

УДК 532.546

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХРАЗВЕТВЛЕННЫХ НАНОКОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ

© 2023 г. В. В. Кадет^{а, *}, И. В. Васильев^{а, **}

^аРоссийский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

*e-mail: kadet.v@gubkin.ru

**e-mail: vas.ivn@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 23.07.2023 г.

Рассмотрены механизмы взаимодействия наноконплексов различного строения с поверхностью порового пространства при фильтрационном течении полимерных растворов. Дан сравнительный анализ влияния этих механизмов на поведение фильтрационно-емкостных характеристик нефтенасыщенного коллектора. Показана более высокая эффективность использования полимеров со сверхразветвленными наноагрегатами для повышения нефтеотдачи продуктивных пластов.

Ключевые слова: течение полимерных растворов в пористой среде, сверхразветвленные наноагрегаты, адсорбция частиц взвеси, адсорбция частиц эмульсии, теория перколяции, относительные фазовые проницаемости, коэффициент нефтеотдачи

DOI: 10.31857/S0040357123050093, EDN: MENMSW

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов повышения нефтеотдачи, применяемых в настоящее время, является метод полимерного воздействия или полимерного заводнения. В основном он реализуется на месторождениях высоковязкой нефти. Данная технология является эффективным способом разработки нефтяных месторождений, которая позволяет повысить нефтеотдачу на 5–20% [1–5]. Идея метода состоит в том, что добавление полимера в закачиваемую воду существенно повышает эффективную вязкость вытесняющего агента, что должно приводить к повышению коэффициента вытеснения нефти [1–7].

Наряду с этим в процессе вытеснения нефти полимерными растворами происходит изменение фильтрационно-емкостных характеристик коллектора, которыми обычно пренебрегают в расчетах полимерного воздействия. Однако в процессе течения раствора полимера в пористой среде происходит как застревание частиц полимера в капиллярах пористой среды, так и осаждение их на стенках капилляров коллектора вследствие адсорбции на скелете породы [8]. Результатом данных процессов является перестройка структуры порового пространства, которая приводит к изменению как абсолютной проницаемости среды, так и относительных фазовых проницаемостей (ОФП) по нефти и воде.

В настоящее время ведутся работы по созданию материалов, позволяющих максимально эффективно использовать оба эффекта при применении полимерного заводнения: увеличивать эффективную вязкость при неизменной концентрации частиц и влиять на характер взаимодействия частиц с поверхностью порового пространства коллектора. Так, научно-исследовательский институт передовых энергетических материалов Нинбо Фэнчэн [9] пошел по пути разработки реагента сложного состава со сверхразветвленными наноконплексами для вытеснения нефти из неоднородных коллекторов с низкопроницаемыми участками.

Особенности движения таких наноагрегатов в пористой среде изучены еще слабо. Целью настоящей работы является разработка модели, позволяющей учесть влияние процесса взаимодействия наноагрегатов различного типа с поверхностью пористой среды на изменение ее фильтрационно-емкостных параметров. Это, в свою очередь, позволит сравнить эффективность применения классических полимеров и полимеров со сверхразветвленными наноагрегатами в технологии полимерного заводнения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Поведение вязкости полимерной системы и ее влияние на эффективность технологии. Основное внимание до настоящего времени уделялось ис-

следованию возможности повышения эффективности метода полимерного заводнения прежде всего за счет увеличения вязкости вытесняющего агента.

В растворе классического полимера его макромолекулы, представляющие собой мономеры, группируются в субъединицы — так называемые полимерные клубки. В приближении Кирквуда, в гидродинамическом плане они ведут себя как совокупность непроницаемых сфер некоего радиуса [10]. Таким образом, с макроскопической точки зрения гидродинамика классических полимеров есть гидродинамика взвеси.

Все известные соотношения, полученные для расчета вязкости взвеси (Эйнштейна, Смолуховского, Бэтчелора), демонстрируют ее прямую зависимость от объемной концентрации частиц c .

Например, формула Флори–Хаггинса, полученная в рамках обобщения теории Эйнштейна, представляет собой полином третьей степени, связывающий вязкость раствора полимера μ_1 и исходную вязкость воды μ_1 [11–14]:

$$\mu_1(c) = \mu_1(1 + b_1c + b_2c^2 + b_3c^3), \quad (1)$$

где константы b_1 , b_2 , b_3 являются эмпирическими аппроксимационными коэффициентами, получаемыми для каждого конкретного полимера.

Оценим изменение коэффициента извлечения нефти в безводный период за счет изменения вязкости при закачке раствора полимера, считая остальные параметры процесса постоянными.

Коэффициент безводной нефтеотдачи (КБН) определяется соотношением:

$$E_H = \frac{\bar{S} - S_0}{1 - S_0},$$

где S_0 — начальная водонасыщенность, $\bar{S}$ — средняя водонасыщенность пласта в безводный период.

Величина $\bar{S}$ определяется при этом поведением функции Бакли–Лeverетта [15, 16]:

$$F(S) = \frac{k_1}{k_1 + \mu_0 k_2},$$

где $k_1(S)$ и $k_2(S)$ — относительные фазовые проницаемости для вытесняющего агента и нефти соответственно, а $\mu_0 = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ — отношение их вязкостей.

