

МОДЕЛИ ВОЛНОВОГО ВЫТЕСНЕНИЯ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АКТИВНЫМИ РЕАГЕНТАМИ¹

Ахметзянов А.В.

*Институт проблем управления Российской академии наук, Москва, Россия
atlas@ipu.ru*

Самохин А.В.

*Институт проблем управления Российской академии наук, Москва, Россия
samohinalexey@gmail.com*

Аннотация. При добыче трудноизвлекаемых запасов нефти с использованием активных реагентов высокочастотные волновые колебания ускоряют диффузию и приводят к увеличению фактора нефтеотдачи пластов залежей. Приведены результаты экспериментов использующих математическую модель цилиндрических волн в направлении фильтрационного потока флюидов; показана эффективность циклических управляющих волновых воздействий.

Ключевые слова: Тяжелая нефть, активные реагенты, циклические управляющие воздействия, цилиндрические волны давления, математическая модель процесса.

Введение

В настоящее время эффективность извлечения нефти из природных залежей современными методами разработки является неудовлетворительной, поскольку остаточные запасы нефти достигают в среднем 55–75% от первоначальных геологических запасов. Следовательно, чрезвычайно актуальными являются методы решения проблем эффективности разработки природных залежей с применением технологий нефтедобычи, использующих активные реагенты на первичном и вторичном этапах разработки для трудноизвлекаемых запасов нефти, а также третичном этапе для извлечения остаточных (защемленных в низкопроницаемых пластах и/или удерживаемых на стенках пор и трещин капиллярными силами и/или силами адгезии и др.) на поздних стадиях разработки залежей с традиционными запасами.

В работе предлагается общий подход к решению проблем изотермического вытеснения нефти с применением следующих ниже основных вариантов активных реагентов, см. [1], [2].

- **Воздействие на пласт двуокисью углерода.** При растворении двуокиси углерода вязкость воды увеличивается незначительно (при массовом содержании CO_2 в воде 3–5% вязкость смеси лишь на 20–30%), а образующаяся при этом угольная кислота H_2CO_3 растворяет некоторые виды цемента и породы пласта, что повышает ее проницаемость. Более того, двуокись углерода снижает набухаемость глиняных частиц и растворяется в нефти в четыре-десять 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 смешивающемуся. Благодаря чему, 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 за счет уменьшения вязкости нефти. При давлении выше давления полного смешивания нефти с CO_2 процесс вытеснения происходит вытеснение двуокись углерода будет вытеснять нефть, как обычный растворитель, когда в пласте образуются три зоны: зона первоначальной пластовой нефти, переходная зона (от свойств первоначальной нефти до свойств закачиваемого агента) 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 и извлечения ее из заводненных пластов.

¹ Работа подготовлена при частичной поддержке грантов РФФ: 21-71-20074 (А.В. Ахметзянов) и 23-21-00390 (А.В. Самохин)

- **Вытеснение нефти растворами поверхностно-активных веществ (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.
- **Вытеснение нефти растворами полимеров.** 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 заводнением. 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 выравниванию динамической неоднородности потоков жидкости и обеспечивает полноту охвата пластов заводнением.
- **Вытеснение нефти щелочными растворами.** При щелочном заводнении 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.

При всех перечисленных способах вытеснения трудноизвлекаемых запасов нефти формируются зоны фильтрации, аналогичные зонам при вытеснении нефти углекислотой. Следовательно, для создания нестационарных моделей указанных выше способов вытеснения можно воспользоваться решениями начально-краевых задач для обобщенных уравнений Бакли-Левверетта с учетом распределения баланса концентраций флюидов при вложенных гармонических управляющих воздействиях, определяемых также решениями (соответствующих рассматриваемому способу) обобщенного уравнения KdV – Бюргерса.

В докладе представлено исследование оптимизации второго из описанных методов за счет применения управляющих волновых воздействий, создаваемых в нефтеносном слое высокочастотного генератора, опущенного в нагнетающую скважину.

1. Модель диффузионного процесса

Высокочастотные волновые колебания ускоряют диффузию и приводят к тому, что резкие границы между водой 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.

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

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

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 мы пренебрегаем начальной толщиной слоя растворителя.

В процессе с течением времени вязкости составляющих смеси выравниваются. Это иллюстрируют Рис.1 и 2.

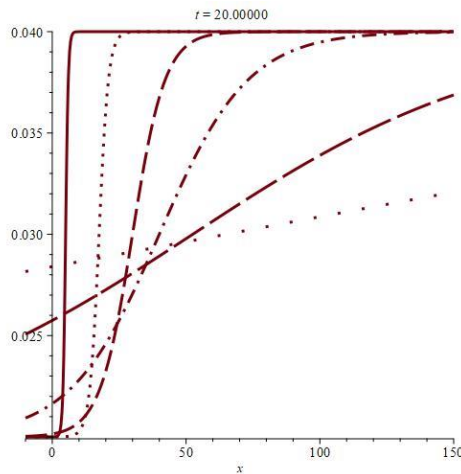


Рис.1. Изменение вязкости в соответствии с формулой 1. $\epsilon_2 = 0.04$, $\epsilon_1 = 0.02$, $\alpha = 3$, $\beta = 0.3$, $s = 5$. Слева направо показаны моменты $t=0; 4; 8; 12; 16; 20$

