
doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.08.034>

УДК 532.546

В.Л. Поляков

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

E-mail: polyakov_igm@list.ru

О моделировании компактного распространения загустевающего реагента в плоскорадиальном фильтрационном потоке

Представлено академиком НАН Украины В.Т. Гринченко

Сформулирована математическая задача распространения в напорном пласте несмешиваемого флюида (реагента), вязкость которого изменяется в зависимости от времени пребывания в пористой среде по заданным экспоненциальному или гиперболическому законам. Получено ее строгое решение, позволяющее прогнозировать перемещение фронта вытеснения и дебит нагнетательной скважины. На характерных примерах проанализированы особенности формирования трех зон в цилиндрической области фильтрации, нарастание потерь напора со временем.

Ключевые слова: напорная фильтрация, реагент, скважина, вязкость, строгое решение, вытеснение.

При разработке месторождений жидких углеводородов с применением обводняющих технологий нередко со временем складываются неблагоприятные для их добычи условия. Особенно интенсивно протекает фильтрационный процесс на выработанных участках и чаще всего в высокопроницаемых пропластках. Вместе с тем в пласте обычно имеются значительные запасы труднодоступных углеводородов. Действенным инструментом для их извлечения являются изоляционные технологии [1–5]. Благодаря им фильтрационное течение значительно осложняется именно в промытых зонах, которые обладают наибольшей пропускной способностью. На практике такие технологии реализуются закачкой в пласт специальных химических веществ (реагентов), которые обеспечивают через определенное время локальное внутрипластовое гелеобразование [6–8]. Таким образом, с помощью новообразованных барьеров, экранов удастся частично заблокировать вышеупомянутые пропластки. Как следствие, усиливается фильтрационный процесс на слабо проницаемых участках пласта, а значит и их отдача, повышается содержание полезной составляющей в забираемом скважиной флюиде. Подобные технологии, однако, имеют ряд серьезных недостатков. И прежде всего, следует отметить высокую стоимость, токсичность используемых реагентов, их чувствительность к большим температурам и давлениям. Поэтому особый ин-

интерес представляет прогноз распространения реагента в реальных условиях и вызываемых им изменений фильтрационного режима. Очевидно, что такой прогноз будет достоверным только при наличии надежной исходной информации о физических свойствах реагента и пласта. Ключевое значение здесь приобретают закономерности загустевания реагента и повышения его вязкости, которые должны устанавливаться из специальных экспериментов. В дальнейшем считается, что закачиваемый через совершенную скважину в однородный пласт реагент является ньютоновской жидкостью; вытеснение им жидкости происходит в соответствии с поршневой схемой, капиллярными силами можно пренебрегать. Следует подчеркнуть, что принятые допущения значительно упрощают постановки осесимметричной задачи вытеснения [9] и в итоге позволяют получить простой инструмент для оценки целенаправленных изменений фильтрационной обстановки в длительно разрабатываемом напорном пласте при закачке, например, гелеобразующих составов.

Поскольку, как правило, в пласт подается строго ограниченное количество реагента, то область фильтрации имеет форму цилиндрического слоя и фактически состоит из трех характерных зон. Естественно, что радиус внутренней цилиндрической поверхности равен радиусу скважины r_W . Внешняя же поверхность ($r = R_e$) является контуром разгрузки. Пусть к началу закачки реагента фильтрационный процесс был установившимся и сформировался при фиксированных понижениях напора на указанных границах (S_W, S_*). Следует отметить, что время закачки заданного объема реагента W существенно меньше характерного времени последующего фильтрационного процесса. Поэтому отсчет времени удобнее вести с момента, когда область фильтрации еще включает две зоны, а именно: $r_W \leq r \leq R_{ro}$ и $R_{ro} < r \leq R_e$, но весь реагент уже поступил в пласт. Тогда

$$R_{ro} = \sqrt{r_W^2 + \frac{W}{\pi n m}}, \quad (1)$$

где n — (эффективная) пористость пласта; m — его мощность. При последующей подаче в пласт жидкости со стабильными физическими свойствами в области фильтрации появляется и постепенно расширяется третья зона. Отмеченные особенности поршневой фильтрации трех несмешивающихся жидкостей (исходная, вторичная жидкости и реагент) отражены в следующем операторе граничных и начальных условий:

