

© 2024 г. А.В. АХМЕТЗЯНОВ, канд. техн. наук (atlaswa@gmail.com),
А.В. САМОХИН, д-р техн. наук (samohinalexey@gmail.com)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ВОЛНОВЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С АНОМАЛЬНЫМИ ЗАПАСАМИ¹

При добыче нефти из резервуаров месторождений использование активных физико-химических реагентов в комбинации с высокочастотными волновыми колебаниями в качестве управляющих воздействий приводят к увеличению фактора нефтеотдачи пластов за счет вовлечения в процесс вытеснения запасов неизвлекаемых традиционным заводнением (с закачкой воды в нагнетательные скважины). В статье приведены результаты экспериментов, использующих математическую модель цилиндрических волн в направлении фильтрационного потока флюидов; показана эффективность циклических управляющих волновых воздействий. Отмечены сложные проблемы, связанные с применением методов гидродинамики к слаборазрывным колебаниям в неоднородной среде и указаны пути к их разрешению. Показано, что предлагаемые комбинированные методы управляющих воздействий на процесс фильтрационного вытеснения аномальных и трудноизвлекаемых фракций нефти из нефтенасыщенных пористых сред природных залежей обеспечивают увеличение коэффициента конечной нефтеотдачи потенциально на 10–15%.

Ключевые слова: аномальные и трудноизвлекаемые запасы нефти, активные физико-химические реагенты, циклические управляющие воздействия, цилиндрические слаборазрывные волны давления, математическая модель процесса.

DOI: 10.31857/S0005231024100042, EDN: YVLTUV

1. Введение

Эффективность извлечения аномальных (высоковязких) и трудноизвлекаемых (защемленных в низкопроницаемых пластах и/или удерживаемых на стенках пор и трещин капиллярными силами и/или силами адгезии и др.) запасов нефти из природных залежей традиционными методами является неудовлетворительной. При таком подходе к разработке месторождений остаточные (не извлеченные) запасы нефти достигают в среднем 55–75% от первоначальных геологических. Поэтому проблема повышения эффективности разработки с аномальными и трудноизвлекаемыми запасами природными залежами является чрезвычайно актуальной. Для достижения наибольшего коэффициента нефтеотдачи природных залежей необходимо воспользоваться

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда: проект № 21-71-20074 (А.В. Ахметзянов) и проект № 23-21-00390 (А.В. Самохин).

современными технологиями активного управляющего воздействия на процесс фильтрации флюидов (нефти, газа и водных растворов активных реагентов) в пористых средах резервуаров месторождений. Для извлечения аномальных запасов нефти применяют активные управляющие воздействия на всех этапах разработки. Физико-химические воздействия в насыщенных флюидами пористых средах приводят к изменению свойств пластовой воды и поверхностей (границ) раздела между водой, нефтью и горной породой, к уменьшению относительной подвижности воды и нефти, что приводит к выравниванию фронта вытеснения и способствует повышению нефтеотдачи пластов и увеличению как охвата пластов вытеснением, так и коэффициента нефтеотдачи залежей.

В статье предлагается общий подход к решению проблем изотермического вытеснения аномальной и трудноизвлекаемой нефти с применением следующих перечисленных ниже высокоэффективных вариантов активных реагентов (см. [1–6]), в частности вытеснение нефти водными растворами активных реагентов:

1. *Поверхностно-активные вещества (ПАВ)*. При вытеснении нефти водными растворами ПАВ снижается поверхностное натяжение на границе «нефть–вода», увеличивается подвижность нефти, что улучшает вытеснение ее водой. Кроме того, за счет улучшения смачиваемости породы вода впитывается в поры, занятые нефтью, что выравнивает фронт вытеснения полимеров.

2. *Полимеры*. При вытеснении полимерами образуется высокомолекулярный химический реагент – полимер (полиакриламид), который даже при малых концентрациях существенно повышает вязкость воды, снижает ее подвижность и в результате повышает охват пластов вытеснением. Загущение воды приводит к соответствующему уменьшению соотношения вязкостей нефти и воды в пласте, что приводит к ухудшению условий для прорыва воды, обусловленных неоднородностью пласта. Полимерный раствор преимущественно проникает в высокопроницаемые слои, что приводит к выравниванию динамической неоднородности потоков жидкости и обеспечивает полноту охвата пластов вытеснением.

3. *Щелочи*. При щелочном вытеснении происходит взаимодействие щелочей с нефтью и породой. При контакте щелочи с нефтью происходит ее взаимодействие с органическими кислотами, в результате чего образуются поверхностно-активные вещества, снижающие межфазное натяжение на границе раздела фаз «нефть–раствор щелочи» и увеличивающие смачиваемость породы водой, что приводит к повышению коэффициента вытеснения нефти водой за счет отмывания удерживаемых на поверхности трещин и пор высоковязких отложений и пленок нефти.

