

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ  
им. А.Н. СЕВЧЕНКО

СФ. 288  
296

**С**

**ОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ  
ОПТИКИ,  
РАДИАЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ,  
ИНФОРМАТИКИ,  
РАДИОФИЗИКИ И  
ЭЛЕКТРОНИКИ**

МИНСК, 1996 г.

УДК539;681.511

Современные вопросы оптики, радиационного материала — ведения, информатики, радиофизики и электроники: // Сборник научных трудов НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко. — Мн.: Белгосуниверситет, 1996.-Ч.1. — 318стр.

Сборник посвящён 25-летию научно-исследовательского института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко и содержит научные работы, отражающие последние достижения ученых института в области оптики, спектроскопии, физики взаимодействия заряженных частиц и жёстких электромагнитных излучений с твёрдым телом, радиофизики, математики и механики, информатики, техники физического эксперимента.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Академик АН Беларуси Чернявский А.Ф. (ответственный редактор), Воропай Е.С., Комаров Ф.Ф., Кухарчик П.Д., Умрейко Д.С..

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РАЗРАБОТКИ  
НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ  
НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

А.И. Никифоров, В.Б. Таранчук

Горизонтальные скважины (ГС) бурят на низкопроницаемые, сильно неоднородные пласты малой толщины (менее 15 м). Благодаря значительной протяженности горизонтальных стволов скважин, достигающей сотен и, порой, тысяч метров, увеличивается степень охвата пласта дренированием и воздействия рабочим агентом, а в итоге возрастают дебиты скважин и нефтеотдача.

Математическое моделирование движения жидкости в системе пласт - вертикальные скважины - ГС приводит к постановке весьма сложных пространственных задач фильтрации многофазной жидкости в пласте и ее движения по стволам скважин. Обычно явлениями, связанными с движением жидкости по стволу ГС, пренебрегают и полагают, что давление вдоль ствола постоянно (скважина бесконечной проводимости [1]). В действительности движению жидкости по стволу скважины присущи все явления, свойственные движению по трубам жидкости с переменной массой. Течение может быть ламинарным и турбулентным, однофазным и многофазным. Обычно считается, что критическое число Рейнольдса для труб равно 2000. На практике турбулентное течение в ГС диаметром 24.4 см наблюдается при расходах порядка нескольких кубических метров в сутки. В соответствии с трубной гидравликой естественно ожидать падение давления при движении жидкости к устью добывающей скважины и при движении от устья - для нагнетательной. При высоких вязкости нефти и дебите ГС потери гидродинамического напора вдоль ствола могут достигать значительной величины и пренебрегать ими нецелесообразно.

В настоящей работе предложен способ учета потерь гидродинамического напора вдоль ствола ГС на основе известных подходов, применяемых в трубной гидравлике. Полученные зависимости используются при аппроксимации граничного условия на ГС.

Для ГС (трубы, расположенной горизонтально) основное

уравнение движения однофазной жидкости с переменной массой можно записать в виде [2]

$$\frac{v_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\gamma} = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + \int \frac{v-v_n \cos\beta}{z_0 g} dV + \Delta h_{0-z} \quad (1)$$

Здесь  $v_0$  и  $P_0$  - средняя скорость и давление на устье ГС;  $v$  и  $P$  - средняя скорость и давление в текущей точке  $z$ ;  $\beta$  - угол между направлением скорости присоединенной массы и направлением скорости основного потока;  $\Delta h_{0-z}$  - потери напора на трение, зависящие от диаметра  $d$  и длины  $L$  горизонтального ствола скважины, вязкости и средней скорости движения жидкости в ГС, шероховатости стенок скважины.

Полагая, что течение в окрестности ствола ГС плоско-радиальное,  $\beta = \pi/2$ , получим

$$\frac{v_0^2}{g} + \frac{P_0}{\gamma} = \frac{v^2}{g} + \frac{P}{\gamma} + \Delta h_{0-z} \quad (2)$$

Расход  $Q$  в любом сечении  $z$  определяется количеством жидкости, притекающей в скважину на отрезке  $[z, L]$

$$Q(z) = \int_z^L \pi \cdot d \cdot V_n(z) \cdot dz \quad (3)$$

где  $V_n(z)$  - скорость притока жидкости через поверхность ГС.