Соотношение для расчета $\bar{S}$ имеет вид [15, 16]:

$$\bar{S} = S_0 + \frac{1}{F'(S_c)},$$

где $F'(S_c)$ есть производная функции Бакли–Лeverетта на скачке насыщенности (на фронте вытеснения). При некоторых упрощающих предположениях она позволяет оценить влияние изме-

нения вязкости на коэффициент безводной нефтеотдачи.

Возьмем модельные функции ОФП, качественно описывающие поведение реальных функций, в виде, удобном для проведения аналитических вычислений:

$$k_1(S) = S^2, \quad k_2(S) = (1 - S)^2.$$

В результате имеем:

$$E_H = \frac{1}{F'(S_c)} = \frac{2\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{1 + \mu_0} + \sqrt{\mu_0}}. \quad (2)$$

Принимая $c = 0.01\%$ (обычно используемая на практике концентрация полимерного раствора [17]), получаем:

$$\frac{\bar{E}_H}{E_H} \approx 1.013.$$

Таким образом, увеличение коэффициента безводной нефтеотдачи за счет изменения вязкости вытесняющего агента при закачке раствора полимера стандартной концентрации составляет величину порядка одного процента.

В связи с этим усилия по совершенствованию технологии полимерного заводнения связаны преимущественно с разработкой материалов, позволяющих увеличить параметр μ_1 без существенного увеличения количества собственно полимерного материала, т.е. при сохранении концентрации частиц полимера в растворе.

Сверхразветвленные наноматериалы. В частности, в настоящее время ведутся активные работы по созданию так называемых сверхразветвленных полимеров. Разветвленность наноагрегатов полимера приводит к росту их эффективного радиуса за счет присоединения к ядру агрегатов пленки водной фазы (сольватного слоя), которая прочно удерживается густой сетью функциональных мономеров, вступающих в электрокинетическое взаимодействие с диполями молекул воды. Используя соотношения (1)–(2), легко показать, что, если удастся увеличить средний радиус ядра наноагрегатов, например, в полтора раза, коэффициент безводной нефтеотдачи при прежней концентрации частиц в растворе возрастет в 3.5 раза и составит около 4%.

Для создания таких материалов со специальными, заранее заданными свойствами — полимеров с очень высокой плотностью ветвления, в последние годы используют гибридные органо-неорганические наноконкомпозиты, поскольку они сочетают в себе преимущества органических полимеров и неорганических материалов. Сверхразветвленные наноконкомпозиты состоят из большого количества функциональных концевых групп. Уникальная молекулярная структура дела-

