.

В связи с явной неточностью простой экспоненциальной модели для закона поглощения полихроматического рентгеновского излучения в данной работе применялась методика, в которой для измерения толщины слоя жидкости использовался калибровочный клин 8 из исследуемых материалов, снимаемый одновременно рядом на ту же пленку (клиновидный сосуд с водой, наложенный вдоль оси на сухой образец породы (рис. 1,б)). Стенки клиновидного сосуда изготавливались из той же фольги, что и лодочка, в которую вклеивался пропитываемый образец. Для узкого продольного фрагмента изображения клина с помощью преобразований «Gray Color Map», γ -коррекции, подстройки яркости и контрастности гистограмма распределения пикселей по яркости преобразовывалась в линейную. Затем подобранные преобразования применялись ко всему изображению. Это позволяло в дальнейшем сопоставлять яркость изображения вдоль оси образца и концентрацию воды с помощью простой линейной калибровочной функции.

Для наблюдения формы фронта жидкости на экране монитора после линеаризации и калибровки применялась постеризация (обработка полутоновой картины ступенчатой передаточной функцией) с количеством ступеней от 4 до 16. С помощью процедуры нахождения контуров получалась картина изофот, которая в виде твердой копии выводилась на бумагу.

В случае необходимости исключить из рассмотрения влияние плотности материала и формы образца породы на стадии полутоновой обработки из исследуемого снимка вычиталось исходное изображение образца породы, полученное до начала пропитки.

Для построения графиков распределения воды вдоль образца от координаты из всего tiff-файла использовались данные одной строки, проходящей через центр образца вдоль его оси.

Обсуждение полученных результатов. Экспериментальные данные представлены в виде полутоновых снимков 0–10 на рис. 2, а в количественном виде — в таблице и на рис. 3–5. Снимок 0 — статический кадр перед началом эксперимента. На каждом из последующих снимков вода находится слева от образца, а нефть — справа. Из снимков 1–3, сделанных через 3,5; 9,5; 19,5 мин, видно, что в течение первых 20 мин вода быстрее

Номер снимка (рис. 2)	Время съемки, мин	Положение фронта по основанию	Положение фронта по полувысоте	Ширина фронта по полувысоте	Расход воды, мл
		мм			
1	3,5	6,10	4,33	1,77	0,20
2	9,5	8,31	6,54	1,77	0,31
3	19,5	11,32	8,93	2,39	0,45
4	30	13,35	10,52	2,83	0,49
5	60	17,07	12,65	4,42	0,67
6	120	19,19	13,62	5,57	0,91
7	240	22,38	15,92	6,46	0,91
8	720	27,68	19,90	7,78	1,20
9	1510	30,6	22,11	8,49	1,25
10	1520	30,6	22,11	8,49	1,25

Примечание. Длина образца 30,6 мм (346 пикселей), диаметр 29,0 мм, шум 8 пикселей ($\pm 0,35$ мм).