4. *Двуокись углерода (CO₂)*. При растворении двуокиси углерода вязкость воды увеличивается незначительно (лишь на 20–30% при массовом содержании CO₂ в воде 3–5%), а образующаяся при этом угольная кислота H₂CO₃

растворяет некоторые виды цемента и породы пласта, что повышает ее проницаемость. Более того, двуокись углерода снижает набухаемость глиняных частиц и растворяется в нефти в 4–10 раз лучше, чем в воде, поэтому она может переходить из водного раствора в нефть и межфазное натяжение между ними становится настолько низким, что вытеснение приближается к смешиваемому. Благодаря этому происходит отмывание удерживаемых на поверхности трещин и пор высоковязких отложений и пленок нефти и фазовая проницаемость нефти увеличивается. Кроме того, при растворении в нефти CO_2 вязкость нефти уменьшается, плотность повышается, что вносит основной вклад при вытеснении высоковязкой нефти за счет уменьшения ее вязкости. При давлении выше давления полного смешивания нефти с CO_2 двуокись углерода будет вытеснять нефть как обычный растворитель. В пласте образуются три зоны: зона первоначальной пластовой нефти, переходная зона (нефти и закачиваемого активного реагента) и водная зона.

Если CO_2 нагнетается в заводненную залежь, то перед зоной CO_2 формируется вал нефти, вытесняющий пластовую воду. Таким образом, увеличение объема нефти под воздействием растворяющегося в нем CO_2 наряду с изменением вязкости жидкостей (уменьшением вязкости нефти и увеличением вязкости воды) – один из основных факторов, определяющих эффективность его применения в процессах добычи нефти на поздней стадии разработки месторождений.

5. *Композиции активных реагентов.* Наибольший приоритет следует отдать мицеллярно-полимерному вытеснению нефти, предложенному американскими учеными, позволяющему возобновить разработку полностью обводненного месторождения. Проведенные в США эксперименты показали, что закачка мицеллярных растворов (МР) в размере 10% от порового пространства позволяет добыть до 60% не извлеченной при обычном вытеснении нефти водой. При закачке мицеллярно-полимерных растворов процесс вытеснения нефти производится оторочками МР, продвигаемыми вначале полимерным раствором, а затем водой. Обычно такой раствор состоит из мицелл (микроассоциатов) или сгустков водо- и нефтерастворимых ПАВ, способных поглощать большие количества воды (до 80% от объема раствора). При этом внешней фазой (дисперсной средой) остается нефть и, следовательно, МР способен смешиваться в пористой среде (не образуя границ раздела и менисков) с нефтью, несмотря на содержание в нем большого количества воды. С увеличением в МР внутренней фазы мицеллы увеличиваются, что приводит к обращению фаз: МР с внешней нефтяной фазой переходит в раствор с внешней водной фазой, хорошо смешивающейся с водой. В состав МР входят углеводородная жидкость, вода и ПАВ различного состава, включая спирты. При продвижении их по пласту использование высоковязких растворов полимеров позволяет применять оторочки меньших объемов. Смешиваемость МР с водой и нефтью, а также достаточно низкое поверхностное натяжение на границе раздела МР с нефтью и водой создают благоприятные условия для вытеснения нефти за счет практического обнуления капиллярных сил.

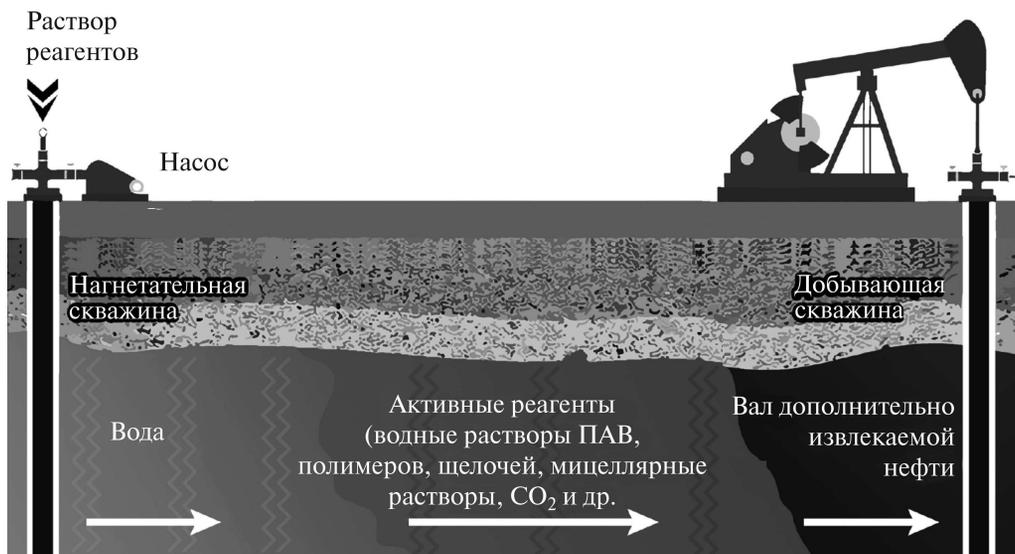


Рис. 1. Потоки фильтрации оторочек активного реагента и воды.

