

ГИДРОГЕОЛОГИЯ

А. И. СИЛИН-БЕКЧУРИН

**О ВЛИЯНИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ, ПРИВЕДЕННЫХ  
ДАВЛЕНИЙ И ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД НА СКОРОСТЬ  
ФИЛЬТРАЦИИ РАССОЛОВ В НЕФТЕНОСНЫХ ГОРИЗОНТАХ  
УРАЛО-ВОЛЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

(Представлено академиком Д. С. Белянкиным 14 VI 1947)

Ламинарный режим фильтрации подземных вод подчиняется, как известно, закону Дарси

$$v = -K \frac{\partial H}{\partial s}, \quad (1)$$

из которого не видно влияния на скорость фильтрации плотности и вязкости подземных вод. Для того чтобы этот вопрос выяснить, сделаем в уравнении (1) ряд преобразований:

1) Выразим пьезометрический напор  $H$  через гидростатическое давление  $p$ , пользуясь уравнением (3):

$$H = \frac{p}{\Delta} + z, \quad (2)$$

где  $\Delta$  — вес единицы объема воды,  $z$  — расстояние до плоскости сравнения.

2) Заменяем коэффициент фильтрации  $K$  на коэффициент проницаемости  $K_0$  (выраженный в единицах дарси), пользуясь уравнением (6):

$$K = K_0 \frac{\Delta}{\mu}, \quad (3)$$

где  $\mu$  — вязкость воды.

3) заменим вес единицы объема воды  $\Delta$  на ее плотность  $\rho$  при помощи уравнения (3):

$$\Delta = \rho g, \quad (4)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести. Тогда при  $\Delta = \text{const}$ ,  $p = h\rho g$  (где  $h$  — пьезометрическая высота (3)), уравнение (1) примет после преобразований следующий вид:

$$v = -K_0 \frac{\rho g}{\mu} \frac{\partial}{\partial s} (h + z). \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что плотность воды  $\rho$  повышает, а ее вязкость  $\mu$  понижает скорость фильтрации, следовательно, их влияние взаимно противоположно.

В гидравлике величина  $\mu/\rho$  известна как коэффициент кинематической вязкости; размерность его см<sup>2</sup>/сек. По аналогии, величину  $\rho/\mu$ ,

входящую в уравнение (5), можно назвать коэффициентом кинематической плотности; размерность его будет сек./см<sup>2</sup>. В дальнейшем мы этот последний коэффициент будем обозначать к. к. п.

Для пресных вод ( $\rho = 1,00$  г/см<sup>3</sup>,  $\mu = 0,01$  пуаза) к. к. п.  $\cong 100$  сек./см<sup>2</sup>. В соленых водах и в рассолах\* к. к. п. будет меньше 100 сек./см<sup>2</sup>, поэтому скорость их фильтрации должна быть меньше скорости фильтрации пресных вод. Поясним это на примере соленых вод и рассолов Полазененско-Краснокамской антиклинали. По данным А. М. Кузнецова<sup>(2)</sup>, обнаружено, что в этом районе при углублении буровых скважин от 94 до 1325 м в подземных водах увеличивается: общее содержание солей от 38 до 225 г/1000 г, плотность от 1,027 до 1,180 г/см<sup>3</sup> и вязкость от 1,096 до 1,842 сантипуаза ( $t = 20^\circ$ ). Графики изменений плотности и вязкости подземных вод, составленные нами по данным А. М. Кузнецова, показывают, что при увеличении содержания солей рост плотности подземных вод происходит по пря-

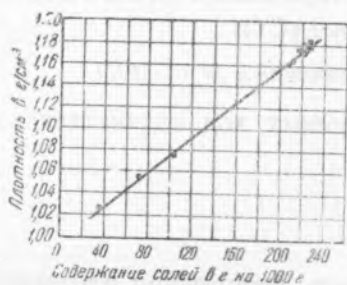


Рис. 1. Изменение плотности подземных вод перми и карбона Полазененско-Краснокамской антиклинали в зависимости от содержания в них солей