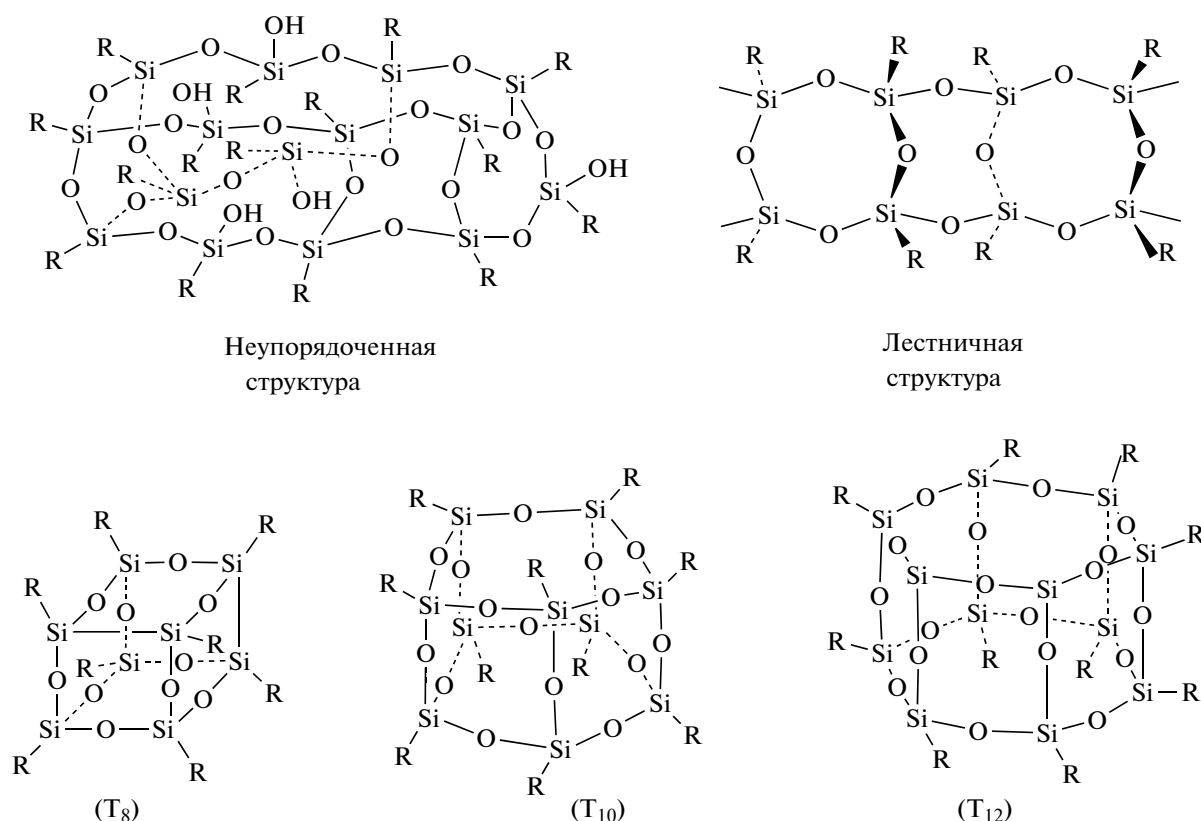


Рис. 1. Возможные структуры ПОСС-молекул.

ет их особенно подходящими для синтеза наночастиц с различными свойствами [18, 19].

В связи с этим больше внимания уделяют так называемым силсесквиоксанам со специфическими решетчатыми структурами – полиэдральным олигомерным силсесквиоксанам (**ПОСС**) (*POSS – polyhedral oligomeric silsesquioxanes*), которые являются классом трехмерных органо-неорганических гибридов с общей формулой:



Молекула ПОСС состоит из силсесквиоксанового ядра, несущего n (n – целое число ≥ 4) периферийных групп R, где R – любой органический радикал, содержащий реакционноспособную группу.

Силсесквиоксаны могут иметь различные структуры – от лестничных до кубических (рис. 1).

Молекулы имеют неорганическое Si-ядро и органическую оболочку. К центрам Si могут быть присоединены различные радикалы (R), благодаря которым можно создавать полимеры с заранее заданными свойствами для практического применения. При этом неорганическое Si-ядро обеспечивает высокую устойчивость к термической деструкции.

Силсесквиоксаны известны в молекулярной форме с 6, 8, 10 и 12 вершинами Si. Решетки обозначаются как T₆, T₈, T₁₀ и T₁₂ соответственно (где T = тетраэдрическая вершина). Конструкции вида T₈ являются наиболее изученными (рис. 1) [18].

В настоящей работе в качестве закачиваемого агента рассматриваются полимеры, представляющие собой сверхразветвленные ПОСС-нанонагрегаты.

Эти наноматериалы после синтеза с функциональными мономерами полимеризуют, тем самым формируя серии сверхразветвленных нанополимеров с заданными свойствами для практического применения. Свойства материала определяются выбором мономеров (рис. 2) [19].

Перколяционный подход к моделированию микромеханики осаждения частиц на поверхности порового пространства. При фильтрации водного раствора полимера в пористой среде его молекулы или надмолекулярные структуры взаимодействуют с поровым объемом.

С одной стороны, седimentация и адсорбция воспринимаются скорее как негативные явления, поскольку приводят к падению абсолютной проницаемости коллектора. С другой стороны, перекрытие части поровых каналов в результате указанных процессов приведет к перераспределению

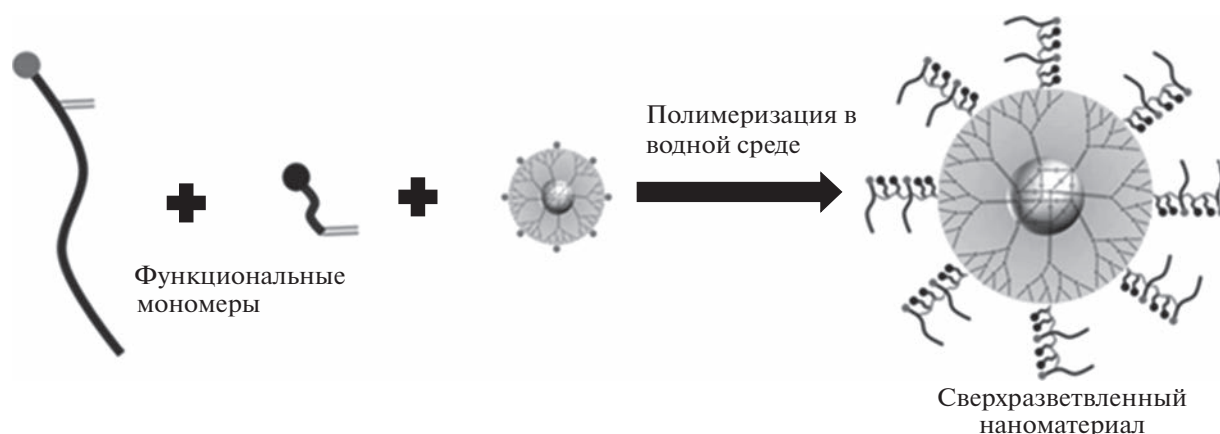


Рис. 2. Схема синтеза сверхразветвленных наноматериалов.

потоков фаз, и как следствие, к изменению относительных фазовых проницаемостей. Это, в свою очередь, повлияет на вид кривой функции Бакли–Левретта и величину коэффициента безводной нефтеотдачи. Поэтому большой интерес представляет исследование поведения как абсолютной проницаемости, так и ОФП коллектора при движении полимеров со сверхразветвленными наноагрегатами.