При всех перечисленных способах вытеснения аномальных и трудноизвлекаемых запасов нефти формируются последовательные потоки фильтрации оторочек активных реагентов и воды, представленные на рис. 1.

Следовательно, для создания нестационарных моделей указанных выше способов вытеснения можно воспользоваться решениями начально-краевых задач для обобщенных уравнений Бакли–Левретта с учетом распределения баланса концентраций флюидов при вложенных гармонических управляющих воздействиях, определяемых также решениями (соответствующим рассматриваемому способу) обобщенного уравнения KdV – Бюргерса. В работе представлены результаты исследования оптимизации первого из описанных выше методов за счет применения волновых управляющих воздействий в комбинации с циклической закачкой последовательности оторочек растворов поверхностно-активных веществ и воды. При таком воздействии снижается поверхностное натяжение на границах раздела фаз (оторочек нефти, раствора ПАВ и воды), увеличивается подвижность нефтяных фракций (улучшает вытеснение их водными фракциями) и смачиваемости породы (водные фракции впитываются в поры занятые неподвижной зацементированной в мелких порах нефтью), а суммарный результат этих воздействий выравнивает фронт вытеснения, что способствует полноте извлечения нефти месторождений с аномальными и трудноизвлекаемыми запасами. Импульсные волновые воздействия ускоряют эти процессы за счет интенсивного перемешивания и отрыва аномальных по вязкости фракций нефти, удерживаемых силами адгезии и капиллярных сил на поверхности стенок пор, что увеличивает их проницаемость за счет очищения пор и даже способствует вовлечению в процесс извлечения зацементированной нефти из застойных зон.

2. Модель диффузионного процесса

Высокочастотные волновые колебания ускоряют диффузию и приводят к тому, что резкие границы между водой и растворителем, а также и между растворителем и вязкой нефтью начинают интенсивно размываться, и процесс разжижения заходит в более далекие (по отношению к оси излучателя)

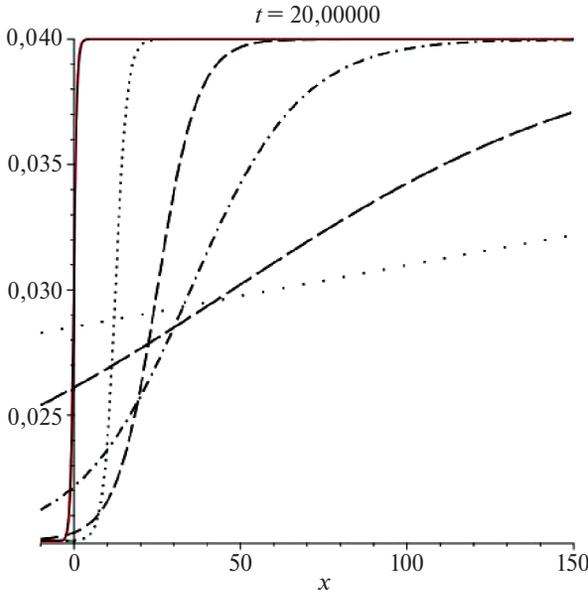


Рис. 2. Динамика вязкости при $\varepsilon_2 = 0,04$, $\varepsilon_1 = 0,02$, $\alpha = 3$, $\beta = 0,3$, $s = 5$.

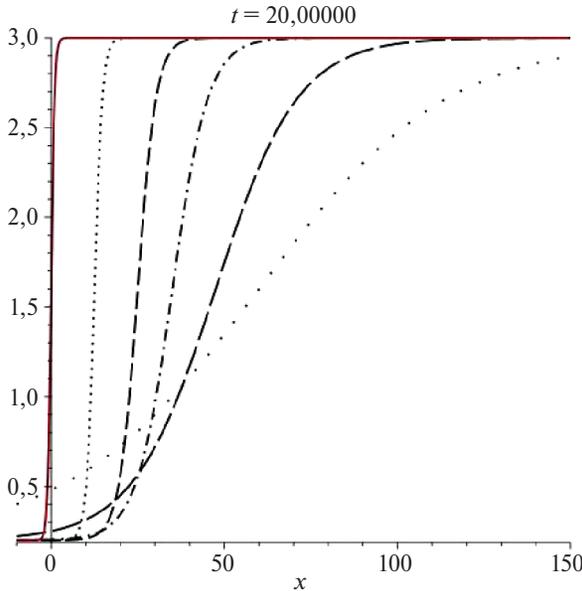


Рис. 3. Динамика вязкости при $\varepsilon_1 = 0,2$, $\varepsilon_2 = 3$, $\alpha = 3$, $\beta = 0,2$, $s = 0$.