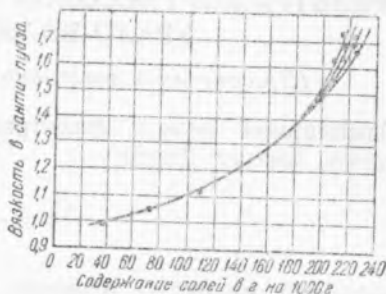


Рис. 2. Изменение вязкости подземных вод перми и карбона Полазененско-Краснокамской антиклинали в зависимости от содержания в них солей (при  $t = 20^\circ \text{C}$ )

мой линии (рис. 1), а рост вязкости — по параболической кривой (рис. 2). При этом в рассолах с содержанием солей от 180 до 220 г/1000 г вязкость образует пучок кривых, расходящихся в виде веера в сторону возрастающих концентраций. Это указывает, что вязкость рассолов зависит не только от количества растворенных солей, но и от их состава. Уменьшение к. к. п. при увеличении плотности и вязкости подземных вод происходит также по параболической кривой, которая при значениях плотности 1,14—1,18 г/см<sup>3</sup> расходитсся в виде пучка (рис. 3).

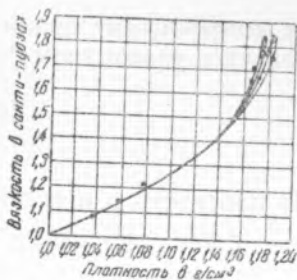


Рис. 3. Изменение коэффициента кинематической плотности подземных вод Полазененско-Краснокамской антиклинали в зависимости от их плотности и вязкости (при  $t = 20^\circ \text{C}$ )

к. к. п. = 63—65 сек. см<sup>2</sup>, т. е. он в 1,4—1,6 раза меньше к. к. п. пресных вод. Поэтому скорость фильтрации таких рассолов будет меньше скорости

\* Под солеными водами понимаются, согласно классификации В. И. Вернадского<sup>(1)</sup>, воды с содержанием солей 1—50 г/л; под рассолами — воды с содержанием солей 50—250 г/л.

фильтрации пресных вод (при условии равенства их напоров и коэффициента проницаемости) в 1,4—1,6 раза. Ранее мной указывалось<sup>(4)</sup>, что для подземных вод, у которых удельный вес  $\gamma$  изменяется с глубиной, но остается постоянным в горизонтальном направлении, т. е.

для случая  $\gamma = f(z)$ , расчет напора по уравнению  $H = \frac{P}{\gamma} + z$  не может производиться, так как  $\gamma$  имеет переменные значения. Там же было показано, что в этом случае приближенный расчет скорости фильтрации может производиться по уравнению:

$$v = -K \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P_{a_0}}{\partial x}, \quad (6)$$

в котором находится член  $P_{a_0}$ , названный мной „приведенным давлением“. Определение его производится по уравнению:

$$P_{a_0} = p_{a_i} + \int_{a_0}^{a_i} \gamma(z) dz, \quad (7)$$

где  $p_{a_i}$  — гидростатическое давление на любой из горизонтальных плоскостей  $a_i$ , проведенных по погоку подземных вод, равно  $h\gamma$  ( $h$  — пьезометрическая высота,  $\gamma$  — удельный вес столба воды от плоскости  $a_i$  до пьезометрического уровня),  $\int_{a_0}^{a_i} \gamma(z) dz$  — статическое давление столба воды между плоскостью  $a_i$  и плоскостью сравнения  $a_0$ .

При выводе этого уравнения было доказано по методу П. И. Полубариновой-Кочиной, опубликованному мной в той же статье, что для случая  $\gamma = f(z)$  при  $K = \text{const}$  линии токов  $\Psi$  ортогональны к линиям  $\varphi = -KP_{a_0}$ .

