

УДК 532.546+536.42

© 1997 г. К.М. ФЕДОРОВ

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИН

Работа посвящена проблеме гелевого воздействия на призабойную зону слоисто-неоднородного пласта с целью снижения водопритока. Рассматриваются две технологии гелеобразования в пласте: за счет температурного инициирования и каталитической реакции. Сформулирована математическая модель процесса в рамках неизотермической фильтрации многокомпонентной жидкости в слоестом пласте. В случае слабой гидродинамической связи пропластков проблема сводится к решению одномерных осесимметричных задач в каждом пропластке. В линейном приближении получены аналитические выражения для распределения гелевого осадка в каждом пропластке. Анализируются также методы оценки эффективности гелевого воздействия на пласт.

Проблема водоизоляции добывающих скважин в неоднородных нефтяных пластах решается обычно следующим образом. В призабойную зону скважин закачивается небольшой объем (оторочка) реагента (низкомолекулярного полимера, силиката натрия или других), который в результате нагревания или соответственно подобранной рН (кислотно-щелочного баланса) в пласте полимеризуется, осаждается на скелет пористой среды и тем самым снижает его проницаемость. В силу того что наибольшее количество реагента попадает в наиболее проницаемые пропластки, там и образуются слабopроницаемые области – барьеры. В результате блокирования высокопроницаемых зон и каналов происходит снижение обводненности добываемой продукции.

Большее внимание в исследуемой проблеме было уделено химии процессов полимеризации и гелеобразования [1–3], исследованию эффективности процесса в рамках многомерных математических моделей [4–6] и, конечно же, опытно-промышленным испытаниям метода [7–10].

Как показали расчеты по многомерным численным моделям фильтрации, на формирование гелевых барьеров в призабойной зоне скважин слабо влияет вертикальная проницаемость пласта. Этот факт указывает на то, что процесс может быть удовлетворительно описан набором решений одномерных осесимметричных задач для каждого пропластка. В рамках такого подхода в работе получены аналитические решения, которые могут служить для анализа основных особенностей процесса и совершенствования его технологии, а также базой для создания инженерной методики расчета процесса и прогнозирования результатов его воздействия на призабойную зону вблизи добывающей скважины.

1. Постановка задачи. Рассматривается задача многокомпонентной осесимметричной фильтрации несжимаемой жидкости (воды) в недеформируемой пористой среде. Жидкость может содержать три компонента: 1) полимеризующийся реагент, 2) катализатор и 3) собственно воду. Температурное поле в пористой среде распространяется за счет потока жидкости (теплопроводностью среды и тепловыми потерями в вертикальном направлении пренебрегается), температуры фаз выравниваются мгновенно (однотемпературное приближение). Полимеризующийся реагент может обратимо ад-

сорбироваться и необратимо осаждаться в результате реакции полимеризации. Реакция полимеризации основана на температурном или кислотном катализе, т.е. в результате этой реакции не происходит заметного потребления катализатора и поглощения теплоты.

Система уравнений, описывающих этот процесс, включает в себя уравнения сохранения масс компонентов, закон Дарси и уравнение притока тепла

$$\begin{aligned} m\rho_w \frac{\partial c_1(1-a)}{\partial t} + m\rho_w \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rc_1(1-a)v_w) &= -Jm\rho_w - (1-m)\rho_r \frac{\partial a_s}{\partial t} \\ m\rho_w \frac{\partial c_2(1-a)}{\partial t} + m\rho_w \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rc_2(1-a)v_w) &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$m\rho_w \frac{\partial}{\partial t}(1-c_1-c_2)(1-a) + m\rho_w \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r(1-c_1-c_2)(1-a)v_w) = 0$$

$$m\rho_p \frac{\partial a}{\partial t} = Jm\rho_w$$

$$(1-a)mv_w = -\frac{k}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} H(T-T_0) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rH_w(T-T_0)v_w) = 0 \quad (1.3)$$

Здесь c_1, c_2 – концентрации полимеризующегося компонента и катализатора; a, a_s , J – концентрация продукта полимеризации в поровом пространстве, концентрация адсорбированного реагента на скелете пористой среды и скорость реакции полимеризации; $m, \rho_r, \rho_w, \rho_p, k, p$ – пористость, плотности скелета, жидкости и реагента, абсолютная проницаемость среды, давление; v_w, μ_w, H_w – скорость, вязкость и объемная теплоемкость жидкости, H, T – объемная теплоемкость насыщенной пористой среды и температура.