$$r = r_W, \quad S_i = S_0; \quad (2)$$

$$r = R_i, \quad S_i = S_r; \quad k_i \frac{\partial S_i}{\partial r} = k_r(t) \frac{\partial S_r}{\partial r}; \quad (3)$$

$$r = R_r, \quad S_r = S_e; \quad k_r(t) \frac{\partial S_r}{\partial r} = k_o \frac{\partial S_e}{\partial r}; \quad (4)$$

$$r = R_e, \quad S_e = S_*; \quad (5)$$

$$t = 0, \quad R_r = R_{r0}. \quad (6)$$

Здесь S_i, S_r, S_e — понижения напора соответственно в первой (с исходной жидкостью), второй (с реагентом) и третьей зонах; R_i, R_r — радиусы границ между первой и второй, второй и третьей зонами; k_o, k_r, k_i — коэффициенты фильтрации соответственно в первой, второй и

третьей зонах. Кроме того, на фронте вытеснения исходной жидкости принимается кинематическое условие

$$k_r(t) \frac{\partial S_r}{\partial r} + n \frac{dR_r}{dt} = 0. \quad (7)$$

Поскольку вязкость фильтрующейся жидкости тесно связана с коэффициентом фильтрации для данной среды и флюида, то конкретизировать закон изменения указанного коэффициента просто, установив аналогичный закон для вязкости (динамической или кинематической). Если отмеченные изменения обусловлены постепенным усилением связей между структурными элементами реагента и определяются временем его пребывания в пласте [10], то в рассматриваемом случае оправдано считать

$$k_r = k_r(t), \quad (8)$$

что и отражено в условиях (3), (4), (7).

Общее решение уравнений осесимметричной напорной фильтрации в жестком режиме и гидравлическом приближении применительно к трем выделенным зонам имеет такой вид [11, 12]:

$$S_{i,r,e}(r,t) = A_{i,r,e}(t) \ln r + B_{i,r,e}(t). \quad (9)$$

Из условий равенства расходов на внутренних границах следует

$$k_i A_i(t) = k_r(t) A_r(t) = k_0 A_e(t). \quad (10)$$

Из условий же равенства напоров здесь получено

$$A_e(t) = \frac{S_0 - S_*}{\ln \frac{r_W}{R_e} - \left(1 - \frac{k_0}{k_i}\right) \ln \frac{R_i(t)}{r_W} + \left[1 - \frac{k_0}{k_r(t)}\right] \ln \frac{R_r(t)}{R_i(t)}}. \quad (11)$$

Таким образом, функции понижений для первой и третьей зон будут

$$S_e(r,t) = S_* + A_e(t) \ln \frac{r}{R_e}, \quad (12)$$

$$S_i(r,t) = S_0 + \frac{k_0}{k_i} A_e(t) \ln \frac{r}{r_W}. \quad (13)$$

С использованием (7) и (9) составлено уравнение относительно R_r

$$n \frac{dR_r}{dt} = - \frac{k_r(t)}{R_r} A_r(t) = - \frac{k_0(S_0 - S_*)}{R_r \left\{ \ln \frac{R_e}{r_W} + \left(1 - \frac{k_0}{k_i}\right) \ln \frac{R_i(R_r)}{r_W} - \left[1 - \frac{k_0}{k_r(t)}\right] \ln \frac{R_r}{R_i(R_r)} \right\}}. \quad (14)$$

Здесь радиус R_i связан с искомым R_r такими соотношениями:

$$W = \pi n m (R_r^2 - R_i^2), \quad R_i = \sqrt{R_r^2 - \frac{W}{\pi n m}}. \quad (15)$$

Формально задача (6), (14), (15) заметно упрощается, если ввести относительные переменные и параметры следующим образом:

$$\bar{t} = \frac{k_0(S_0 - S_*)}{nr_W^2} t, \quad \bar{R}_{r,i,e} = \frac{R_{r,i,e}}{r_W}, \quad \bar{k}_{r,i} = \frac{k_{r,i}}{k_0}.$$