слои нефти. В первом приближении можно рассмотреть следующую модель, описывающую изменение вязкости смеси в рабочем пространстве

$$(1) \quad \varepsilon(x, t) = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} + \frac{(-\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \tanh(e^{-\alpha t}(x - x_0 - \beta t)).$$

Здесь: t – время, x – расстояние от оси излучателя, ε_1 – коэффициент вязкости воды, ε_2 – коэффициент вязкости нефти, α – коэффициент скорости диффузии (линейно зависит от частоты волнового воздействия), β – скорость вытеснения (зависит от амплитуды воздействия), x_0 – начальное удаление границы раздела от оси излучателя. Отметим, что модель пренебрегает начальной толщиной слоя растворителя. В процессе с течением времени вязкости составляющих смеси выравниваются.

Это иллюстрируют рис. 2 и 3. На них представлено изменение вязкости в соответствии с формулой (1); слева направо показаны моменты $t = 0; 4; 8; 12; 16; 20$.

Важно понимать, что описанная здесь эволюция диффузионного процесса и форма рабочей зоны являются априорными (хотя и правдоподобными). Эта модель подлежит уточнению при помощи теории фильтрации флюидов в пористой среде и численных экспериментов.

3. Качественная картина распространения гармонических колебаний в вязкой среде

Синусоидальные волновые воздействия высокой частоты, в том числе ультразвук, представляют наибольший интерес для практики нефтедобычи, [7, 8]. Рассмотрим (на фоне постоянного вытесняющего давления) бегущую концентрическую волну, излучаемую вертикальным генератором и имеющую первоначально синусоидальную форму в среде с вязкостью и теплопроводностью. Если интенсивность волны достаточно велика, то по мере распространения ее форма меняется вследствие нескольких факторов. Во-первых, это геометрическая (вследствие увеличения радиуса фронта волны). Кроме того, синусоидальность деформируется вследствие нелинейности – разности в скоростях, различных по высоте участков профиля волны. Точки, испытывающие большее давление, движутся быстрее. В результате крутизна волновых фронтов увеличивается, и могут возникнуть слабые разрывы вместо гладких экстремумов. Волна приобретает пилообразную форму. Однако настоящих разрывов не возникает: влияние вязкости и теплопроводности приводит к сглаживанию профиля волны, уменьшению градиентов скорости и температуры. Поэтому при распространении синусоидальной (вблизи генератора) волны увеличение крутизны ее фронта происходит до тех пор, пока влияние нелинейных и диссипативных факторов не компенсируется. Происходит стабилизация формы волны (с точностью до геометрической расходимости концентрического процесса распространения). После стабилизации

форма волны продолжает меняться: затухание амплитуды приводит к уменьшению влияния нелинейных эффектов, и профиль волны постепенно сглаживается, сначала вновь приобретая квазигармоническую форму с исходной частотой и стремящейся к константе амплитудой синусоидальной компоненты. В рассматриваемой задаче волны распространяются в относительно тонком слое месторождения от малого источника колебаний и, следовательно, имеют цилиндрическую форму. Распространение цилиндрических волн амплитуды сходно с процессом распространения плоских волн. Как и там, нелинейные явления вызывают изменение формы распространяющейся волны и могут привести к возникновению слабых ударных волн и интенсивному поглощению. Различия проявляются, однако, в ином темпе нарастания нелинейных искажений при распространении цилиндрических волн, что вызвано изменением амплитуд таких волн вследствие их геометрической расходимости. Для описания распространения цилиндрических волн конечной амплитуды система уравнений гидродинамики и уравнение состояния сводятся (без учета дисперсии) к одному приближенному уравнению вида

$$(2) \quad a \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{2r} - \frac{\varepsilon}{c_0^2} v \frac{\partial v}{\partial y} = a \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}.$$

Здесь $y = t - r/c_0$, $\varepsilon = (\gamma + 1)/2$, r – расстояние до излучателя и c_0 скорость сигнала в среде.

Отметим, что это уравнение применимо лишь в случае $kr \gg 1$, $y = t - (r - r_0)/c_0$, k – волновое число. После замены переменных это совпадает с уравнением Кортвега–де Фриза для цилиндрических волн. Приведем его безразмерную нормированную форму.

$$(3) \quad u_t = -2uu_x + \varepsilon(x, t)u_{xx} + u/2t.$$

Для учета дисперсии, возникающей за счет нелинейных эффектов, вводится дополнительное слагаемое, что приводит к уравнению Кортвега–де Фриза–Бюргера

$$(4) \quad u_t = -2uu_x + \varepsilon(x, t)u_{xx} + u/2t + u_{xxx}.$$

Здесь u – приведенная величина возмущения. Начально-граничная задача выглядит так:

$$(5) \quad u(x, 0) = a, \quad u(0, t) = a + b \sin(kt), \quad u(L, t) = a, \quad u_x(L, t) = 0, \quad L \gg 0.$$

Здесь a – смещение, вызванное постоянным вытесняющим давлением, b и k – амплитуда и частота волнового воздействия. Для $t \gg 1$ уравнение (2) стремится к плоскому уравнению Кортвега–де Фриза–Бюргера;

$$u_t = -2uu_x + \varepsilon(x, t)u_{xx} + u_{xxx},$$

то же происходит с его решениями.