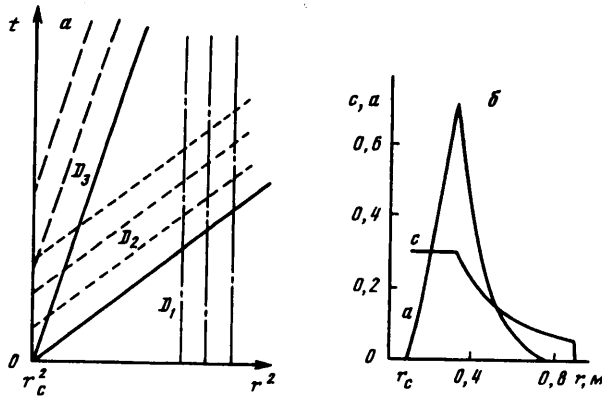
Система уравнений (1.1) – (1.3) замыкается заданием законов: Козени–Кармана, кинетического закона реакции и изотермы равновесной адсорбции

$$k = k_0(1-a)^n, \quad J = Kc_1^s \exp(-E/RT)c_2^l, \quad a_s = \Gamma c_1 \quad (1.4)$$

Здесь используются стандартные термодинамические обозначения: E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, K – предэкспоненциальный множитель, Γ – константа Генри. Анализ первых двух законов обсуждается для конкретного реагента – карбамидоформальдегидной смолы в [3], для реагента – полиакриламида данные по константе Генри можно найти в [11].

Анализ процессов проводится при следующих допущениях: плотность жидкости близка к плотности реагента $\rho_w \cong \rho_p$, массой адсорбированного реагента пренебрегается в уравнении сохранения массы всей жидкости, объемная теплоемкость насыщенной пористой среды считается константой $H = \text{const}$, процесс формирования водоизолирующих барьеров анализируется в линейном приближении $c_1 a \ll c_1$.

2. Полимеризация в пористой среде в результате температурного катализа. Рассматривается процесс, в котором полимеризация реагента и формирование зоны пониженной проницаемости происходят за счет нагревания реагента в пористой среде. Примером такого процесса может служить полимеризация карбамидоформальдегидной смолы [3]. Если водный раствор этой смолы устойчив при нормальной температуре, то при температуре выше 60°C происходит необратимое образование твердой или упругой массы за десятки минут. Пусть раствор смолы с концентрацией $c_1 = c_{10}$ и температурой T_1 ($T_1 \ll 100^\circ\text{C}$) закачивается в пласт с температурой T_0 ($T_0 \approx 100^\circ\text{C}$). В этом случае общая система уравнений (1.1) – (1.4)



Фиг. 1. Решение задачи о гелеобразовании в пропластке в результате температурного инициирования реакции: *a* – характеристические линии, определяемые уравнениями (3.2); *б* – распределение концентрации гелеобразующего реагента (*c*) и продукта реакции гелеобразования (*a*) на момент окончания закачки оторочки реагента

сводится к следующей:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{QH_w}{\pi mhH} \frac{\partial T}{\partial r^2} = 0, \quad \frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{Q}{\pi hmG} \frac{\partial c_1}{\partial r^2} = -\frac{J}{G} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = J = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) c_1^s, \quad c_2 = c_{20}, \quad G = 1 + \frac{(1-m)\rho_r \Gamma}{m\rho_w}, \quad A = Kc_2^1$$

где Q – расход жидкости, подаваемой в скважину радиуса r_c , h – мощность пласта. Сформулированная выше задача Коши имеет вид

$$\begin{aligned} t = 0: & \quad c_1 = 0, \quad T = T_0, \quad a = 0; \\ t > 0, \quad r = r_c: & \quad c_1 = c_{10}, \quad T = T_1, \quad a = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Характеристическая форма уравнений (2.1) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dr^2}{dt} = \frac{QH_w}{\pi mhH}, \quad \frac{dT}{dt} = 0; \quad \frac{dr^2}{dt} = \frac{Q}{\pi hmG}, \quad \frac{dc_1}{dt} = -\frac{J}{G} \\ \frac{dr^2}{dt} = 0, \quad \frac{da}{dt} = J \end{aligned} \quad (2.3)$$

