

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МАКРОСТРОЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩЕМСЯ ОТБОРЕ И НАГНЕТАНИИ ОДНОЙ ИХ ФАЗ В ПЛАСТ, В КОТОРОМ ДЕЙСТВУЮТ ИСТОЧНИКИ И СТОКИ

Б. В. МАКЕЕВ, А. Л. ХЕЙН

(Москва)

Экспериментальному изучению процесса взаимовытеснения несмешивающихся жидкостей в горизонтальном пласте при периодически повторяющемся отборе и нагнетании одной из фаз посвящены работы [1, 2]. Процесс значительно усложняется, когда в пласте при этом действуют еще источники и стоки. В данной статье в связи с созданием и циклической эксплуатацией хранилища газа в горизонтальном водоносном пласте большой мощности приводятся результаты физического моделирования пластового двухфазного фильтрационного потока при наличии источников и стоков. Критерии подобия для случая фильтрации несжимаемых жидкостей выбраны с использованием работ [3, 4].

**1. Оригинал. Критерии подобия. Конструкция модели.** В качестве оригинала выбран полосообразный водоносный пласт длиной  $L=2$  км и мощностью  $h=200$  м. Зона нагнетания и отбора газа находится в середине пласта. На одной границе в форме галереи размещается источник, а на другой — тоже в форме галереи — сток. Источник и сток действуют непрерывно при постоянном давлении нагнетания (отбора) воды.

Если течение принять двумерным и ось  $x$  направить по подошве пласта вдоль напластования, а ось  $z$  — поперек напластования, то для несжимаемых жидкостей основные критерии подобия, определяющие процесс, будут

$$\Pi_1 = \frac{L \sqrt{K_x} \sin \alpha + K_z \cos \alpha}{(L \sin \alpha + h \cos \alpha) \sqrt{K_x}}, \quad \Pi_2 = \frac{K_x \Delta \gamma (L \sin \alpha + h \cos \alpha)}{q^* \mu_+ L}$$

$$\Pi_3 = \frac{\mu_+ K_-^*}{\mu_- K_+^*}, \quad \Pi_4 = \frac{\sqrt{m K_x} \delta \cos \phi}{q^* \mu_+ L}$$

Здесь  $L$  — длина пласта,  $h$  — мощность пласта,  $K_x$  и  $K_z$  — проницаемости соответственно вдоль осей  $x$  и  $z$ ,  $\alpha$  — угол наклона пласта к горизонту,  $\Delta \gamma = \gamma_+ - \gamma_-$  — разность удельных весов жидкостей (индексы плюс и минус обозначают соответственно смачивающую и несмачивающую фазы),  $\mu_+$ ,  $\mu_-$  — вязкости смачивающей и несмачивающей фаз,  $m$  — эффективная пористость среды,  $\delta$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе фаз,  $\phi$  — угол смачивания,  $q^*$  — удельный объемный расход заканчиваемой жидкости,  $K_+^*$ ,  $K_-^*$  — фазовые проницаемости смачивающей и несмачивающей жидкостей.

Экспериментальная модель имела форму прямоугольного параллелепипеда размером  $110 \times 10 \times 1.7$  см<sup>3</sup>. Боковые стенки модели изготовлены из оргстекла. Модель заполнена кварцевым песком фракционного состава 0.3–0.2 мм, предварительно гидрофобизированным. Моделью газа служила вода, моделью воды — масло.

Для оригинала приняты следующие значения основных параметров:  $\gamma_+ = 1$  Г/см<sup>3</sup>,  $\gamma_- = 0.05$  Г/см<sup>3</sup>,  $\mu_+ = 1$  спз,  $\mu_- = 0.018$  спз,  $\delta = 0.07$  Г/см,  $\alpha = 0$ ,  $K_x = 4$  дарси,  $K_z = 1$  дарси,  $m = 0.2$ ,  $q^* = 3 \cdot 10^{-3}$  см/сек.

В модели соответственно  $\gamma_+ = 0.9$  Г/см<sup>3</sup>,  $\gamma_- = 1$  Г/см<sup>3</sup>,  $\delta = 0.03$  Г/см,  $\mu_+ = 60$  спз,  $\mu_- = 1$  спз,  $\alpha = 0$ ,  $K_x = 20$  дарси,  $K_z = 20$  дарси,  $m = 0.4$ ,  $q^* = 10^{-3}$  см/сек.