Наличие большого количества функциональных мономеров создает высокую “шероховатость” поверхности сверхразветвленных наноагрегатов, и, соответственно, значительно повышает коэффициент трения при попадании частиц в капилляры того же радиуса, что и у частицы. Это обеспечивает прочную связь сверхразветвленных наноагрегатов с поверхностью поровых каналов соответствующего радиуса и приводит к удержанию их внутри таких каналов. В этом случае возникает эффект постепенного осаждения частиц наноагрегатов на стенках капилляров с уменьшением эффективного радиуса последних. Этот механизм можно представить как уменьшение радиусов капилляров на величину δr , равную сред-

ней толщине осаждающегося слоя (рис. 3). При этом деформированная функция распределения примет вид:

$$f'(r) = f(r + \delta r). \quad (3)$$

При моделировании механизма постепенного осаждения частиц необходимо определить условия, при которых частица, попадая в капилляр большого радиуса, будет в нем осаждаться. Само по себе осаждение частиц может происходить в результате действия различных сил (гидродинамических, гравитационных, поверхностных и т.д.). Формально результатом их проявления оказывается вероятность $q(a, r)$ осаждения частицы радиуса a при протекании взвеси через капилляр радиуса r . Величина $q(a, r)$, как правило, определяется на основании экспериментальных данных по течению взвеси (или эмульсии) в отдельном капилляре.

Возьмем представительный объем пористой среды, через который фильтруется жидкость с частицами взвеси. За малый интервал времени δt количество частиц, попавших в рассматриваемый объем через единицу поверхности, равняется $sw\delta t$, где s — объемная концентрация частиц, w — скорость фильтрации. Если считать, что частицы равномерно распределяются внутри порового пространства, моделируемого капиллярной решеткой, то в каждый капилляр за время δt попадает в среднем $M_d c w \delta t$ частиц, где M_d — величина, обратная числу капилляров в решетке. Соответственно, количество осевших на стенках капилляра частиц будет равняться $q(a, r) M_d c w \delta t$.

Изменение радиуса капилляра, определяемое толщиной осаждающегося слоя за время δt , есть:

$$\delta r = h(a) q(a, r) M_d c w \delta t, \quad (4)$$

где функция $h(a)$ учитывает структуру слоя осаждения. Последняя зависит от механизма осаждения частиц взвеси или эмульсии. Согласно

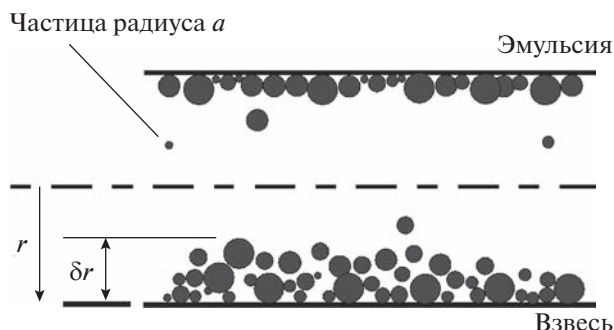


Рис. 3. Схема осаждения частиц эмульсии (верх) и взвеси (низ) в капилляре.

экспериментальным данным [20] твердые частицы взвеси (классические полимеры) могут осаждаться друг на друга, постепенно уменьшая эффективный радиус капилляра, в то время как при адсорбции капле эмульсии в капилляре пористой среды образуется монослой осадка. Следующие частицы полимера проскальзывают по уже осажденному монослою и уносятся потоком фильтрующегося флюида (рис. 3).

Конкретный вид функции $h(a)$ может быть также получен на основании экспериментальных наблюдений осаждения частиц взвеси или эмульсии в капилляре. Здесь важно учесть, что в рассматриваемом случае покрывающая ядро наноагрегата оболочка молекул воды, удерживаемая сетью функциональных мономеров, не только увеличивает его эффективный радиус, но также превращает эти наноагрегаты в частицы эмульсии.

Ориентируясь на экспериментальную информацию, в расчетах по осаждению твердых частиц в капилляре породы функцию $h(a)$ можно полагать

$$h(a) = a,$$

а для осаждения капле эмульсии $h(a)$ будем определять следующим образом,

$$h(a) = \begin{cases} a, & \delta r = 0, \\ 0, & \delta r > 0, \end{cases}$$

т.е., если в данном капилляре уже образовался слой осажденных частиц, то в последующем наноагрегаты, находящиеся в потоке, будут проскальзывать по нему, и дальнейшего увеличения адсорбционного слоя происходить не будет.

В работе [21] вероятность осаждения на основании экспериментальных данных представлялась степенной функцией, в которой главный член был квадратичным. В [22] вероятность осаждения частиц на сферических или цилиндрических препятствиях также была получена в виде $-(\gamma a/r)^2$. Здесь γ — параметр, характеризующий толщину пограничного слоя жидкости, из которого все частицы осаждаются на стенке. Данный параметр задается либо в виде константы, либо в виде функции от скорости течения флюида в капилляре, вид которой определялся экспериментально в работе [23]:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-v/v^*).$$

Здесь v — скорость течения в капилляре; v^* — критическое значение скорости; γ_0 — коэффициент, характеризующий толщину пограничного слоя, из которого осаждаются все частицы при $v = 0$.