4. Численное моделирование

Было проведено численное моделирование вытеснения из пласта остаточной нефти с применением поверхностно активных веществ с учетом волновых воздействий в соответствии с моделями, описанными в разделах 2 и 3. На рис. 4–5 показана зона проникновения волновых воздействий совместно с ди-

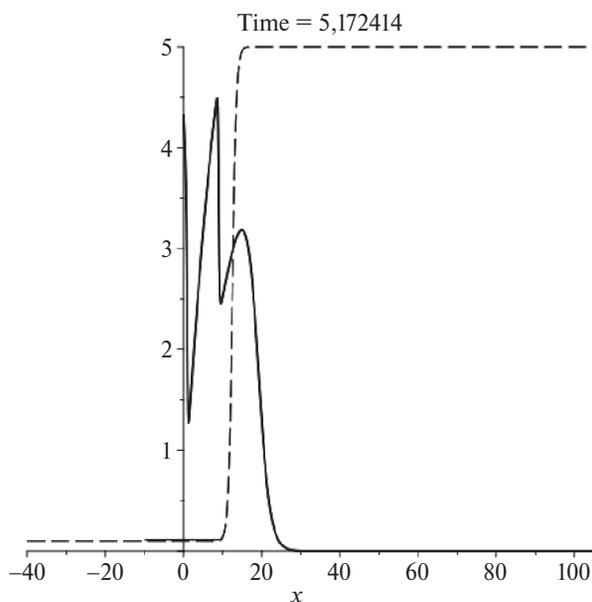


Рис. 4. Совместная динамика волновых воздействий и оторочки ПАВ; $t \approx 5$.

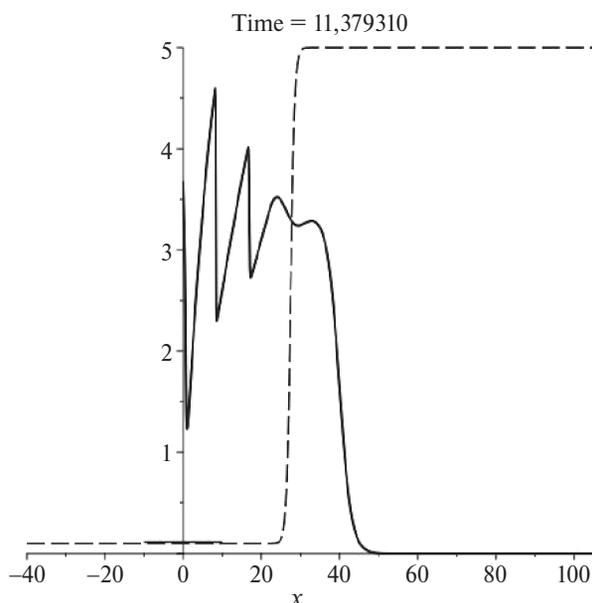


Рис. 5. Совместная динамика волновых воздействий и оторочки ПАВ; $t \approx 11$.

наимкой коэффициентов вязкости в случае $\varepsilon_1 = 0,1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\alpha = 2$, $\beta = 0,002$; $x_0 = 0$, т.е.

$$\varepsilon(x, t) = 2,55 + 2,45 \tanh(e^{-0,002t}(x - 2t)).$$

Волновое воздействие первоначально имеет гармоническую форму $u(0, t) = 3 + 2 \sin(5t)$. Конкретные цифры в этом примере не привязаны к какому-либо месторождению или характеристикам поверхностно активных веществ. На этом этапе, в первую очередь, интересен принципиальный эффект управляющих волновых воздействий. Однако 50-кратное превышение вязкости нефти по сравнению с водой представляется правдоподобным. Как это видно из графиков численных решений, гармоническая форма преобразуется в пилообразную слаборазрывную форму и затем затухает до стабильной ударной волны. Затухание заканчивается в окрестности наибольшего градиента коэффициента вязкости на разделе между водой и остаточной нефтью. В этой зоне затрачивается вся энергия синусоидальной компоненты гармоника. Дальнейшее распространение монотонной выпуклой формы ударной волны объясняется наличием постоянной составляющей гармоника; ее скорость соответствует скорости звука в вязкой среде. Для цилиндрической волны форма этого монотонного участка вплоть до ударного фронта участка задается формулой

$$u(x, t) = \frac{V}{3} \left(2 + \sqrt{\frac{(4 - 3x)}{\sqrt{t}}} \right),$$

как это показано в [9]. Здесь V – скорость звука, соответствующая амплитуде в среде с квадратичной нелинейностью.