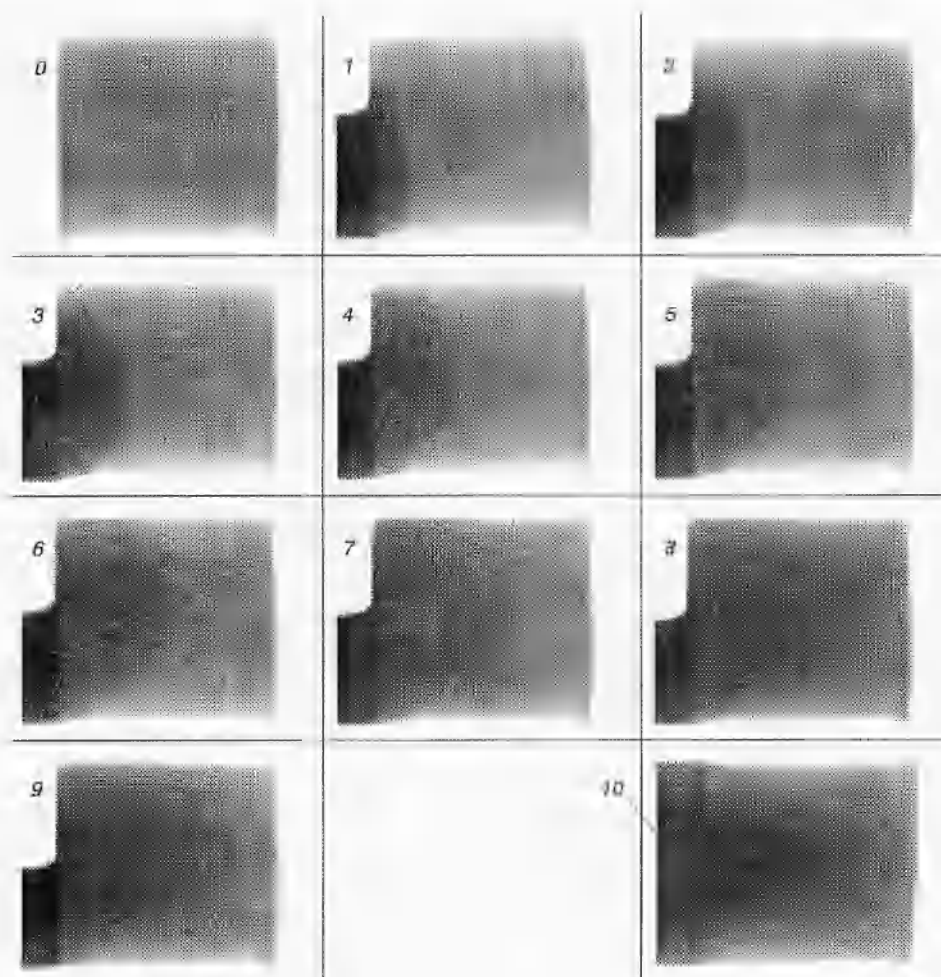


Рис. 2

всего проникает вглубь в нижней части образца, пройдя за 3,5 мин расстояние ≈ 5 мм и за 20 мин ≈ 10 мм, т. е. около трети длины образца. Такое опережение, скорее всего, связано с гравитационным перепадом давлений. Через 30 мин (снимок 4) внизу и слева на расстоянии 4,7 мм от торца образца на границе жидкости появляется уступ, который, по-видимому, связан с нефтью, быстро проникшей через щель между образцом и лодочкой и пропитавшей низ и бока образца. То, что нефть быстро проникла в эту щель, было видно как визуальное на образце, так и по быстрому спаду уровня нефти (расход 0,63 мл) в первые 10 мин и медленному (расход 0,064 мл) в следующие 10 мин.

Смочив поверхность снизу и с боков по образующей цилиндрического образца, нефть стала заходить вглубь, препятствуя здесь проникновению воды. Получившийся уступ сохраняется в дальнейшем неизменным в течение суток, т. е. на всех дальнейших снимках. По-видимому, появление нефти внизу и почти полное смачивание всего левого торца образца водой, поднявшейся за счет капиллярных сил, приводят к тому, что фронт воды через 30 мин более всего продвинут вглубь уже не внизу, а в центре образца (снимок 4). Выход воды за счет капиллярных сил на образующую цилиндра вверху на некоторое время резко меняет граничные условия, и через 60 мин (снимок 5) фронт воды уже наиболее продвинут вглубь в верхней и средней части образца. Именно в этот момент (60 мин) фронт воды доходит до середины образца (15,6 мм) и должен был бы встретиться с фронтом нефти, если бы она вела себя симметрично. Но визуальное этого не заметно. Через 2 ч (снимок 6) фронт воды продвигается дальше уже по центру образца на 19,3 мм, через 4 ч — на 24 мм, через 12 ч — на 26,5 мм и в интервале 12 ÷ 25 ч достигает дальнего конца образца, становясь