Тогда она принимает более удобный для теоретического анализа вид

$$\bar{R}_r \frac{d\bar{R}_r}{d\bar{t}} = \frac{1}{\ln \bar{R}_e + \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i}\right) \ln \bar{R}_i(\bar{R}_r) - \left[1 - \frac{1}{\bar{k}_r(\bar{t})}\right] \ln \frac{\bar{R}_r}{\bar{R}_i(\bar{R}_r)}}, \quad (16)$$

$$\bar{t} = 0, \quad \bar{R}_r = \bar{R}_{r0}, \quad (17)$$

где $\bar{R}_i = \sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}$, $\bar{W} = \frac{W}{\pi n m r_W^2}$. Решения задачи (16)–(17) при произвольной функции $\bar{k}_r(\bar{t})$ удается находить только численными методами. Вместе с тем можно получить строгие частные решения этой задачи, которые представляют практический интерес. Так, характерными для зависимостей вязкостей реагента и коэффициента фильтрации в насыщенной им зоне от времени являются экспоненциальная, линейная и гиперболическая формы. В таких случаях оправдано для $\bar{k}_r(\bar{t})$ принимать

$$\bar{k}_r(\bar{t}) = \bar{k}_{r0} e^{-\varphi \bar{t}}, \quad (18)$$

$$\bar{k}_r(\bar{t}) = \frac{\bar{k}_{r0}}{1 + \psi \bar{t}}. \quad (19)$$

Тогда задачу (16)–(17) можно свести к линейной относительно функции $\bar{t}(\bar{R}_r)$

$$\frac{d\bar{t}}{d\bar{R}_r} = \bar{R}_r \left\{ \ln \bar{R}_e + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i}\right) \ln (\bar{R}_r^2 - \bar{W}) - \left[1 - \frac{1}{\bar{k}_r(\bar{t})}\right] \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}} \right\}, \quad (20)$$

$$\bar{R}_r = \bar{R}_{r0}, \quad \bar{t} = 0. \quad (21)$$

Далее для $\bar{k}_r$ поочередно используются выражения (18) и (19). Пусть справедливо (18) и выполняется замена зависимой переменной

$$\tau = \int \bar{k}_r(\bar{t}) d\bar{t} = -\frac{\bar{k}_{r0}}{\varphi} e^{-\varphi \bar{t}}, \quad \bar{t} = -\frac{1}{\varphi} \ln \left(-\frac{\varphi}{\bar{k}_{r0}} \tau \right). \quad (22)$$

Уравнение относительно новой переменной и граничное условие будут

$$\frac{d\tau}{d\bar{R}_r} + \varphi \bar{R}_r \left[\ln \bar{R}_e + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i}\right) \ln (\bar{R}_r^2 - \bar{W}) - \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}} \right] = \bar{R}_r \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}}, \quad (23)$$

$$\bar{R}_r = \bar{R}_{r0}, \quad \tau = -\frac{\bar{k}_{r0}}{\varphi}. \quad (24)$$

Получить точные решения полной задачи (23), (24) в принципе несложно, однако, оно имеет громоздкий вид. Если принять два дополнительных допущения, которые отвечают реальным условиям, то указанное решение заметно упростится. Пусть начальная вязкость реагента совпадает с вязкостью вытесняемой жидкости ($k_{ro} = k_0, \bar{k}_{ro} = 1$), а исходная и вторичная жидкости имеют одинаковые вязкости ($k_i = k_0, \bar{k}_i = 1$). Действительно, обычно реагент является слабым раствором, а в практикуемых технологиях обводнения такими жидкостями является вода. Тогда новая переменная τ связана с $\bar{R}_r$ следующим образом:

$$\tau = \frac{1}{\phi} e^{-F(\bar{R}_r)} \left[\int_{\bar{R}_{ro}}^{\bar{R}_r} \xi \ln \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - \bar{W}}} e^{F(\xi)} d\xi - 1 \right]. \quad (25)$$