Некоторые характеристические линии в $(t - r^2)$ плоскости приведены на фиг. 1а. На этом рисунке пунктирные линии – характеристики первого типа (первого уравнения) системы (2.3), сплошные – второго и штрихпунктирные линии – третьего типа этой системы уравнений. На этой плоскости можно выделить три характерных сектора, разделенных характеристическими линиями первых двух типов, выходящими из точки $(0, r_c^2)$. Используя начальные условия (2.2), можно проинтегрировать и условия вдоль характеристик в этих секторах. Интегрирование первого уравнения показывает

$$(r, t) \in D_1, D_2: T = T_0; \quad (r, t) \in D_3: T = T_1$$

Интегрирование условия на характеристиках второго типа системы (2.3) приводит к следующим формулам:

$$(r, t) \in D_1: c_1 = 0$$

$(r, t) \in D_2$:

$$c_1 = \left[c_{10}^{1-s} + \frac{(s-1)A \exp(-E/RT_0)}{Q(1-GH_w/H)} \left(\pi m h (r^2 - r_c^2) - t \frac{H_w}{H} \right) \right]^{1/(1-s)} \quad (2.4)$$

$(r, t) \in D_3$: $c_1 = c_{10}$

Далее для упрощения выкладок принимается, что $A \exp(-E/RT_1) \rightarrow 0$, т.е. реагент не вступает в реакцию при температуре закачиваемой жидкости (T_1). Результат интегрирования последнего условия приводит к формулам зависимости концентрации осажденного реагента от радиуса в произвольный момент времени t

$$r^2 - r_c^2 < \frac{tQH_w}{\pi m h H}:$$

$$a = \left(\frac{H}{H_w} - G \right) \left\{ c_{10} - \left[c_{10}^{1-s} + \frac{(s-1)A \exp(-E/RT_0)(r^2 - r_c^2)\pi m h}{Q} \right]^{1/(1-s)} \right\}$$

$$\frac{tQH_w}{\pi m h H} \leq r^2 - r_c^2 \leq \frac{tQ}{\pi m h G}: \quad (2.5)$$

$$a = \left(\frac{H}{H_w} - G \right) \left\{ \left[c_{10}^{1-s} + \frac{(s-1)A \exp(-E/RT_0)}{(1-GH_w/H)} \left(\frac{(r^2 - r_c^2)\pi m h}{Q} - t \frac{QH_w}{H} \right) \right]^{1/(1-s)} - \left[c_{10}^{1-s} + \frac{(s-1)A \exp(-E/RT_0)(r^2 - r_c^2)\pi m h}{Q} \right]^{1/(1-s)} \right\}$$

$$r - r_c^2 > \frac{tQ}{\pi m h G}: a = 0$$

Рассмотрим пример конкретной технологии – закачки в пласт оторочки реагента с последующей остановкой закачки и выдержкой в течение значительного времени. В этом случае распределение концентрации осадка имеет вид

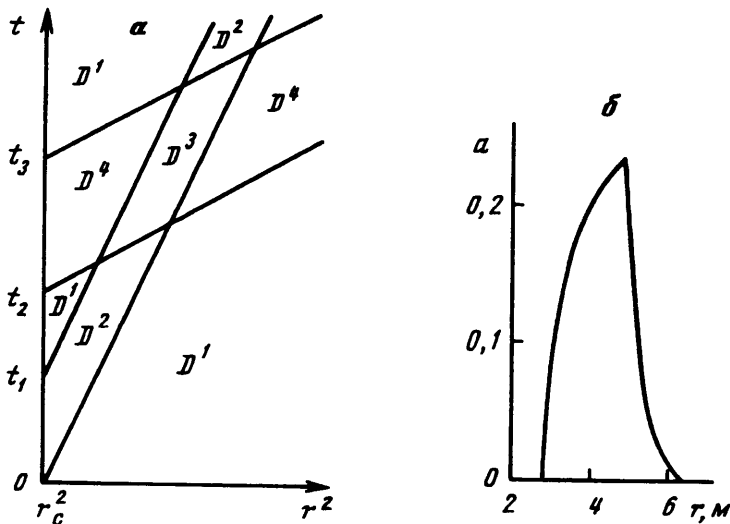
$$a^*(r) = a \left(\frac{V_s}{Q}, r \right) + c_1 \left(\frac{V_s}{Q}, r \right) \quad t \rightarrow \infty \quad (2.6)$$