Соотношение масштабов времен в оригинале и модели  $\lambda_t = 600$ .

**2. Ход и результаты опытов.** Роль источника в модели играл торец, через который закачивалось масло, а роль стока — торец, через который масло из модели отбиралось.

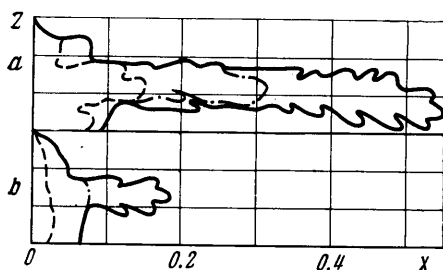
Вскоре после начала закачки воды в модель четко обозначились два срединных языка воды: один в сторону источника, другой в сторону стока. Последний более длинный и широкий.

Приподошвенные языки в модели, имитирующие прикровельные языки воды в натуре, развивались относительно медленно, что объясняется сравнительно низкой проницаемостью пористой среды, повышенным действием капиллярных сил, сравнительно небольшой разностью удельных весов масла и воды. Помимо этого вода, стекавшая вниз, расходовалась по пути к подошве пласта на образование срединного языка, что также замедляло образование приподошвенного языка воды.

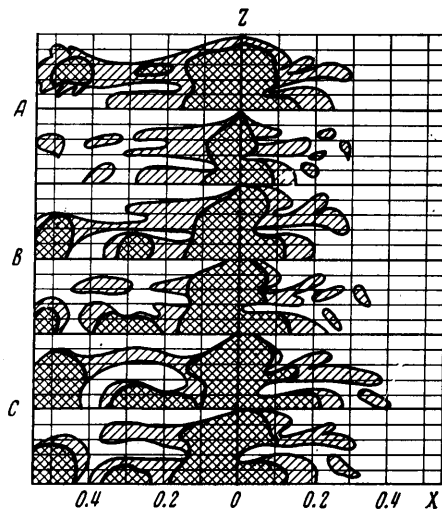
На фиг. 1 показана картина развития срединных языков воды, которая наблюдалась и фиксировалась с помощью «светозондажа» через переднюю стенку модели.

Сплошной линией, пунктиром с точкой и пунктиром показаны контуры границы вода – масло соответственно к 45, 30 и 10 мин от начала закачки, причем на фиг. 1, а показан язык воды в сторону отбора масла, а на фиг. 1, в – в сторону закачки масла ( $x$  и  $z$  – безразмерные координаты). От основного языка воды отходят отростки, которые могут развиваться в отдельные языки в ходе циклически повторяющихся закачек и отборов воды.

В начальный период времени в зоне нагнетания воды образуется небольшой приподошенный язык воды, который отвечает прикровельному языку газа в натуре. Затем возникает и начинает быстро развиваться срединный язык нагнетаемой воды, который ведет себя по-разному в зоне источника и в зоне стока. В сторону источника



Фиг. 1



Фиг. 2

язык воды перемещается с постоянной скоростью. В сторону же от стока он движется с нарастающей скоростью, отклоняясь в сторону подошвы модельного пласта под воздействием эффекта гравитации. У обоих языков воды непрерывно появляются отростки.

После создания «хранилища», т. е. после первичной закачки воды, было осуществлено три цикла эксплуатации хранилища. Давления на источнике и стоке поддерживались постоянными. Закачка и отбор воды осуществлялись также на режиме постоянного давления. Первичная закачка воды была прекращена, когда вода появилась вблизи линии отбора масла. После небольшого периода, когда вода не закачивалась и не отбиралась, был осуществлен отбор воды той же длительности, что и закачка.

Наблюдения показали, что от цикла к циклу эксплуатации хранилища вода все сильнее прорывалась к линии стока, а масло — от линии его нагнетания к эксплуатационной «скважине».

Объясняется это тем, что в зоне между эксплуатационной скважиной и линией стока остается вода, которая отсекается языками, порождаемыми действием источника. Подтверждает это картина распределения насыщенности по циклам эксплуатации хранилища на конец закачки и отбора воды, показанная на фиг. 2. (Прямой штриховкой показаны участки модели, на которых водонасыщенность достигает 0.15, а перекрестной штриховкой — участки, на которых водонасыщенность достигает 0.45. Буквами А, В, С помечены соответственно первый, второй и третий циклы эксплуатации хранилища.)