На рис. 4–7 сплошная линия соответствует амплитуде волнового воздействия, а пунктирная линия – распределению вязкости в зависимости от расстояния от оси генератора колебаний; рисунки отвечают последовательным моментам времени $t = 5, 11, 18$ и 25 .

На основании анализа графиков, представленных на рис. 4–7, можно сделать вывод об эффективности волновых воздействий в методе вытеснения остаточной нефти с применением ПАВ. За счет выбора подходящей начальной гармоники волновое воздействие можно довести до границы раздела между раствором ПАВ и нефтью, где энергия колебаний будет полностью затрачиваться на процесс их перемешивания и, благодаря комплексному воздействию, будет увеличивать концентрацию дополнительной нефти в потоке фильтрации добываемой продукции.

Для оценки эффективности предлагаемого подхода необходимо оценить два параметра управляющего волнового воздействия. Специфика соответствующих научных проблем состоит в том, что среда, в которой происходит процесс сильно неоднородна (вода–переходной слой–нефть), и получение точных аналитических решений представляется нереальной задачей. На первом этапе исследований неизбежны численные эксперименты, а в дальнейшем и натурные. С практической точки зрения важна зависимость дальности проникновения от источника колебаний нелинейной волны (ее эффективной ра-

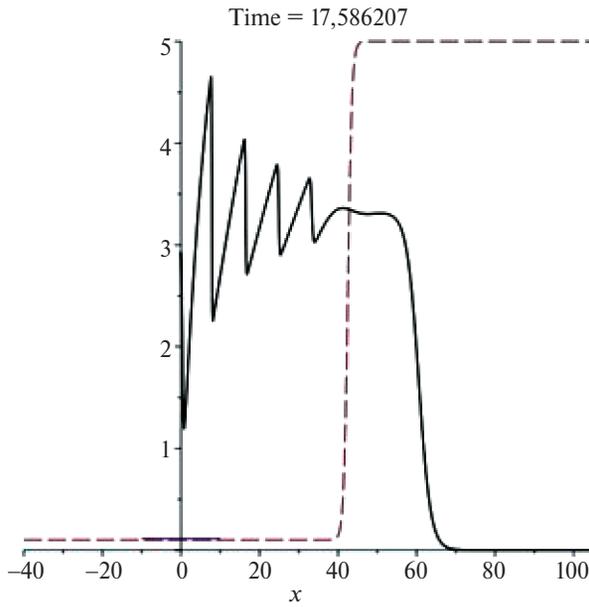


Рис. 6. Совместная динамика волновых воздействий и оторочки ПАВ; $t \approx 18$.

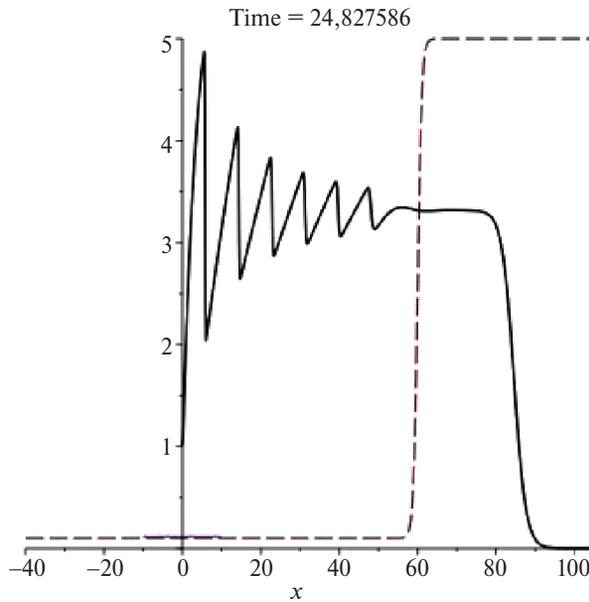


Рис. 7. Совместная динамика волновых воздействий и оторочки ПАВ; $t \approx 25$.

бочей части) от ее амплитуды и частоты, а также от гидродинамических свойств среды. В литературе можно найти подобного рода оценки, но только для однородной среды. Так, положение разрыва цилиндрической волны определяется следующим условием:

$$2\sigma_0|\sqrt{r/r_0} - 1| = 1,$$

где $\sigma = rMk\varepsilon$ – безразмерное расстояние, M – число Маха. Оценка дальности распространения пилообразной формы волны дается формулой:

$$\sigma_{fin} = \pi^2/2\Gamma, \quad \Gamma = 2\varepsilon\sigma \times Re.$$

см. [7].

Необходимо отметить, что эти оценки относятся к однородной среде и подлежат уточнению в случае трехкомпонентной среды вода–активный реагент–аномальная нефть.