С учетом этих результатов в данной работе вероятность осаждения частицы в капилляре принимается в следующем виде:

$$q(a, r) = \begin{cases} \left(\frac{\gamma a}{r}\right)^2, & \frac{\gamma a}{r} \leq 1, \\ 1, & \frac{\gamma a}{r} > 1. \end{cases}$$

Параметр γ полагается постоянным, что соответствует условию $v \ll v^*$.

Для расчета изменения абсолютной проницаемости и функций ОФП при течении полимерного раствора со сверхразветвленными наноконфлексами воспользуемся перколяционным подходом [24].

В качестве модели порового пространства выберем кубическую решетку, образованную капиллярами, плотность распределения которых по радиусам представляет собой логнормальную функцию, близкую по характеру поведения к реальной функции распределения капилляров по радиусам [24]:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}b_r r} \exp\left(-\frac{(\ln r - a_r)^2}{2b_r^2}\right).$$

Для определения параметров a_r и b_r этого распределения воспользуемся методикой, представленной в работе [24], позволяющей получить два соотношения, связывающие два указанных параметра с двумя известными макрохарактеристиками среды, такими как абсолютная проницаемость и пористость.

В итоге получаем два уравнения для двух неизвестных, из которых определяются значения a_r , b_r и восстанавливается вид $f(r)$. На рис. 4 (кривая 1) представлен график $f(r)$, полученный в результате решения такой системы уравнений для простой кубической решетки ($z_k = 6$) при исходных значениях пористости $m = 0.12$ и абсолютной проницаемости $K_0 = 27$ мД.

Будем считать обе фильтрующиеся жидкости ньютоновскими.

При моделировании осаждения полагалось, что частицы закачиваемого полимера представляют собой сферы и имеют заданную логнормальную функцию плотности распределения по радиусам $g(a)$ (рис. 4, кривая 2), удовлетворяющую условию нормировки:

$$\int_0^\infty g(a) da = 1.$$

Характерный радиус наноагрегата составляет 40 нанометров [11, 18, 25].

При численных расчетах радиус сверхразветвленного наноагрегата, попадающего в капилляр, определяется посредством реализации алгоритма случайной выборки с учетом веса из функции плотности распределения радиусов частиц полимера по размерам.

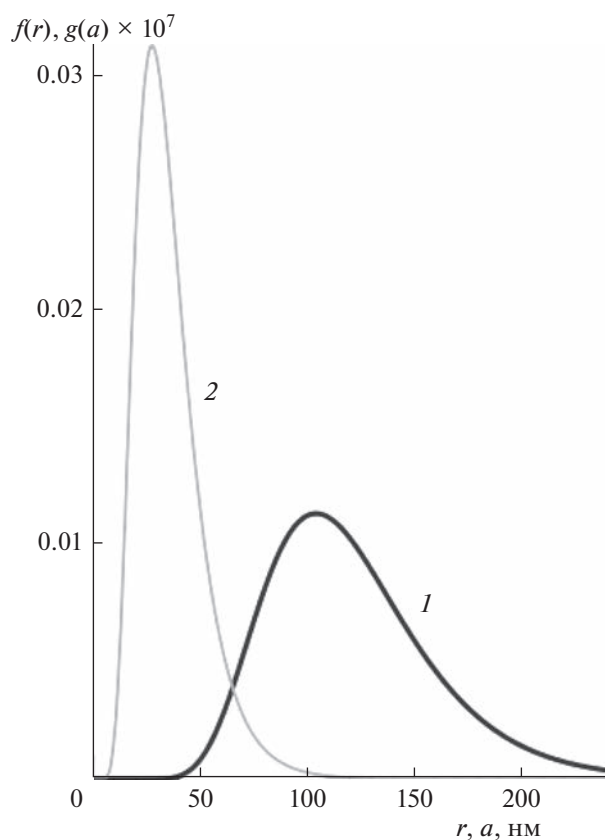


Рис. 4. Логнонормальные функции плотности распределения:
1 – капилляров по радиусам $f(r)$; 2 – наноагрегатов полимера по размерам $g(a)$.

Вначале рассмотрим изменение абсолютной проницаемости в зоне распространения полимерного раствора.