После ряда преобразований в (25) и обратной замены переменных была выведена зависимость между $\bar{t}$ и $\bar{R}_r$ в таком виде:

$$Y(\xi) = e^{-\frac{\phi}{4}\xi^2} (\xi^2 - \bar{W})^{\frac{\phi}{4}(\xi^2 - 2\bar{W})} \left(\frac{\xi}{\bar{R}_e} \right)^{-\frac{\phi}{4}\xi^2}, \quad (26)$$

где $Y(\xi) = e^{-\frac{\phi}{4}\xi^2} \cdot (\xi^2 - \bar{W})^{\frac{\phi}{4}(\xi^2 - 2\bar{W})} \cdot \left(\frac{\xi}{\bar{R}_e} \right)^{-\frac{\phi}{4}\xi^2}$.

Относительный расход нагнетательной скважины $\bar{q}$ в общем случае следует вычислять по формуле

$$\bar{q}(\bar{t}) = \frac{q(t)}{2\pi k_0 m (S_0 - S_*)} = \frac{\bar{k}_r(\bar{t})}{\bar{k}_r(\bar{t}) \ln \bar{R}_e + [1 - \bar{k}_r(\bar{t})] \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}}}, \quad (27)$$

и если справедливо выражение (18), то

$$\bar{q}(\bar{t}) = \frac{\bar{k}_{ro}}{\bar{k}_{ro} \ln \bar{R}_e + (e^{\phi \bar{t}} - \bar{k}_{ro}) \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}}}, \quad (28)$$

а в случае (19)

$$\bar{q}(\bar{t}) = \frac{\bar{k}_{ro}}{\bar{k}_{ro} \ln \bar{R}_e + (\psi \bar{t} + 1 - \bar{k}_{ro}) \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}}}.$$

Выражение (19) означает более медленное в сравнении с (18) загустевание реагента, а, следовательно, и более плавное изменение фильтрационных характеристик со временем. Если отказаться от второго из дополнительных допущений, так что $\bar{k}_i \neq 1$, то уравнение относительно времени $\bar{t}$ как функции от $\bar{R}_r$ принимает вид

$$\frac{d\bar{t}}{d\bar{R}_r} = \bar{R}_r \left[\bar{\psi} \bar{t} \ln \frac{\bar{R}_r}{\sqrt{\bar{R}_r^2 - \bar{W}}} + \ln \bar{R}_e + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i} \right) \ln (\bar{R}_r^2 - \bar{W}) \right]. \quad (29)$$

Его строгое решение будет

$$\bar{t} = \frac{1}{2} \bar{R}_r^{-\frac{\bar{\psi} \bar{R}_r^2}{2}} (\bar{R}_r^2 - \bar{W})^{\frac{\bar{\psi}}{4} (\bar{R}_r^2 - \bar{W})} \left[\ln \bar{R}_e \cdot Y_1(\bar{R}_r) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i} \right) Y_2(\bar{R}_r) \right], \quad (30)$$

где $Y_1(\bar{R}_r) = \int_{\bar{R}_{r0}^2}^{\bar{R}_r^2} \xi^{\frac{\bar{\psi} \xi}{4}} (\xi - \bar{W})^{-\frac{\bar{\psi}}{4} (\xi - \bar{W})} d\xi$, $Y_2(\bar{R}_r) = \int_{\bar{R}_{r0}^2}^{\bar{R}_r^2} \xi^{\frac{\bar{\psi} \xi}{4}} (\xi - \bar{W})^{-\frac{\bar{\psi}}{4} (\xi - \bar{W})} \ln(\xi - \bar{W}) d\xi$.

И наконец, как следует из (9)–(13), профили относительного понижения в пределах выделенных трех зон описываются зависимостями