Средняя скорость в точке  $z$  будет

$$v = \frac{Q(z)}{(\pi d^2)/4} = \frac{4}{d} \int_z^L V_n(z) dz \quad (4)$$

Тогда, учитывая, что  $\gamma = \rho \cdot g$ , и  $v_0 = \frac{4}{d} \int_0^L V_n \cdot dz$ , (2) можно

переписать в виде

$$P = P_0 + \frac{16\rho}{d^2} \left[ \left( \int_0^L V_n dz \right)^2 - \left( \int_z^L V_n dz \right)^2 \right] + \rho g \Delta h_{0-z} \quad (5)$$

Согласно формуле Дарси-Вейсбаха потери напора на элементарном пути  $dz$  будут

$$dh = \lambda \frac{v^2}{2gd} dz \quad (6)$$

На отрезке  $[0, z]$

$$\Delta h_{0-z} = \int_0^z \lambda \frac{v^2}{2gd} dz \quad (7)$$

Окончательно

$$P = P_0 + \frac{16\rho}{d^2} \left[ \left( \int_0^L v_n dz \right)^2 - \left( \int_z^L v_n dz \right)^2 \right] + \frac{8\rho}{d^3} \int_0^z \lambda \left( \int_z^L v_n dz \right)^2 dz \quad (8)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  при ламинарном течении определяется по формуле [2]

$$\lambda = 64/Re, \quad (9)$$

где число Рейнольдса  $Re = v \cdot d \cdot \rho / \mu$ ,  $\mu$  - вязкость жидкости.

При турбулентном течении

$$\lambda = 0.11 \left[ \frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right]^\alpha, \quad (10)$$

обычно полагают  $\alpha = 0.25$ ,  $k$  - шероховатость стенки скважины.

Отметим, что шероховатость может доминировать над силами вязкости, т.к. ГС чаще всего эксплуатируются без обсадных колонн. При этом наблюдается разрушение поверхности ствола скважины, обусловленное как процессом бурения, так и естественной трещиноватостью горных пород. Соотношение (8) связывает нормальную составляющую скорости притока жидкости в скважину с распределением давления вдоль ствола скважины и может быть использовано при получении граничного условия на ГС для внешней задачи - задачи о фильтрации жидкости в пласте.

Рассмотрим математическую модель двухфазной изотермической фильтрации в пластовой системе, включающей насыщенную нефтью и водой пористую среду, вертикальные и горизонтальные скважины. Предполагается, что пористая среда недеформируема, фильтрующиеся жидкости ньютоновские, несмешива-

ющиеся и несжимаемые, относительные фазовые проницаемости определяется известными зависимостями от насыщенности вытесняющей фазой. Уравнения, описывающие рассматриваемый процесс, следуют из законов фильтрации и сохранения масс фаз и могут быть записаны в виде [3]

$$\operatorname{div} (A \cdot \operatorname{grad} P) = 0, \quad (11)$$

$$m \cdot \frac{\partial s}{\partial t} - \operatorname{div} (K_2 \cdot \operatorname{grad} P) = 0, \quad (12)$$

где  $t$  - время,  $P$  - давление,  $s$  - насыщенность пласта вытесняющей фазой,  $A = K_1 + K_2$ ,  $K_i = k \cdot f_i / \mu_i$ ,  $f_i$ ,  $\mu_i$  - относительная фазовая проницаемость и вязкость  $i$ -ой фазы,  $i=1, 2$  - для нефти и воды,  $m$  и  $k$  - активная пористость и абсолютная проницаемость среды.

Геометрическая схематизация пластовой системы: пласт считается горизонтальным, гравитационные силы не учитываются, толщина пласта значительно меньше его протяженности. Вертикальные скважины совершенны и ввиду малого их радиуса моделируются точечными источниками, на них задаются дебиты. В отношении ГС принято, что в месте вскрытия ими продуктивного горизонта (начало горизонтального ствола) известно давление  $P_0^c$ . Переход от трехмерной к квазитрехмерной (плоской) модели осуществляется на основе осреднения коэффициентов уравнений по толщине пласта [3]. Можно получить для определения осредненных давления  $\bar{P}$  и насыщенности  $\bar{s}$  следующие уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{A} \cdot \bar{N} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{A} \cdot \bar{N} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial y}) = 0, \quad (13)$$

$$m \cdot \bar{N} \cdot \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (F \cdot \bar{N} \cdot U_x) + \frac{\partial}{\partial y} (F \cdot \bar{N} \cdot U_y) = 0, \quad (14)$$

где  $F = \bar{K}_2 / \bar{A}$ ,  $U_x$ ,  $U_y$  - компоненты вектора суммарной скорости фильтрации  $U_x = -\bar{A} \cdot \partial \bar{P} / \partial x$ ,  $U_y = -\bar{A} \cdot \partial \bar{P} / \partial y$ .

ГС скважины моделируются разрезами с заданным  $\bar{P}(z)$ , которое связано с давлением на поверхности ствола скважины соотношением

$$v_n = \frac{(K_1 + K_2)(\bar{P} - P^c)}{H/(2 \cdot r_c)}, \quad (15)$$

где  $r_c$  - радиус ствола ГС. Эта формула выписана в предположении, что течение в окрестности ГС, ограниченной цилиндрической поверхностью радиуса  $H/2$ , осерадиальное, а водонасыщенность  $\bar{v}$  в каждом сечении, перпендикулярном оси ГС, в выделенной окрестности не меняется по радиусу.