где V_s – объем оторочки реагента, а V_s/Q – время его закачки; a определяется формулой (2.5) при $t = V_s/Q$, c_1 определяется по формуле (2.4) также при $t = V_s/Q$. Окончательное распределение осадка в пласте (a) и концентрации реагента (c_1) после закачки в пласт 10 м^3 реагента приведено на фиг. 1, б при следующих значениях параметров:

$$h = 10 \text{ м}, \quad Q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad r_c = 0,1 \text{ м}, \quad \frac{H_w}{H} = 8,5, \quad G = 5, \quad V_s = 10 \text{ м}^3$$

$$A \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) = 0,003 \text{ ч}^{-1}, \quad c_{10} = 0,3, \quad m = 0,2, \quad s = 1$$

3. Гелеобразование в пористой среде в результате кислотного катализа. Рассматривается процесс полимеризации или гелеобразования в пористой среде, когда катализатором реакции является кислота. Примером могут служить выпадение осадка из силиката натрия, сшивание низкомолекулярного полимера ионами многовалентных металлов, а также полимеризация уже упомянутой карбамидо-формальдегидной смолы. Таким образом, рассматривается пример, в котором температура не изменяется, $T = \text{const}$, но изменяется концентрация второго компонента – кислоты.



Фиг. 2. Решение задачи о гелеобразовании в пропластке в результате каталитического типа реакции: а – траектории движения оторочек гелеобразующего реагента и катализатора (характеристики); б – окончательная ($t = \infty$) конфигурация гелевого барьера в пористой среде

Задача Коши в данном случае имеет вид

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{Q}{\pi mhG} \frac{\partial c_1}{\partial r^2} = -\frac{J}{G}, \quad \frac{\partial c_2}{\partial t} + \frac{Q}{\pi mh} \frac{\partial c_2}{\partial r^2} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = J = Bc_1^s, \quad T = \text{const}, \quad B = c_2^1 K \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$t = 0: c_1 = c_2 = a = 0$$

$$r = r_c, \quad t < t_1: c_1 = c_{10}, \quad c_2 = 0; \quad t_1 \leq t \leq t_2: c_1 = c_2 = 0$$

$$t_2 < t \leq t_3: c_2 = c_{20}, \quad c_1 = 0; \quad t > t_3: c_1 = c_2 = 0$$

где $t_1, t_2 - t_1$ и $t_3 - t_2$ – время закачки оторочек реагента, буферной воды и катализатора, объемы оторочек равны соответственно V_{s1}, V_{s2}, V_{s3} .

Характеристическая форма уравнений (3.1) имеет вид

$$\frac{dr^2}{dt} = \frac{Q}{\pi mhG}, \quad \frac{dc_1}{dt} = -\frac{J}{G}; \quad \frac{dr^2}{dt} = \frac{Q}{\pi mh}, \quad \frac{dc_2}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{dr^2}{dt} = 0, \quad \frac{da}{dt} = J$$

Характеристические линии, определяемые первыми двумя уравнениями системы (3.2) и выходящие из точек $(0, r_c^2)$, (t_1, r_c^2) , (t_2, r_c^2) , (t_3, r_c^2) , делят плоскость $(t - r^2)$ на характерные области, показанные на фиг. 2, а. В силу зависимости скорости реакции (J) от концентрации обоих реагентов можно заключить, что реакция может протекать лишь в области 3. В других областях интегрирование условий на характеристиках тривиально

$$(r, t) \in D^1: c_1 = c_2 = 0; \quad (r, t) \in D^2: c_1 > 0, \quad c_2 = 0; \quad (r, t) \in D^4: c_1 = 0, \quad c_2 = c_{20}$$