$$\begin{aligned} \bar{S}_i(\bar{r}, \bar{R}_r) &= \frac{S_0 - S_i(r, R_r)}{S_0 - S_*} = \\ &= 2 \ln \bar{r} \left\{ 2 \bar{k}_i \ln \bar{R}_e + (\bar{k}_i - 1) \ln (\bar{R}_r^2 - \bar{W}) - \left[1 - \frac{1}{\bar{k}_r(\bar{t})} \right] \ln \frac{\bar{R}_r^2}{\bar{R}_r^2 - \bar{W}} \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_r(\bar{r}, \bar{R}_r) &= \frac{S_r(r, R_r) - S_*}{S_0 - S_*} = 2 \left[\frac{1}{\bar{k}_r(\bar{t})} \ln \frac{\bar{R}_r}{\bar{r}} + \ln \frac{\bar{R}_e}{\bar{R}_r} \right] \times \\ &\times \left\{ 2 \ln \bar{R}_e + \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i} \right) \ln (\bar{R}_r^2 - \bar{W}) - \left[1 - \frac{1}{\bar{k}_r(\bar{t})} \right] \ln \frac{\bar{R}_r^2}{\bar{R}_r^2 - \bar{W}} \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_e(\bar{r}, \bar{R}_r) &= \frac{S_e(r, R_r) - S_*}{S_0 - S_*} = \\ &= 2 \ln \frac{\bar{R}_e}{\bar{r}} \left\{ 2 \ln \bar{R}_e + \left(1 - \frac{1}{\bar{k}_i} \right) \ln (\bar{R}_r^2 - \bar{W}) - \left[1 - \frac{1}{\bar{k}_r(\bar{t})} \right] \ln \frac{\bar{R}_r^2}{\bar{R}_r^2 - \bar{W}} \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (33)$$

Приведенное решение поставленной прикладной задачи подземной гидродинамики позволяют не только надежно прогнозировать изменения фильтрационных характеристик (напор или понижение, расход, положение фронта вытеснения), но и отвечать на чисто практические вопросы. Например, можно обосновать такой алгоритм применения реагента, который бы обеспечил заданное снижение интенсивности фильтрационного процесса через определенное время и пр.

Проведенный аналитическими методами анализ действия нагнетательной скважины в напорном пласте после подачи в него реагента с изменяющейся во времени вязкостью ил-

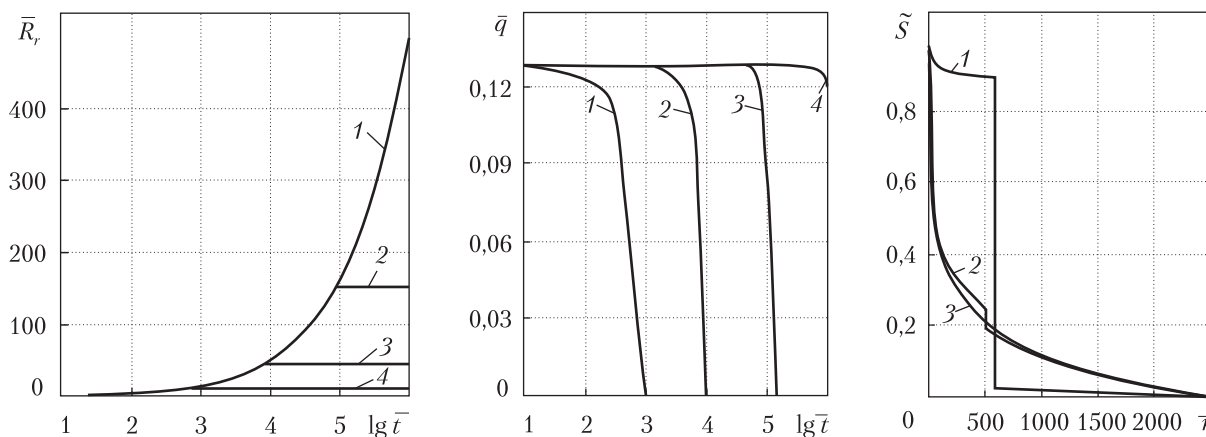


Рис. 1. Расширение зоны влияния нагнетательной скважины со временем: 1 — $\phi = 10^{-5}$, 2 — $\phi = 10^{-4}$, 3 — $\phi = 10^{-3}$, 4 — $\phi = 10^{-2}$

Рис. 2. Изменение относительного расхода нагнетательной скважины со временем: 1 — $\phi = 10^{-2}$, 2 — $\phi = 10^{-3}$, 3 — $\phi = 10^{-4}$, 4 — $\phi = 10^{-5}$