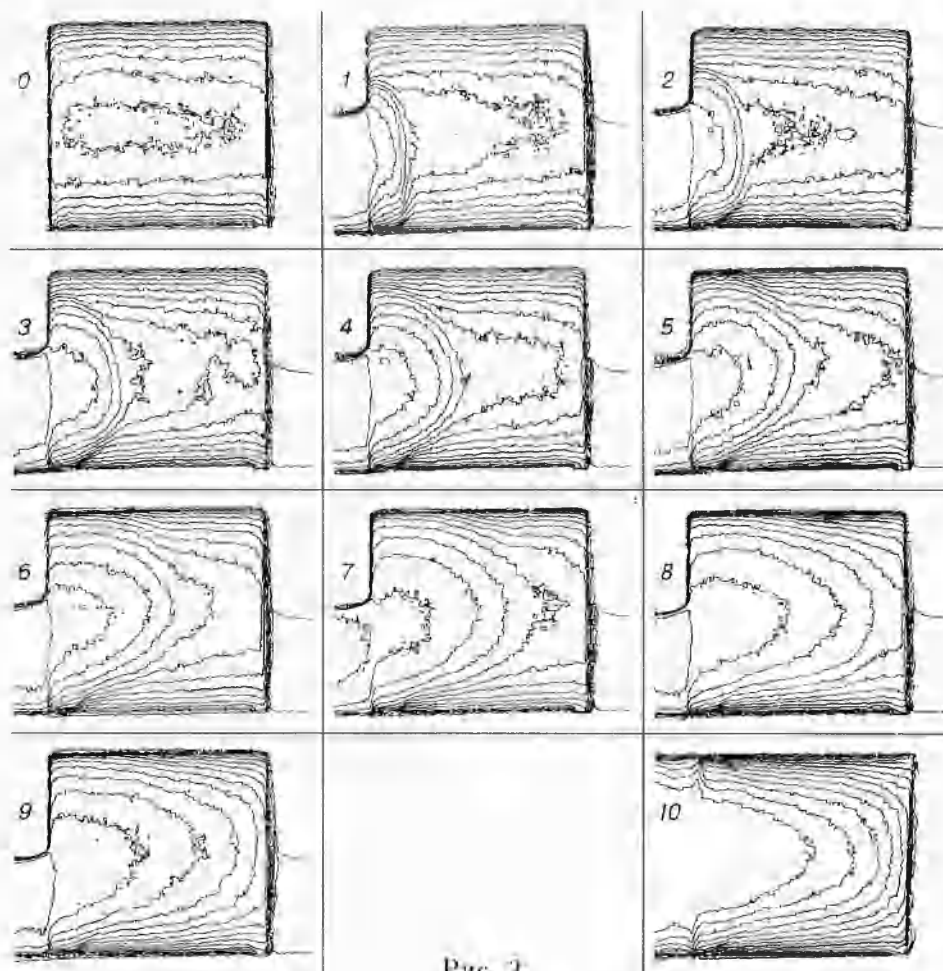


Рис. 3

все более нечетким и размытым.

Через 2 и 4 ч (снимки 6 и 7) в нижней части образца граница видна как распавшиеся два фронта, один из которых отстает от другого на 5,4 и 6,8 мм соответственно. Выполненный сверху снимок 10 показывает, что это можно объяснить образованием сбоку областей, занятых нефтью и похожих на уступы.

Таким образом, если судить по полутоновым снимкам (рис. 2), нефть заняла края всего образца, углы и периферию правой его части, образуя как бы вогнутую чашку, а вода вытянулась языком от левого торца вдоль оси образца.

На снимках 8 и 9 видно также, что вверху слева за счет капиллярных сил воде удалось продвинуться вдоль поверхности цилиндра до середины образца на 15 мм и не пустить туда нефть. Это выглядит на снимке особенно странным, так как при визуальном осмотре можно было видеть, что вверху слева образец снаружи весь покрыт нефтью так же, как покрыта пленкой нефти вода в ячейке слева от образца.