В третьей выделенной области интегрирование первого уравнения системы (3.2) приводит к формуле

$$c_1 = \left[c_{10}^{1-s} + \frac{(s-1)B}{(G-1)} \left(t - t_2 - \frac{(r^2 - r_c^2)\pi mh}{Q} \right) \right]^{1/(1-s)} \quad (3.3)$$

Гелеобразование и осаждение в пласте прекращаются в момент времени t_* (фиг. 2, а), поэтому во все последующие моменты времени распределение осадка a постоянно и не зависит от времени. Интегрирование последнего уравнения системы (3.2) в области D^3 приводит

$$\begin{aligned} r^2 - r_c^2 &\leq \frac{V_{s2}}{\pi mh(G-1)}: a = 0 \\ \frac{V_{s2}}{\pi mh(G-1)} &< r^2 - r_c^2 \leq \frac{V_{s2} + V_{s3}}{\pi mh(G-1)}: \\ a &= (G-1) \left\{ c_{10} - \left[c_{10}^{1-s} + \frac{B(s-1)}{Q} \left(\pi mh(r^2 - r_c^2) - \frac{V_{s2}}{G-1} \right) \right]^{1/(1-s)} \right\} \\ \frac{V_{s2} + V_{s3}}{\pi mh(G-1)} &< r^2 - r_c^2 \leq \frac{V_{s1} + V_{s2}}{\pi mh(G-1)}: a = (G-1) \left\{ c_{10} - \left[c_{10}^{1-s} + \frac{B(s-1)V_{s3}}{(G-1)Q} \right]^{1/(1-s)} \right\} \\ \frac{V_{s1} + V_{s2}}{\pi mh(G-1)} &< r^2 - r_c^2 \leq \frac{V_{s1} + V_{s2} + V_{s3}}{\pi mh(G-1)}: \\ a &= (G-1) \left\{ \left[c_{10}^{1-s} + \frac{B(s-1)}{Q} \left(\pi mh(r^2 - r_c^2) - \frac{V_{s1} + V_{s2}}{G-1} \right) \right]^{1/(1-s)} - \right. \\ &\quad \left. - \left[c_{10}^{1-s} + \frac{B(s-1)V_{s3}}{(G-1)Q} \right]^{1/(s-1)} \right\} \\ r^2 - r_c^2 &> \frac{V_{s1} + V_{s2} + V_{s3}}{\pi mh(G-1)}: a = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Распределение осажденного реагента в пласте приведено на фиг. 2, б при тех же значениях параметров пласта, что и в предыдущем разделе, а также

$$B = 0,003\text{ч}^{-1}, c_{20} = 0,3, V_{s1} = 80, V_{s2} = 40, V_{s3} = 80M^3, s = 2, l = 2$$

4. Обобщение полученных результатов на случай многослойного пласта. Полученные ранее выражения для концентрации реагента в жидкости и осажденного в поровом пространстве содержат следующие характеристики пропластков: $Q, m, V_s, V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$. Расчет этих величин для каждого пропластка в случае многослойного пласта проводится в рамках принятых ранее допущений. В этом случае расход жидкости, подаваемой в каждый пропласток, постоянный и связан с общим расходом жидкости, подаваемой в скважину, по формуле

$$Q_i = Q \frac{k_i h_i}{\mu_i} / \sum_{j=1}^N \frac{k_j h_j}{\mu_j} \quad (4.1)$$

где Q – общий расход жидкости, закачиваемой в пласт; Q_i – расход, поступающий в i -й пропласток (N – общее количество пропластков). В (4.1) учет обводненности пропластков осуществляется через вязкость жидкости в i -м пропластке.

Аналогичные распределения можно получить и для объемов реагента, попадающих в i -й пропласток

$$V_{si} = V_s \frac{k_i h_i}{\mu_i} / \sum_{j=1}^N \frac{k_j h_j}{\mu_j} \quad (4.2)$$

Изменение проницаемости пропластков после осаждения реагента учитывается по формуле Козени–Кармана

$$k_i = k_{0i}(1 - a_i)^n \quad (4.3)$$

где k_{0i} – исходная проницаемость пропластка.