Рис. 3. Профили относительного понижения напора в зоне возмущения: 1 — $\bar{t} = 10^5$, 2 — $\bar{t} = 10^4$, 3 — $\bar{t} = 10^3$

люстрируется расчетами основных фильтрационных характеристик. Полагается, что структурирование реагента обуславливает уменьшение коэффициента фильтрации среды согласно (18), причем содержащийся в этом выражении параметр ϕ меняется на три порядка. Кроме того, заданы фиксированные значения $\bar{R}_e(2500)$ и $\bar{W}$ (10). Предметом расчетов стали относительные величины — радиус фронта вытеснения и расход скважины как функции от логарифма безразмерного времени, а также распределение и соответственно потери напора в области фильтрации на разные моменты времени.

На рис. 1 изображено семейство кривых зависимости радиуса $\bar{R}_r$ от $\lg \bar{t}$ при четырех значениях ϕ . При минимальном из выбранных значений ϕ загустевание реагента практически не сказывается на перемещении фронта вытеснения и фильтрационном процессе в целом. При больших значениях ϕ имеет место резкое торможение указанного фронта. Так, при максимальном ϕ радиус фронта достигает лишь значения 11,94, а фильтрация фактически прекращается уже при $\bar{t} = 10^3$. Четко отслеживается кризис упомянутого процесса на рис. 2, где показано снижение $\bar{q}$ со временем при тех же значениях ϕ . Исходный расход ϕ (0,128) сохраняется некоторое время, которое существенно зависит от ϕ , а затем он падает до 0, что свидетельствует о превращении второй в непроницаемый для жидкости экран. Как следствие, соотношение между вкладами трех зон в общие потери напора ($S_0 - S_*$) со временем кардинально меняются. На рис. 3 демонстрируется изменение понижения напора от скважины до границы разгрузки потока на раннем (кривые 2, 3) и позднем (кривая 1) этапах. Сначала потери напора сосредоточены в первой и третьей зонах, но по истечении достаточно большого времени, несмотря на значительное истончение второй зоны, ее гидравлическое сопротивление настолько вырастает, что именно в ней теперь в основном и теряется механическая энергия.

Подытоживая, прежде всего, следует отметить, что сформулированная выше математическая задача в принципе правильно отражает особенности протекания фильтрационного

процесса в специфических условиях, когда пропускная способность пористой среды существенно меняется. Ее строгое решение оправдано и легко использовать в инженерной практике и в первую очередь на длительно разрабатываемых месторождениях углеводородов, способствуя повышению их отдачи. Расчеты характерных примеров подтвердили большие возможности реагентов с растущей вязкостью в регулировании фильтрационного режима напорных пластов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов А.Ш., Газизов А.А. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений на основе ограничения движения вод в пластах. Москва: ООО “Надра-Бизнесцентр”, 1999. 285 с.
2. Ленченкова Л.Е. Повышение нефтеотдачи пластов физико-химическими методами. Москва: Недра, 1999. 394 с.
3. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи. Москва: Недра, 1985. 308 с.
4. Швецов И.А., Манырин В.Н. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов. Анализ и проектирование. Самара: Рос. представительство акционерной компании “Ойл технолоджи оверсиз продакшн лимитед”. 2000. 350 с.
5. Thomas S., Farouq Ali S.M. Status and assessment of chemical oil recovery methods. *Energy Sources*. 1999. № 21. P. 177–189.
6. Клещенко И.И., Ягафаров А.К., Гейхман М.Г. Составы для ограничения водопритоков в нефтяные и газовые скважины. *Нефть и газ*. 2003. № 3. С. 58–63.
7. Шувалов С.А., Винокуров В.А., Хлебников В.Н. Применение полимерных реагентов для увеличения нефтеотдачи пласта и водоизоляции. *Труды РГУ нефти и газа И.М.Губкина*. 2013. № 4. С. 57–61.
8. Dunenova A.A., Oryngozhin E.S. Chemical reagents for increasing the water flooding efficiency in oil reservoirs. *Int. J. Chem. Sci.* 2015. 13(4). P. 1666–1672.
9. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. Москва: Наука, 1969. 545 с.
10. Таирова С.В. Гелеобразующие составы как метод повышения нефтеотдачи пластов. *Вестн. нефтепользователя Ханты-Мансийского автономного округа*. 2002. № 8. С. 55–62.
11. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. Москва: Наука, 1977. 664 с.
12. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. Москва: Гостехиздат, 1963. 396 с.