5. Механизм волновых процессов вытеснения нефти активными реагентами

Высокая эффективность волновых процессов вытеснения нефти активными реагентами определяется следующими обстоятельствами. При больших амплитудах колебаний в жидкостях возникают стационарные потоки, или акустические течения. Эти потоки особенно выражены вблизи препятствий различного рода, размещенных в зоне воздействия. Они всегда носят вихревой характер. Скорость этих потоков возрастает с увеличением интенсивности, но даже при наибольших интенсивностях остается меньше колебательной скорости в волне [10].

Как известно, потоки вызываются постоянными силами, величина которых может быть оценена с учетом нелинейных эффектов. Акустическим течениям посвящено большое число публикаций. С точки зрения возможностей более полного извлечения нефтяных запасов особый интерес представляют пограничные течения вблизи поверхностей тел, соприкасающихся с полем колебаний. Эти течения, возмущая пограничный слой, объясняют ускорение процессов переноса под действием колебаний: теплопередачи нагретых тел, изменения концентрации при очистке загрязненных поверхностей и тому подобных. Акустическое воздействие является эффективным методом возмущения пограничного слоя.

Для обсуждаемой проблемы важны следующие типы акустических потоков:

Первый – это течения вне пограничного слоя, которые также имеют вихревой характер. Масштаб этих вихрей существенно больше масштаба вихрей пограничного слоя. Один из видов течения этого типа – двумерное течение между двумя плоскостями, возникающее под действием волны; вихри в этом случае имеют масштаб, равный длине звуковой волны. Такие вихри в предложенном подходе должны способствовать перемешиванию компонентов внутри рабочей зоны.

Второй – это течения, возникающие в вязком пограничном слое вблизи верхней и нижней границ залежи. Известно, что под действием высокочастотных колебаний стационарные потоки в пограничном слое имеют вихревой характер. Масштаб этих пограничных вихрей, как правило, определяется толщиной акустического пограничного слоя, по размеру они намного меньше длины волны. Эти вихри в предлагаемом авторами статьи подходе будут очищать границы нефтеносного слоя от пленок и капелек, застрявших в порах границы. Для этих остатков на жесткой поверхности градиент скорости нормален

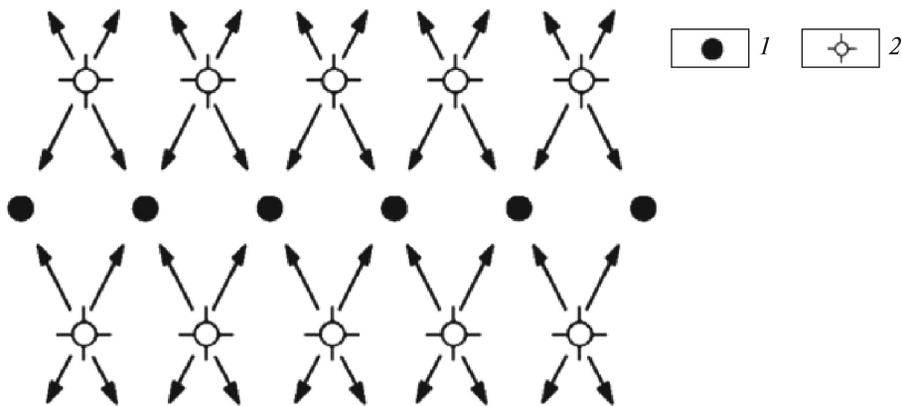


Рис. 8. Схема размещения отбирающих (1) и нагнетательных (2) скважин.

к поверхности и, по необходимости, велик при переходе к общему течению в слое. Это и приводит к отрыву нефти от стенок.

Динамика пограничного слоя при прохождении волны в направлении оси x описывается уравнениями Прандтля

$$(6) \quad \frac{\partial v_1}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} = 0.$$

Здесь y – нормальная к поверхности координата, v_1 и v_2 – x и y компоненты скорости, $U(x, t)$ – известная скорость потока вдали от границы. Отметим, что для пилообразной волны $\frac{\partial U}{\partial x}$ разрывна.

Известные оценки для скорости v , например см. [10], полученные в случае синусоидальных колебаний U , едва ли применимы. Однако совершенно очевидно, что на слабых разрывах поглощение энергии усиливается и скорости вихрей растут. Аналитическое решение уравнения (5) недоступно. Приближенные решения получают методом возмущений, но в случае пилообразных волн неизбежно применение методов численного моделирования.

Для реализации предлагаемых технологий следует воспользоваться треугольной схемой размещения нагнетательных и добывающих скважин (см. рис. 8), а волновые воздействия целесообразно производить в нагнетательных скважинах последовательно через одну. При этом выбор длительности интервалов волнового воздействия и объемные размеры оторочек активных реагентов будут дополнительными средствами управления (см. рис. 8).

Предлагаемые результаты исследований без особых затруднений могут быть использованы для создания моделей потоков гетерогенных смесей флюидов в насыщенных аномально вязкой нефтью пористых сплошных средах, когда имеет место монотонное увеличение или снижение фильтрационных сопротивлений, т.е. псевдопластичные или дилатантные течения, описываемые степенными и трехчленными законами фильтрации Форхгеймера [6].