Перколяционная модель дает для определения коэффициентов абсолютной проницаемости и пористости среды соотношения [24]:

$$K = 2\nu l^{-2} (1 - P_c^b)^{-2\nu} \int_0^{r_c} \left[\int_0^{r_c} f(r) dr \right]^\nu \frac{f(r)}{I(r)} dr, \quad (5)$$

$$I(r) = \frac{8}{\pi} \int_0^\infty f(r) \frac{dr}{r^4} \left(\int_0^\infty f(r) dr \right)^{-1},$$

$$m = \frac{z_k \pi}{2l^2} \int_0^\infty r^2 f(r) dr, \quad (6)$$

где l – период решетки, ν – индекс радиуса корреляции, не зависящий от типа решетки и являющийся только функцией размерности задачи D ($\nu_3 = 0.85 \pm 0.05$), P_c^b – порог протекания в решеточных задачах связей, r_c – критический радиус, определяемый соотношением:

$$\int_{r_c}^\infty f(r) dr = P_c^b.$$

Произведение величины порога протекания на координационное число решетки z_k есть инвариант:

$$z_k P_c^b = \frac{D}{D-1}.$$

В результате перекрытия капилляров радиуса r , равного радиусу наноагрегатов, происходит деформация порометрической кривой $f(r)$ и соответствующее изменение абсолютной проницаемости K .

Перколяционная модель [24] дает для расчета ОФП параметрические зависимости:

$$k_2(r_k) = \int_{r_k}^{r_c} \left[\int_r^{r_c} f_2(r) dr \right]^\nu \frac{f(r) dr}{I(r)} \times \left\{ \int_0^{r_c} \left[\int_r^{r_c} f(r) dr \right]^\nu \frac{f(r) dr}{I(r)} \right\}^{-1},$$

$$k_1(r_k) = \int_0^{r_k} \left[\int_r^{r_c} f(r) dr \right]^\nu \frac{f(r) dr}{I(r)} \times \left\{ \int_0^{r_c} \left[\int_r^{r_c} f(r) dr \right]^\nu \frac{f(r) dr}{I(r)} \right\}^{-1},$$

$$S = \int_0^{r_k} f(r) dr.$$

Функции плотности распределения по радиусам капилляров, заполненных нефтью и водой, определяются действием капиллярных сил, поскольку скорости фильтрационных течений невелики:

$$f_o(r) = \begin{cases} 0, & r > r_k, \\ f(r), & r \leq r_k. \end{cases} \quad f_w(r) = \begin{cases} f(r), & r \geq r_k, \\ 0, & r < r_k. \end{cases}$$

Водонасыщенность S определяется в предположении, что количество заполненных смачивающей жидкостью пор совпадает с числом капилляров, в которые вода может проникнуть.

Если размеры пор не сильно различаются, то

$$S(r_k) = \int_0^{r_k} f(r) dr,$$

где r_k – минимальный радиус капилляра, из которого при данной разнице давлений в фазах может происходить вытеснение. При расчете водонасыщенности учитывался тот факт, что при перекрытии наноагрегатом водосодержащего канала доля

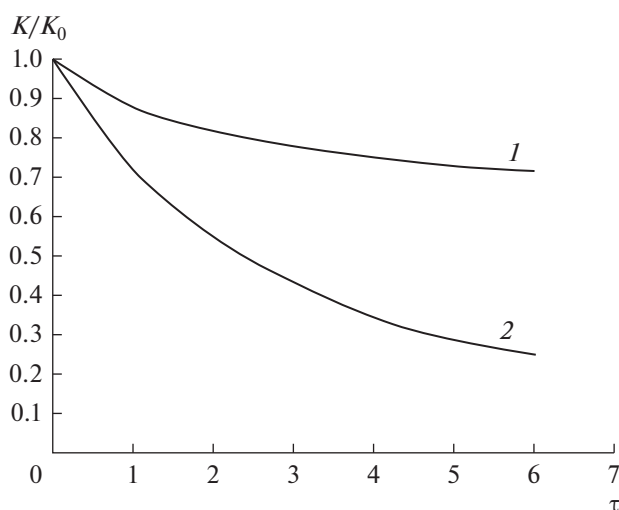


Рис. 5. Изменение проницаемости (отнесенной к начальному значению K_0) во времени при: 1 – осаждении капель эмульсии; 2 – частиц взвеси.

объема последнего, занимаемая наноагрегатом полимера, много меньше полного объема капилляра.

При определении фильтрационно-емкостных параметров также необходимо учитывать гидродинамику процесса, так как в формулу для определения толщины адсорбированного слоя (4) входят концентрация и скорость фильтрации (которая также зависит от концентрации). Следовательно, деформация функции плотности распределения капилляров по радиусам (3) будет зависеть от распределения концентрации наноагрегатов в пласте $c(r, t)$.

Поведение функции $c(r, t)$ может быть рассчитано в рамках модели, аналогичной представленной в работе [26]. Таким образом, все фильтрационно-емкостные характеристики, определяемые соотношениями (5)–(6), также зависят от концентрации c :

$$f'(r) = f(r + \delta r(c)) \Rightarrow k'_i(S, c), K'(c), m'(c).$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СФОРМУЛИРОВАННОЙ МОДЕЛИ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 представлено изменение абсолютной проницаемости во времени при осаждении капель эмульсии (при фильтрации наноагрегатов сверхразветвленных полимеров) и частиц взвеси (при фильтрации классических полимеров) в некоторой фиксированной точке пласта. Сравнение изменения проницаемости проводилось при следующих совпадающих характеристиках: интенсивность осаждения, скорость фильтрации,