Поступило в редакцию 06.03.2017

REFERENCES

1. Gazizov, A. Sh. & Gazizov, A. A. (1999). Rize of oil field exploitation efficiency on the basis of water movement restriction in reservoirs, Moscow: ООО “Nedra-Biznestsentr” (in Russian).
2. Lenchenkova, L. E. (1999). Increase of reservoirs oil output by physico-chemical methods, Moscow: Nedra (in Russian).
3. Surguchev, M. L. (1985). Secondary and tertiary methods of oil output increase, Moscow: Nedra (in Russian).
4. Shvetsov, I. A. & Manyrin, V. N. (2000). Physico-chemical methods of oil output increase. Analysis and design, Samara: Russian delegation of share company “Oil technology production limited (in Russian).
5. Thomas, S. & Farouq, Ali. S. M. (1999). Status and assessment of chemical oil recovery methods. *Energy Sources*, No. 21, pp. 177-189.
6. Kleschenko, I. I. Yagafarov, A. K. & Geykhman, M. G. (2003). Compositions for restriction of water inflow to oil and gas wells. *Oil and Gas*, No. 3, pp. 58-63 (in Russian).
7. Shuvalov, S. A., Vinokurov, V. A. & Khlebnikov, V. N. (2013). Application of polymeric reagents to increase both the oil recovery of a stratum and the hydraulic seal. *Proceedings PSU Oil and Gas by I.M. Gubkin*, No. 4 (in Russian).
8. Dunenova, A. A. & Oryngozhin, E. S. (2015). Chemical reagents for increasing the water flooding efficiency in oil reservoirs. *Int. J., Chem. Sci.*, 13(4), pp. 1662-1672.
9. Advances in the groundwater flow theory in USSR. (1969). Moscow: Nauka (in Russian).

10. Tairova, S. V. (2002). Gel-forming compositions as a means to increase the oil recovery of strata. Bulletin of mineral resources user of Hanty-Mansiysk autonomous area, No. 8, pp. 55-62 (in Russian).
11. Polubarinova-Kochina, P. Ya. (1977). Theory of groundwater flow, Moscow: Nauka (in Russian).
12. Charny, I. A. (1963). Underground hydrogasdynamics, Moscow: Gostoptekhizdat (in Russian).

Received 06.03.2017

В.Л. Поляков

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

E-mail: polyakov_igm@list.ru

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ КОМПАКТНОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РЕАГЕНТА,
ЩО ЗАГУСАЄ, У ПЛОСКОРАДІАЛЬНОМУ ФІЛЬТРАЦІЙНОМУ ПОТОЦІ

Сформульовано математичну задачу розповсюдження в напорному пласті флюїда (реагента), який не змішується з пластовою рідиною і в'язкість якого змінюється в залежності від часу перебування в пористому середовищі згідно з експоненціальним або гіперболічним законами. Одержано її строгий розв'язок, який дозволяє прогнозувати переміщення фронту витіснення і дебіт нагнітальної свердловини. На характерних прикладах проаналізовано особливості формування трьох зон в циліндричній області фільтрації, зростання втрат напору з часом.

Ключові слова: напірна фільтрація, реагент, свердловина, в'язкість, строгий розв'язок, витіснення.

V.L. Polyakov

Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: polyakov_igm@list.ru

ON MODELING THE COMPACT SPREAD
OF A THICKENING REAGENT IN A PLANE-RADIAL FILTRATION FLOW

A mathematical task of the immiscible fluid (reagent) spreading within a head reservoir is posed. Its viscosity depends on the residence time by the exponential or hyperbolic law. The exact solution is obtained to predict the plug flow displacement and injection well discharge. The specific features of the formation of three zones in a cylindrical flow field and a growth of losses of the head in time are analyzed by a number of examples.

Keywords: forcing filtration, reagent, well, viscosity, exact solution, displacement.