Количественный анализ движения фронта жидкости. На рис. 3 представлены те же фазы процесса, что и на рис. 2, после медианной фильтрации 3×3 , калибровки, постеризации на 16 ступеней яркости и выделения границ. Полученные изображения в виде изофот позволяют уже уверенно говорить о том, что через $12 \div 25$ ч вода проникла с различной концентрацией во все участки образца породы. Однако осесимметричная картина изофот, связанная с цилиндрической формой исходного образца породы, сильно искажает картину распределения плотности воды.

На рис. 4 показано, как выглядит картина распределения плотности воды без учета

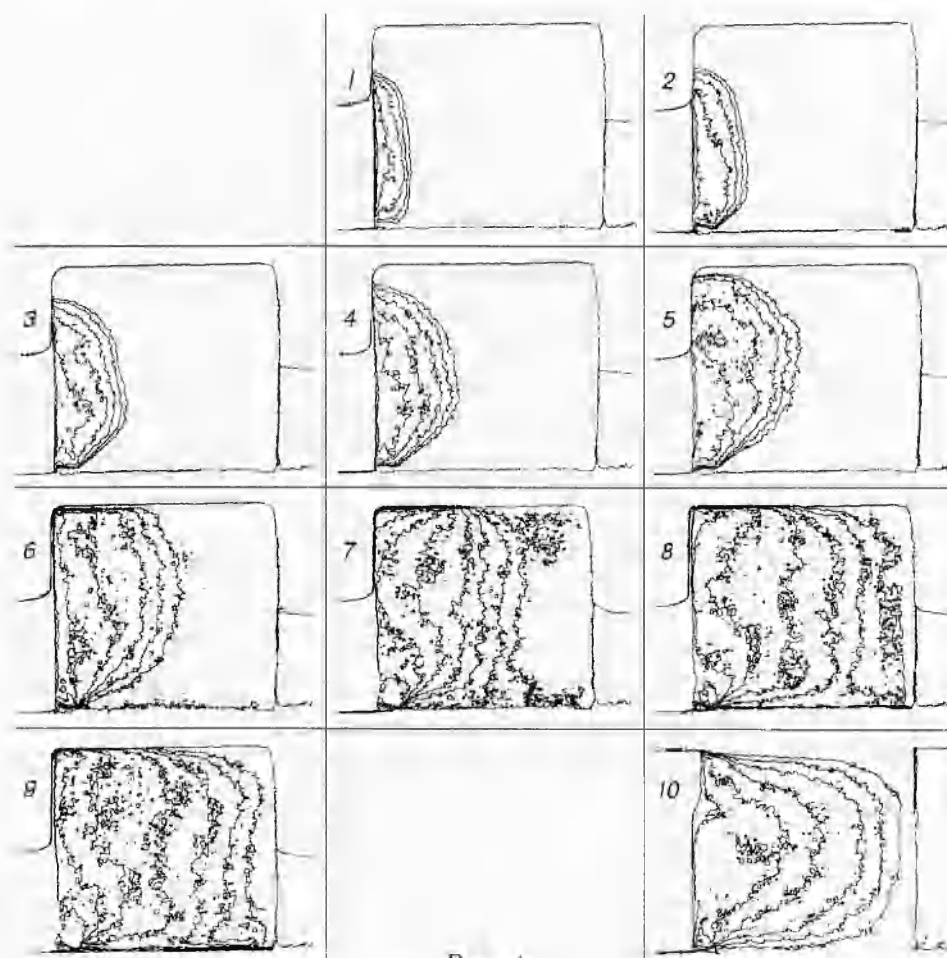


Рис. 4

влияния формы и материала образца породы. Для этого после медианной фильтрации и калибровки из каждого изображения рис. 2 вычиталось изображение θ сухого образца породы, снятое до начала эксперимента. Затем проводились линейное масштабное преобразование яркости (так как диапазон яркостей после вычитания сужался), постеризация на восемь ступеней яркости и выделение границ. Вычитание изображений ухудшает отношение сигнал/шум, поэтому число градаций при постеризации было снижено до восьми. На снимках (1–6) рис. 4 ($t = 120$ мин) почти нет разногласий со снимками 1–6 рис. 2, 3. Только фронт воды на первых трех снимках стал более плоским и обозначилась более резкая граница на уступе внизу слева.