Возникающая краевая задача для определения  $\bar{P}$  и  $\bar{v}$  решалась численно. Уравнения для давления и насыщенности на каждом временном слое рассчитывались последовательно без итераций по нелинейности. При аппроксимации уравнения (14) использовались двухточечные схемы [4]. Для определения давления применялась схема продольно-поперечной прогонки [5].

Аппроксимация граничного условия (8) на ГС выполнялась следующим образом. Пусть скважина по длине разбита сеточными ячейками на  $N$  участков длиной  $l_j$  ( $j=1, \dots, N$ ). Полагая, что на  $j$ -ом отрезке

$$v_{nj} = \frac{(K_1 + K_2)_j (\bar{P}_j - \bar{P}_j^c)}{H_j / (2r_c)}, \quad (16)$$

интегралы, входящие в (8), вычислялись как интегральные суммы, в которых  $v_{nj}$  брались с предыдущего момента времени во всех ячейках, за исключением той, для которой определялось граничное значение  $\bar{P}_j^c$ . Например

$$\int_z^L v_n dz = 0.5 v_{nj}^{\tau} \Delta_j + \sum_{i=j+1}^N v_{ni}^{\tau-1} \Delta_i, \quad (17)$$

где  $\tau$  - номер текущего временного слоя. Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  брался с предыдущего момента времени на всех участках скважины.

Некоторые результаты вычислительных экспериментов были получены с целью изучения возможности моделирования процесса обводнения ствола ГС. Рассчитывались два варианта, в первом из которых разработка участка пласта осуществлялась при наличии ГС, во втором - с вертикальной скважиной, эквивалентной производительности. В обоих случаях процесс моделировался

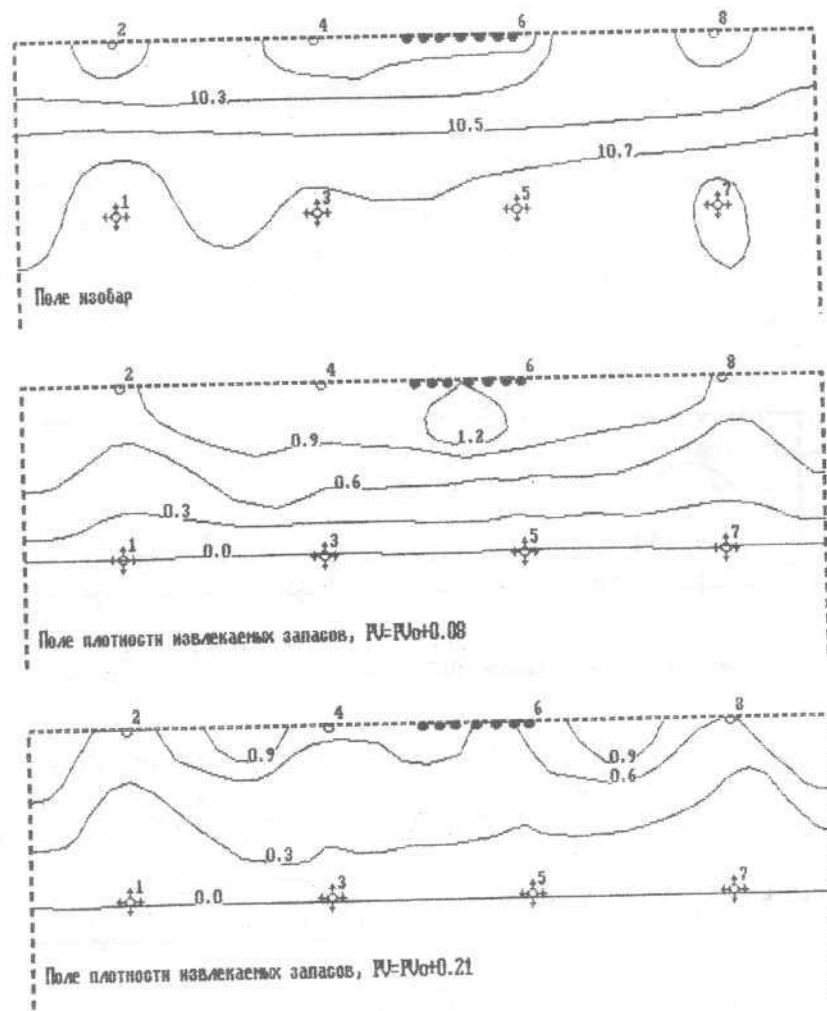


Рис. 1. Фрагмент пласта, разрабатываемого системой скважин, включающей горизонтальную.