Эффективность водоизоляционных мероприятий можно оценить двояким образом. Первый, более точный, связан с расчетом скин-эффекта в скважине после воздействия с учетом (4.3) для каждой расчетной ячейки по вертикали (как правило, толщина ячеек совпадает с толщиной выделяемых пропластков) и численными расчетами эффективности воздействия с использованием многомерных моделей. Второй, оценочный, основан на обобщении формулы Дюпюи в прослоях с учетом неоднородной проницаемости (4.3).

Представленный метод анализа водоизоляционных мероприятий имеет самостоятельную методологическую ценность. Проблема разбивается на две задачи: первая – определение конфигурации и плотности гелевого барьера и скин-эффекта для скважины после воздействия, вторая – оценка эффективности обработки с использованием уже стандартных многомерных моделей фильтрации с учетом полученного скин-эффекта. Попытки решать прямым образом всю проблему в рамках моделей многомерной многокомпонентной фильтрации не выдерживают критики. Грубые численные сетки приводят к тому, что осаждение реагента происходит только в одной ячейке и масса осажденного вещества равномерно "размазывается" по ячейке. Все это приводит к тому, что за рамками исследования остаются такие эффекты, как влияние кинетики реакции, конфигурации гелевого барьера и т.п. на эффективность такого воздействия.

Заключение. Построена простая математическая модель процесса гелеобразования в призабойной зоне скважины в слоисто-неоднородном нефтяном пласте. Получено аналитическое решение задачи. Предложенная схема расчета и анализа процесса может служить основой инженерных методик проектирования и анализа эффективности геолого-технических мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seright R.S., Martin F.D.* Impact of gelation pH, rock permeability, and lithology on the performance of a monomer based gel // SPE Reservoir Engineering. 1993. V. 8. № 1. P. 43–50.
2. *Hubbord S., Roberts L.J., Sorbie K.S.* Experimental and theoretical investigation of time setting polymer gels in porous media // SPE Reservoir Engineering. 1988. V. 3. № 4. P. 1257–1267.
3. *Исмагилов Т.А., Федоров К.М., Пичугин О.Н., Игдавлетова М.З.* Кинетика полимеризации термореактивного полимера КФ-Ж, используемого для изоляции обводненных пропластков // НТЖ Нефтепромышленное дело. 1995. № 8–10. С. 45–47.
4. *Gao H.W., Chang M.M., Burchfield T.E., Tham M.K.* Permeability modification simulator studies of polymer – gel – treatment initiation time and crossflow effect on waterflood oil recovery // SPE Reservoir Engineering. 1993. V. 8. № 3. P. 221–227.
5. *Scott T., Roberts L.J., Sharpe S.R. et al.* Insitu gel calculations in complex reservoir system using a new chemical flood simulator // SPE Reservoir Engineering. 1987. V. 2. № 4. P. 634–646.
6. *Зубков П.Т., Федоров К.М.* Механизм формирования высоковязких барьеров в неоднородных нефтяных пластах // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 2. С. 98–103.
7. *Avery M.R., Sutphen J.A.* Field evaluation of production well treatments in kansas using a cross-linked cationic polymer gel // Proc. 8 Tertiary Oil Recovery Conf., Wichita, Kansas. 1991. V. 11. P. 31–42.

8. *Маляренко А.В., Земцов Ю.В.* Методы селективной изоляции водопритоков в нефтяных скважинах и перспективы их применения на месторождениях Западной Сибири // Обзорная инфор. Сер. Нефтепромысловое дело. М.: ВНИИОЭНГ, 1987. Вып. 1. 34 с.
9. *Комисаров А.И., Газиев К.Ю.* Применение силикатных составов для ограничения водопритоков из глубокозалегающих пластов // Нефт. хоз-во. 1992. № 8. С. 13–15.
10. *Парасюк А.В., Галанцов И.Н., Суханов В.Н. и др.* Гелеобразующие композиции для выравнивания профиля приемистости и селективной изоляции водопритока // Нефт. хоз-во. 1994. № 2. С. 64–68.
11. *Полищук А.М., Суркова Е.М.* Эффективность вытеснения нефти из пористой среды полимерными растворами // Нефт. хоз-во. № 4. С. 50–53.

Тюмень

Поступила в редакцию
15.II.1996