Отличие от предыдущих изображений начинается со снимка 7 рис. 4 ($t = 240$ мин), на котором видно, как вода начинает заметно взаимодействовать с нефтью. Присутствие нефти не позволяет воде продвигаться по центру в правой части образца столь же быстро, как в верхней правой части образца, а в левой верхней части незначительному количеству проникшей нефти удалось повлиять на вид распределения плотности воды, оттеснив линии изофот назад. На снимке 9 рис. 4 ($t = 1510$ мин) изофоты приобрели обратную кривизну, обозначив область, занятую преимущественно нефтью. Образовавшаяся на поздних стадиях зеркально-симметричная S-образная структура изофот показывает, что в левом нижнем углу образца присутствует больше воды, а в правом нижнем — больше нефти. В верхней области образца градиент концентраций вдоль образца меньше, чем в нижней на одну полосу; таким образом, вклад гравитационного механизма в установившееся распределение концентраций составляет $\sim 1/7$ от капиллярного. Интересно отметить, что на

виде сверху (снимок 10 рис. 4) все *S*-образные искажения изофот отсутствуют, так как после усреднения по вертикали получают достаточно ровные плоские формы фронта воды при подходе к правому краю образца.

Количественный анализ продвижения жидкости вдоль осевой линии образца, полученный цифровой обработкой снимков 1–9 рис. 2, представлен на рис. 5 (кривые 1–9 соответственно), где по вертикали отложена плотность образца, а по горизонтали — координата. Для удобства сравнения графики изображены со сдвигом по условной третьей оси. Интервал от 60 до 90 условных единиц с точностью не хуже $\pm 1,5$ единиц отвечает интервалу объемных концентраций воды от 0 до 15% (или насыщению пор от 0 до 100%).

В таблице представлены результаты измерений параметров фронта воды.

Анализ рис. 4, 5, а также факт плавного размытия границы воды на снимках рис. 2–4 и кривых рис. 5 свидетельствует о том, что мы имеем дело со сложной разветвленной сетью капилляров, заполненной водой, нефтью и газом. На ранних стадиях (при $t \leq 60$ мин) основное влияние на процесс заполнения пустот оказывает взаимодействие сред на тройной границе: вода — воздух — стенка капилляра (или нефть — воздух — стенка капилляра). На поздних стадиях (при $t \geq 60$ мин) окончательное распределение концентраций в образце перед наступлением равновесия определяется взаимодействием сред на четверной границе: вода — нефть — воздух — стенки капилляра. Измерение на рентгенограммах уровня жидкости в кювете дает возможность оценить расход воды (см. таблицу) и конечную ее концентрацию в образце. Например, через 25 ч в образец поступило 1249 мм^3 воды, что составляет 7,1% от общего объема образца. Учитывая, что пористость образца $\sim 15\%$, можно утверждать, что, несмотря на сложность границы по форме, нефть и вода поделили пустоты образца примерно поровну.

Если принять в качестве первого приближения модель пор образца в виде капилляра круглого сечения длиной L , радиусом R , то расход жидкости Q описывается течением Пуазейля $Q = \pi \Delta P R^4 / (8\eta L)$ (ΔP — перепад давления, η — вязкость жидкости).

Для медленного заполнения горизонтального капилляра с одного конца без учета вовлеченной в движение переменной массы справедливо выражение $Q dt = \pi R^2 dL$, откуда следует выражение для продвижения фронта жидкости под действием перепада давлений: $L = R\sqrt{\Delta P t / (4\eta)}$.