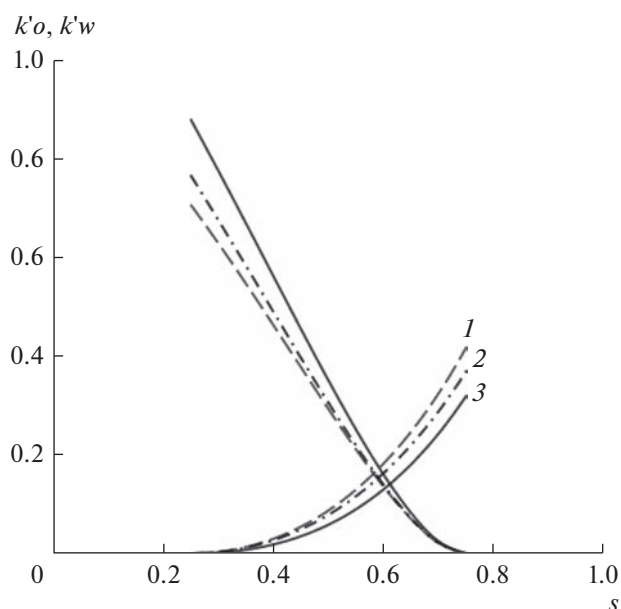


Рис. 6. Кривые относительных фазовых проницаемостей:

1 – Пунктирные линии – кривые ОФП до закачки полимера.
2 – Штрихпунктирные линии – кривые ОФП после закачки классического полимера.
3 – Сплошные линии – кривые ОФП после закачки полимера со сверхразветвленными наноагрегатами.

начальная концентрация, распределение частиц и капель по размерам.

Видно, что вследствие эффекта проскальзывания при адсорбции капель эмульсии кривая 1 выходит со временем на плато порядка $0.8K_0$. В это же время кривая 2 отражает тенденцию к постоянному падению проницаемости вплоть до нуля, что соответствует полной закупорке капилляров. Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами, представленными в работе [27].

Кривые относительных фазовых проницаемостей, рассчитанные для некоторой фиксированной пространственной координаты в фиксированный момент времени при стандартном заводнении и при полимерном заводнении с использованием двух типов наноагрегатов (классических и сверхразветвленных) приведены на рис. 6 (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

Адсорбция как классических, так и сверхразветвленных наноагрегатов полимера на скелете породы приводит к тому, что ОФП по нефти возрастает, а по воде снижается. При этом увеличение ОФП по нефти при характерной водонасыщенности $S = 60\%$ во втором случае на 15% выше.

В случае фильтрации полимера со сверхразветвленными наноагрегатами доля нефти в пото-

ке при обводненности продукции ~60–70% возрастает примерно в полтора раза:

$$\alpha_o = \frac{K k_2 k_1^0}{K_0 k_2^0 k_1} \bigg|_{F(S)=60\%} \approx 1.57.$$

В то же время при фильтрации классических полимеров, адсорбция частиц которых определяется механизмом осаждения взвеси, доля нефти в потоке возрастет при тех же условиях примерно в 1.3 раза, что на 17% меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен расчет поведения фильтрационно-емкостных параметров нефтесодержащего коллектора при полимерном заводнении, проведенный на базе перколяционной модели, учитывающей особенности течения классических и сверхразветвленных полимеров в пористой среде. Проведено сравнение влияния указанных типов полимеров на процесс нефтевытеснения. Показано, что снижение абсолютной проницаемости при фильтрации наноагрегатов не превышает 25–30%, в то время как при течении полимеров с наноструктурами типа молекулярных клубков происходит падение проницаемости вплоть до нуля. При этом рост относительной фазовой проницаемости по нефти оказался на 15% больше в случае использования полимеров, содержащих сверхразветвленные наноагрегаты.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a	радиус частицы, м
a_r и b_r	параметры, определяющие функцию плотности распределения $f(r)$
B_1 и B_2	эмпирические коэффициенты в определении антиисточника $u(c)$
b_1, b_2, b_3	соответственно эмпирические константы в полиномиальном представлении вязкости полимерного раствора
c	концентрация раствора полимера, %
D	коэффициент диффузии, м ² /с
E_H	коэффициент безводной нефтеотдачи при классическом заводнении
$\tilde{E}_H$	коэффициент безводной нефтеотдачи при полимерном заводнении
$F(S)$	функция Бакли–Левретта
$f(r)$	функция плотности распределения капилляров породы по радиусам
$\tilde{f}(r)$	деформированная функция плотности распределения капилляров породы по радиусам