Дальнейшее изучение вопроса о фильтрации соленых вод показало, что при учете не только их удельного веса (плотности), но и вязкости уравнение для приближенного расчета скоростей фильтрации может быть представлено в следующем виде:

$$v = -K_0 \frac{1}{\mu} \frac{\partial P_{a_0}}{\partial x}, \quad (8)$$

где  $K_0$  — проницаемость пород в единицах дарси,  $\mu$  — вязкость воды в сантипуазах,  $\partial P_{a_0} / \partial x$  — градиент приведенных давлений в ат/км. При этих размерностях скорость фильтрации будет выражена в  $10^{-5}$  см/сек., что приблизительно будет соответствовать 1 см/сутки.

Уравнение (8) для приближенного расчета скорости фильтрации подземных вод может быть применено для двух случаев, характерных для нефтеносных горизонтов Урало-Волжской области:

1) При моноклиналином залегании пород, когда плотность и вязкость подземных вод постепенно увеличиваются с глубиной, но остаются постоянными в горизонтальном направлении. Тогда для расчета приведенных давлений  $P_{a_0}$  можно брать любую из плоскостей сравнения, а для расчета скоростей фильтрации — коэффициент проницаемости пород и вязкость воды на выбранной плоскости сравнения.

2) При складчатом залегании пород, когда на крыльях складок плотность и вязкость подземных вод также увеличиваются с глубиной, но остаются постоянными в горизонтальном направлении. В этом

случае для расчета приведенных давлений  $P_a$ , может быть взята только та плоскость сравнения, ниже которой плотность и вязкость подземных вод являются постоянными; обычно это соответствует нижним слоям синклиналей.

Воспользовавшись указанной методикой, мы провели расчеты градиентов приведенных давлений рассолов для некоторых из нефтеносных горизонтов Урало-Волжской области. Они оказались равными: для района Ставрополь—Заборовка  $5,7 \cdot 10^{-2}$  ат/км, для районов Заглядино—Калиновка  $6,6 \cdot 10^{-2}$  ат/км, для района В. Чусовские Городки—Краснокамск  $8,2 \cdot 10^{-2}$  ат/км. Приведенные цифры показывают, что градиенты приведенных давлений изменяются примерно в 1,5 раза. Если в порядке ориентировочных характеристик взять далее проницаемость пород в нефтеносных горизонтах 10—1000 миллидарси и вязкость рассолов 1,7—1,9 сантипуаза, то при градиентах приведенных давлений  $n \cdot 10^{-2}$  ат/км мы получим по уравнению (8) скорости фильтрации рассолов, равные  $n \cdot 10^{-2}$  —  $n \cdot 10^{-4}$  см/сутки. Полученные данные подтверждают высказанные нами ранее<sup>(5)</sup> общие гидрогеологические соображения о том, что в глубоких горизонтах палеозоя Урало-Волжской области на некоторых из его участков существует движение рассолов. В угленосной толще ( $C_1^{2h}$ ) оно происходит от Ставрополя к Заборовке, в спириферовом подъярусе казанских отложений ( $P_2^{kz}$ ) от Заглядино к Калиновке, в верейской толще ( $C_2^{ver}$ ) от В. Чусовских Городков к Краснокамску. Наибольшее влияние на скорость фильтрации рассолов имеет при этом проницаемость пород, изменяющаяся в 100 и более раз; к. к. п. и градиенты приведенных давлений, изменяющиеся в 1,4—1,6 раза, имеют второстепенное значение.

Лаборатория гидрогеологических  
проблем им. Ф. П. Саваренского  
Академии Наук СССР

Поступило  
14 VI 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. И. Вернадский, История минералов земной коры, 2, История природных вод, ч. 1, 1934—1936. <sup>2</sup> А. М. Кузнецов, ДАН, 47, № 7 (1945). <sup>3</sup> Н. Н. Павловский, Курс гидравлики, ч. 1, Л. 1933. <sup>4</sup> А. И. Силин-Бекчурин, Сборник ВСЕГИНГЕО, Гидрогеология и инженерная геология, № 8 (1941). <sup>5</sup> А. И. Силин-Бекчурин, ДАН, 52, № 1 (1946). <sup>6</sup> В. Н. Щелкачев, Основы подземной нефтяной гидравлики, 1945.