Если причиной перепада давлений являются только силы поверхностного натяжения, то из условия $\Delta P = 2\sigma/R$ получается зависимость расстояния, пройденного фронтом, от времени и радиуса капилляра:

$$L = \sqrt{\sigma R t / (2\eta)}. \quad (1)$$

По результатам, представленным в таблице, можно построить графики положения фронта воды в образце (рис. 6) в двойном логарифмическом масштабе. Реперы погреш-

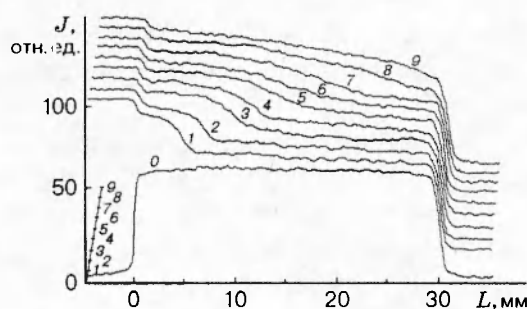


Рис. 5

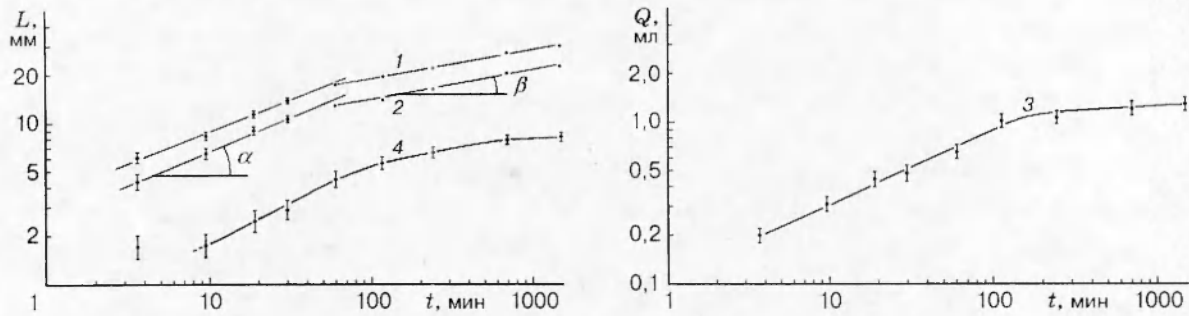


Рис. 6

ностей эксперимента на рис. 6 показывают среднеквадратичное отклонение для выборки экспериментальных данных, полученной рядом близких параллельных трассировок цифровых изображений. Отсутствие репера означает, что погрешность меньше изображаемого на рис. 6 размера точки. Кривые 1 и 2 — положение фронта, измеренного по уровню 0,5 высоты и по основанию. Тангенс угла наклона графиков $\operatorname{tg} \alpha = 0,4 \div 0,5$ говорит о том, что в течение первых 60 мин заполнение достаточно хорошо описывается моделью с показателем степени $1/2$ согласно выражению (1) для круглого капилляра. Далее он уменьшается до $\operatorname{tg} \beta = 1/6$, что, по-видимому, соответствует продвижению воды в среде капилляров, уже частично заполненных нефтью. Некоторое уменьшение показателя $\operatorname{tg} \alpha$ относительно 0,5 в сухом образце можно объяснить не вполне одномерной постановкой эксперимента — граница фронта воды в поздние моменты времени не является плоской, а площадь границы увеличивается. Кривая 3 (расход жидкости) достаточно хорошо согласуется с кривыми 1 и 2.