при специально подобранных условиях для неоднородного пласта, в котором извлекаемые запасы распределены неравномерно. Ориентация ГС подбиралась таким образом, чтобы ее ствол открывал ту часть пласта, в которой плотность извлекаемых запасов наиболее высока. В расчетах контролировались обводненность продукции во всех добывающих скважинах, динамика изменения полей плотности извлекаемых запасов, изобар, зависимость коэффициента нефтеотдачи от относительного объема закачанной жидкости. Принимались модельные относительные фазовые проницаемости  $f_1 = (s^* - s)^2$ ,  $f_2 = (s - s_*)^2$ ,  $s^* = 0.7$ ,  $s_* = 0.3$ ,  $\mu_1 / \mu_2 = 5$ .

Изобары и характерные поля удельной плотности извлекаемых запасов показаны на рис. 1 и рис. 2. Следует заметить, что со временем поля изобар для обоих рассмотренных вариантов меняются незначительно. Изолинии плотности извлекаемых запасов, приведенные на рисунках, иллюстрируют поля плотности на момент начала расчетов первого и второго вариантов и на момент заключительной стадии разработки. Сопоставляя рисунки (1) и (2), видим, что в случае ГС площадь зоны с максимальной плотностью извлекаемых запасов заметно меньше. В то же время эффективность ГС для данной модельной задачи невысока из-за ее обводнения, неравномерного по длине ствола.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Roza A.J., Carvalho R. de S. A Mathematical Model for Pressure Evaluation in an Infinite-Conductivity Horizontal Well. - SPEFE (Dec. 1989) 559-566.
2. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1975. - 323 с.
3. Булыгин В.Я. Гидромеханика нефтяного пласта. - М.: Недра, 1974. - 230 с.
4. Todd M.R., O'Dell P.M., Hirasaci G.J. Methods for Increased Accuracy in Numerical Reservoir Simulators. // Soc. Pet. Eng. J. - 1972. - P.515-530.
5. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. - Новосибирск: Наука, 1967. - 195 с.

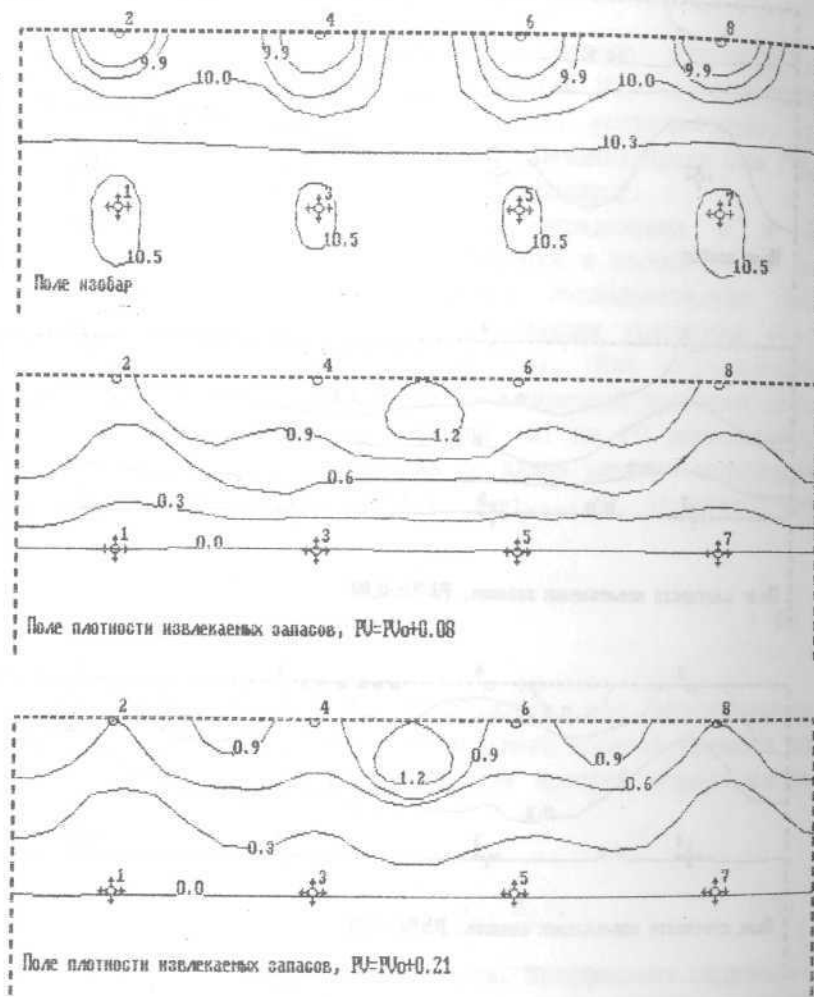


Рис. 2. Фрагмент пласта, разрабатываемого системой вертикальных скважин.