Из фиг. 2 видно, что к концу отбора в модели образуются «изолированные» очаги с повышенной водонасыщенностью. Таких очагов в сторону линии действия стока больше и они распределены по большей зоне, чем на участке работы источника. Такие очаги укрупняются от цикла к циклу, занимая все большую площадь, и в период закачки воды они соединяются, образуя сплошные языки воды. В результате это приводит к тому, что в модели от цикла к циклу остается все больше воды и уменьшается время, за которое язык воды в период закачки прорывается к линии стока.

Таким образом, язык воды, прорвавшийся при первичной закачке к линии стока, при отборе воды не отступает. Он разбивается на отдельные целики, которые

при закачке воды соединяются, снова образуя сплошной язык. Этот язык прогрессивно удлиняется от цикла к циклу, обводняя сток масла. Зона двухфазного течения флюидов в эксперименте отличается разрывным строением.

Таким образом, эксперимент подтверждает гипотезу о том, что при действии источников и стоков управляющего назначения колебательно протекающий двухфазный фильтрационный поток обладает разрывным макростроением. Это должно быть учтено при технологическом проектировании подземных хранилищ газа, в которых это может произойти.

Необходимо дальнейшее экспериментальное изучение колебательно протекающих процессов двухфазной фильтрации, осложненных действием источников и стоков управляющего назначения, и создание математической теории, адекватной действительной физической картине их протекания.

Поступила 2 X 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Евгеньев А. Е.* Экспериментальные исследования процессов вытеснения воды газом и газа водой и способа их интенсификации. В кн. «Хранение газа в горизонтальных и пологозалегающих водоносных пластах». М., «Недра», 1968.
2. *Boucher M., Marrast J.* Etude sur modeles numerique et physique des possibilites de stockage de gaz naturel en couches horizontales. Rev. Inst. Frans. Petrol., 1969, vol. 24, No. 11.
3. *Эфрос Д. А.* Исследования фильтрации неоднородных систем. Л., Гостоптехиздат, 1963.
4. *Швидлер М. И., Леви Б. И.* Одномерная фильтрация несмешивающихся жидкостей. М., «Недра», 1970.

УДК 532.546.06

### О ВЛИЯНИИ ВОЛНЕНИЯ НА ФИЛЬТРАЦИЮ ПОД ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМИ СООРУЖЕНИЯМИ

И. Б. БАСОВИЧ

(Москва)

В работе рассматривается задача о влиянии волнения на фильтрацию несжимаемой жидкости под плоским флюидбером в грунте бесконечной глубины. Выражение для потенциала течения преобразуется к виду, удобному для численного интегрирования. Приводятся результаты численных расчетов.

Предполагается, что уровни воды  $H_1$  и  $H_2$  в верхнем  $-\infty < x < b$  и нижнем  $b < x < \infty$  бьефах — заданные функции  $x$  и  $t$

$$(1) \quad H_1(x, t) = H_1 = \text{const}, \quad H_2(x, t) = H_2 + (A \sin \pi x/c + B \cos \pi x/c) \sin \omega t$$

Тогда комплексный потенциал скорости фильтрации имеет вид [1]

$$(2) \quad W(z, t) = k \frac{H_1 - H_2}{\pi} \arcsin \frac{z}{b} - k \frac{H_1 + H_2}{2} - \\ - \frac{kA(z^2 - b^2)^{1/2}}{\pi i} \sin \omega t \int_b^{\infty} \frac{\sin(\pi \eta/c) d\eta}{(\eta^2 - b^2)^{1/2}(\eta - z)} - \\ - \frac{kB(z^2 - b^2)^{1/2}}{\pi i} \sin \omega t \int_b^{\infty} \frac{\cos(\pi \eta/c) d\eta}{(\eta^2 - b^2)^{1/2}(\eta - z)}$$

Вводя безразмерные переменные

$$\tau = \omega t, \quad \xi = \eta/b, \quad a = \pi b/c, \quad x = z/b$$

из (1) и (2) будем иметь для напора  $h(x, \tau)$  в верхнем и нижнем бьефах соответственно

$$h(x, \tau) = H_1, \quad -\infty < x < -1 \\ h(x, \tau) = H_2 + (A \sin ax + B \cos ax) \sin \tau, \quad 1 < x < \infty$$