Оценка характерного размера сечения капилляра, ответственного за продвижение воды, дает

$$R = \frac{2\eta L^2}{\sigma t} = \frac{2 \cdot 10^{-2} [\text{г}/(\text{см} \cdot \text{с})] \cdot 1 [\text{см}^2]}{73 [\text{дин}/\text{см}] \cdot 1320 [\text{с}]} \sim 3 \cdot 10^{-7} [\text{см}],$$

откуда видно, что в движении участвует не вся жидкость, заполняющая сечение капилляров, так как из микрофотографий ясно, что в образце есть и более крупные капилляры, по которым, согласно (1), жидкость должна распространяться быстрее. Плавный фронт нарастания плотности на рентгеновских снимках свидетельствует о том, что в этой области только часть капилляров заполнена жидкостью. Неоднородная структура капилляров и наличие мелких ответвлений, с одной стороны, задерживают продвижение фронта жидкости в основном крупном капилляре, а с другой — при любом угле смачивания, меньшем 90° , обеспечивают продвижение тройной границы вперед и состояние, похожее на полное смачивание для стенок более крупного капилляра. Таким образом, крупные капилляры заполняются после заполнения мелких боковых ответвлений, и именно этот процесс определяет продвижение основной массы воды в образце. Течения такого рода описаны в [4, 5] и не являются чем-то необычным.

Эксперимент показывает, что полуширина фронта жидкости, измеренная от основания до полувывсоты (кривая 4 на рис. 6), изменяется со временем примерно по тому же закону, как и координата положения самого фронта, причем полуширина фронта всегда примерно равна $1/4$ от пройденного фронтом расстояния. Первая точка при $t = 3,5$ мин выпадает из рассмотрения в связи с временем экспозиции, сравнимым с временем продвижения фронта на его полувывсоту. Тангенс угла наклона для наиболее характерного интервала времени $10 \div 60$ мин, когда пропитка образца водой происходит без заметного влияния нефти, составляет с хорошей точностью 0,5. Это дает повод считать, что предложенная выше

капиллярная модель пригодна и для процесса размывания фронта.

Выводы. В результате проведенных пробных экспериментов выяснено, что импульсная рентгенографическая съемка с предлагаемой цифровой обработкой изображений позволяет:

- определять положение и форму фронта жидкости внутри нефтеносного песчаника, а также процентную концентрацию жидкости в различных частях образца,
- следить за динамикой распределения жидкости в образце,
- по динамике рентгенограмм уточнять модели, описывающие поведение жидкостей в нефтеносной породе.

В настоящей работе показано, что при пропитке сухого образца размером порядка 3 см во все моменты времени положение фронта жидкости внутри объема и на поверхности образца определяется в основном капиллярными эффектами. Поправка за счет гравитационных сил составляет $10 \div 20\%$. Значительная часть просвета пор не используется при продвижении фронта жидкости — в них жидкость, скорее всего, не заходит или стоит вблизи стенок. Характерное время пропитки образца с двух сторон нефтью и водой до взаимодействия фронтов порядка 60 мин. Состояние равновесия наступает за время порядка суток. После наступления равновесия наблюдается плавный переход средней концентрации каждого компонента от 100 % до 0 вдоль всего образца. С учетом формы пор образца и несмешиваемости компонентов равновесная граница между нефтью и водой является сложной объемной структурой, напоминающей два сросшихся корня, и в принципе может иметь фрактальный характер.

Разработанные рентгенографические экспериментальные методики могут применяться для измерения и точной диагностики движения флюидов в модели нефтяного коллектора.

Автор выражает благодарность С. В. Сухину, А. С. Бесову и С. П. Таратуте за содействие и полезное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sprunt E. S., Desal K. P., Coles M. E., et al. CT-scan-monitored electrical-resistivity measurements show problems achieving homogenous saturation // SPE Formation Evaluation. 1991. V. 6, N 3. P. 134–140.
2. Tidwell V. C., Glass R. J. X-ray visible light transmission for laboratory measurement of two-dimensional saturation fields in thin-slab systems // Water Resources Research. 1994. V. 30, N 11. P. 2873–2882.
3. Алтухов А. А., Биченков Е. И., Гусев Е. А. и др. Сильноточный импульсный рентгеновский аппарат для динамической радиографии // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 1. С. 189–192.
4. Шейдегер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Гостоптехиздат, 1960.
5. Арье А. Г. Физические основы фильтрации подземных вод. М.: Недра, 1984.

Поступила в редакцию 20/III 1996 г.