$g(a)$	функция плотности распределения наноагрегатов закачиваемого полимерного раствора по размерам
$h(a)$	функция, учитывающая структуру слоя осаждения наноагрегатов полимера, м ³
K	абсолютная проницаемость, мД
k	относительная фазовая проницаемость
l	период решетки
M_d	величина, обратная числу капилляров в решетке, м ⁻³
m	пористость
n	количество радикалов
P_c^b	порог протекания в решеточных задачах связей
p	давление, МПа
$q(a, r)$	вероятность осаждения частицы полимера радиуса a в капилляре r
r	радиус капилляра породы, м
r_k	минимальный радиус капилляра, из которого при данной разнице давлений в фазах может происходить вытеснение, м
r_c	критический радиус капилляра, м
S	водонасыщенность
S_c	водонасыщенность на фронте вытеснения;
$\bar{S}$	средняя водонасыщенность пласта в безводный период
t	время, с
v	скорость течения в капилляре
v^*	критическое значение скорости
w	скорость фильтрации, м/с
z_k	координационное число решетки
α_o	доля нефти в потоке, %
β	коэффициент сжимаемости жидкости, Па ⁻¹
β_c	коэффициент сжимаемости пласта, Па ⁻¹
γ	параметр, характеризующий толщину пограничного слоя жидкости
γ_0	коэффициент, характеризующий толщину пограничного слоя, из которого осаждаются все частицы при $v = 0$
δr	толщина осажденного слоя, м
μ_i	вязкость i -ой фазы, мПа с
μ_0	отношение исходной вязкости воды к вязкости нефти
$\tilde{\mu}_1$	вязкость полимерного раствора, мПа с
v	индекс радиуса корреляции
ρ	плотность, кг/м ³

ИНДЕКСЫ

0	начальное значение
1	нефть
2	вода
<i>i</i>	номер фазы
o	нефть
w	вода

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорашенко Г.И., Зайцев Ю.В., Кукин В.В. и др. Применение полимеров в добыче нефти. М.: Недра, 1978.
2. Хавкин А.Я. Физика нефтегазовых пластов и нелинейные явления: Учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019.
3. Мазо А.Б., Поташев К.А., Баушин В.В., Булыгин Д.В. Расчет полимерного заводнения нефтяного пласта по модели фильтрации с фиксированной трубкой тока // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 1. С. 15.
4. Нажису, Ерофеев В.И. Исследование и применение технологии полимерного заводнения для повышения нефтеотдачи пластов // Успехи современного естествознания. 2018. № 11-2. С. 420.
5. Прибылев Е.М. Анализ мирового опыта реализации технологии полимерного заводнения // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2020. Т. 2. С. 332.
6. Федорова А.Ф., Портнягин А.С., Шиц Е.Ю. Нефтевытесняющие свойства растворов полимеров в пластовых условиях месторождений юго-западной Якутии // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. № 2. С. 189.
7. Шехтман Ю.М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
8. Ningbo Fengcheng Advanced Materials Research Institute Company Ltd., China.: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fcaem.com/col.jsp?id=145>
9. De Gennes P.G. Scaling Concepts in Polymer Physics. — Ithaca and London: Cornell University Press, 1979. [де Жен. П. Идеи скейлинга в физике полимеров. М.: Мир, 1982.]
10. Морозова М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей. Дис. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2019.
11. Лысенко Е.А., Ефимова А.А., Чернов И.В., Литманович Е.А. Методические разработки к практическим моделям по растворам полимеров. М.: Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021.
12. Вафин А.И., Вафин А.Р. Оценка и выбор экономически обоснованных объемов оторочек полимера для технологии ИНФП на участке Сабанчинского месторождения с применением гидродинамического моделирования // Институт "ТатНИПИ-нефть", 2016.
13. Hongjiang Lu. Improving oil recovery (IOR) with polymer flooding in a heavy-oil river-channel sandstone reservoir. Dis. Dr.-Ing. Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2004.
14. Хавкин А.Я. Математическое моделирование физико-химических технологий повышения нефтеотдачи: Учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. 2021.
15. Дмитриев Н.М., Кадет В.В. Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика: Учебное пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016.
16. Хавкин А.Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа. М.: Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Ин-т компьютерных исследований, 2010.
17. Шнорца Е.Ю. Функциональные производные олигомерных фосфазенов и силоксанов. Дис. канд. хим. наук. М.: РХТУ имени Д.И. Менделеева, 2014.
18. Терещенко Т.А. Синтез и применение полиэдральных олигосилсесквиоксидов и сферосиликатов // Высокомолекулярные соединения. 2008. Т. 50. № 9. С. 1723.
19. Gruesbeck C., Collins R.E. Entertainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media // SPE J. 1982. P. 847.
20. Rege S.D., Fogler H.S. A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops // AIChE J. 1988. V. 34. № 11. P. 1761.
21. Сутайский Э.Г. Гидродинамика физико-химических процессов. М.: Недра. 1997.
22. Gruesbeck C., Collins R.E. Entertainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media // SPE J. 1982. P. 874.
23. Кадет В.В. Перколяционный анализ гидродинамических и электрокинетических процессов в пористых средах. М.: ИНФРА-М, 2013.
24. Brigitte I.V., Albena Lederer. Hyperbranched and highly branched polymer architectures synthetic strategies and major characterization aspects // Chemical Reviews. 2009. V. 109. №. 11. P. 5924.
25. Kadem B.B., Чагуров П.С. Investigation of Cyclic Electrolytic Solutions Injection in Clay-Containing Oil Reservoirs // J. Petroleum and Environmental Biotechnology. 2015. V. 6. № 5.
26. Soo H., Radke C.J. Flow of dilute stable liquid and solid dispersion in underground porous media // AIChE J. 1985. V. 31. № 11. P. 1926.