6. Заключение

В статье рассматривается добыча трудноизвлекаемых запасов нефти с использованием активных реагентов, высокочастотные волновые колебания ускоряют диффузию и приводят к интенсивному выравниванию фронта вытеснения за счет сглаживания границ раздела между водой и активным реагентом. В результате выравниваются фильтрационные параметры флюидов (нефти, воды и активных реагентов) в потоке, что способствует увеличению фактора нефтеотдачи (коэффициента извлечения нефти) пластов залежей.

Применение высокочастотных волновых колебаний ускоряет диффузию и приводит к тому, что резкие границы между водой и растворителем, а также и между растворителем и вязкой нефтью начинают интенсивно размываться, и процесс разжижения заходит в более далекие (по отношению к оси излучателя) слои нефти. Изучена качественная картина этого процесса.

Если интенсивность волны достаточно велика, то по мере распространения ее форма меняется вследствие нескольких факторов.

Во-первых, это геометрический фактор (следствие увеличения радиуса фронта волны). Во-вторых, синусоидальность деформируется вследствие нелинейности – разности в скоростях различных по высоте участков профиля волны. Точки, испытывающие большее давление, движутся быстрее. В результате крутизна волновых фронтов увеличивается и могут возникнуть слабые разрывы вместо гладких экстремумов. Волна приобретает пилообразную форму. При распространении первоначально синусоидальной волны увеличение крутизны ее фронта происходит, пока влияние нелинейных и диссипативных факторов не компенсируется. Происходит стабилизация формы волны (с точностью до геометрической расходимости концентрического процесса распространения).

После стабилизации форма волны продолжает меняться: профиль постепенно сглаживается, сначала вновь приобретая квазигармоническую форму с исходной частотой и стремящейся к константе амплитудой синусоидальной компоненты. На этом этапе энергия управляющих колебаний полностью отдается среде, в которой возникает хаотическое тепловое движение.

Были проведены численные эксперименты с использованием математической модели процесса для цилиндрических волн вокруг направления фильтрационного потока флюидов. На основании этих расчетов можно сделать вывод об эффективности волновых воздействий в методе вытеснения остаточной нефти с применением ПАВ. За счет выбора подходящей начальной гармоники возможно донести энергию колебаний в пограничную зону между водой и нефтью, где она полностью тратится на перемешивание нефти и ПАВ и, тем самым, увеличит вовлеченность нефти в раствор и скорость процесса.

В статье отмечены сложные проблемы, связанные с применением методов гидродинамики к слаборазрывным колебаниям в неоднородной среде и указаны пути их разрешения.

Поскольку при использовании всех типов активных реагентов (растворами: углекислоты, ПАВ, щелочей, полимеров и др.) механизм волновых процессов вытеснения трудноизвлекаемых запасов нефти идентичен, можно быть уверенным в том, что проведение аналогичных исследований подтвердит эффективность циклических управляющих волновых воздействий в интервале закачки активных реагентов для повышения нефтеотдачи природных залежей. Применение волновых воздействий с использованием комбинации (тепловых, физико-химических и др.) активных реагентов, приведет к большей эффективности процессов вытеснения трудноизвлекаемых запасов нефти и значительному повышению нефтеотдачи пластов.

Предложенные в статье результаты являются дальнейшим развитием и обобщением методов, изложенных в статье [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сургучев М.Л.* Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985.
2. *Шелепов В.В.* Состояние сырьевой базы нефтяной промышленности России. Повышение нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1992
3. *Амелин И.Д., Сургучев М.Л., Давыдов А.В.* Прогноз разработки нефтяных залежей на поздней стадии. М.: Недра, 1994.
4. *Еремин Н.А.* Современная разработка месторождений нефти и газа. М.: Недра, 2008.
5. *Земцов Ю.В., Мазаев В.В.* Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (литературно-патентный обзор). Екатеринбург: Средне-Уральское книжн. изд-во, 2021.
6. *Сулейманов Б.А.* Особенности фильтрации гетерогенных систем. Москва-Ижевск: ИКИ, 2006.
7. *Наугольных К.А.* Поглощение волн конечной амплитуды /Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968.
8. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. М.: Ин-т комп. исслед., 2011.
9. *Samokhin A. V.* On Monotonic Pattern in Periodic Boundary Solutions of Cylindrical and Spherical Kortweg-de Vries-Burgers Equations // *Symmetry*. 2021. No. 13(2). P. 220–235.
10. *Зарембо Л.К.* Акустические течения / Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968.
11. *Ахметзянов А.В., Самохин А.В.* Нелинейные волновые управляющие воздействия для увеличения нефтеотдачи природных залежей // *АиТ*. 2022. № 5. С. 61–75.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галеевым.

Поступила в редакцию 16.04.2024

После доработки 20.06.2024

Принята к публикации 25.07.2024