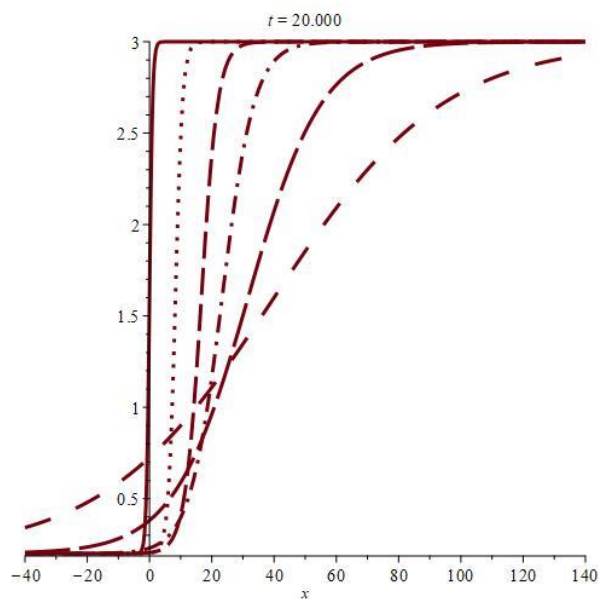


Рис.2. Изменение вязкости в соответствии с формулой 1. $\epsilon_2 = 3$, $\epsilon_1 = 0.2$, $\alpha = 3$, $\beta = 0.2$, $s = 0$. Слева направо показаны моменты $t=0; 4; 8; 12; 16; 20$

2. Качественная картина распространения гармонических колебаний в вязкой среде

Синусоидальные волновые воздействия высокой частоты, в том числе ультразвук, представляют наибольший интерес для практики нефтедобычи.

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.

Процесс возникновения пилообразных волн связан с дисперсионными эффектами: первоначально монохроматическая волна заменяется таким образом, что начинает включать высокочастотные гармоники, нарастающие вблизи слабых разрывов. Происходит перекачка энергии из основной гармоники в сильно поглощающиеся высокочастотные, что приводит к более интенсивному затуханию, см [3].

Данная качественная картина хорошо описывается уравнением Кортвега-де Фриза – Бюргерса для цилиндрических волн. Приведем его безразмерную нормированную форму:

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

где u – приведённая величина возмущения). Начально-граничная задача выглядит так:

$$u(x, 0) = a, u(0, t) = a + b\sin(kt), u(L, t) = a, u_x(L, t) = 0, L \gg 0. \quad (3)$$

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 – Бюргерса;

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

то же происходит с его решениями.

3. Численное моделирование распространения гармонических колебаний в среде переменной вязкости

Нами проведено численное моделирование вытеснения из пласта остаточной нефти с применением поверхностно активных веществ с применением волновых воздействий в соответствии с моделями, описанными в разделах 2 и 3.

На рисунках 3 – 6 оказана зона проникновения волновых воздействий одновременно с динамикой коэффициенты 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. Нас интересует, в первую очередь, 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 гармоники.

Дальнейшее распространение монотонной выпуклой формы ударной волны объясняется наличием постоянной составляющей гармоники; ее скорость соответствует скорости звука в вязкой среде. Для цилиндрической волны форма этого монотонного участка вплоть до ударного фронта участка задается формулой

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

как это показано в [4].

Здесь V - скорость звука, соответствующая амплитуде в среде с квадратичной нелинейностью.

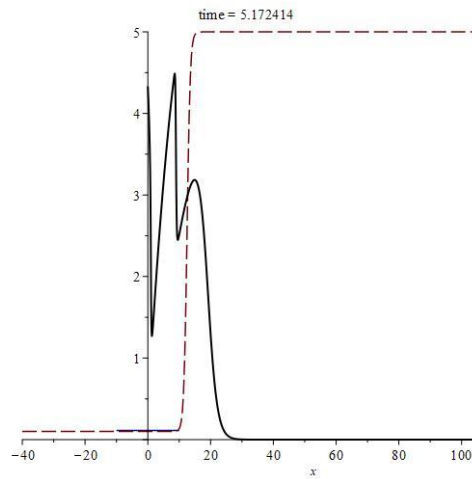


Рис. 3 Момент времени $t = 5$. Сплошная линия – амплитуда волнового воздействия, пунктирная линия – распределения вязкости в зависимости от расстояния от оси генератора колебаний

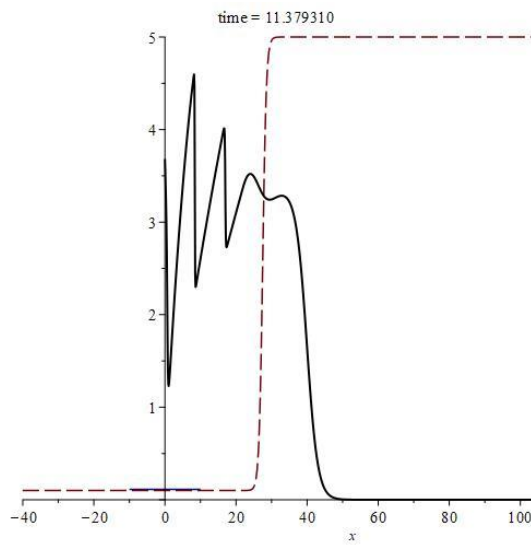


Рис. 4. Момент времени $t = 11$. Сплошная линия – амплитуда волнового воздействия, пунктирная линия – распределения вязкости в зависимости от расстояния от оси генератора колебаний

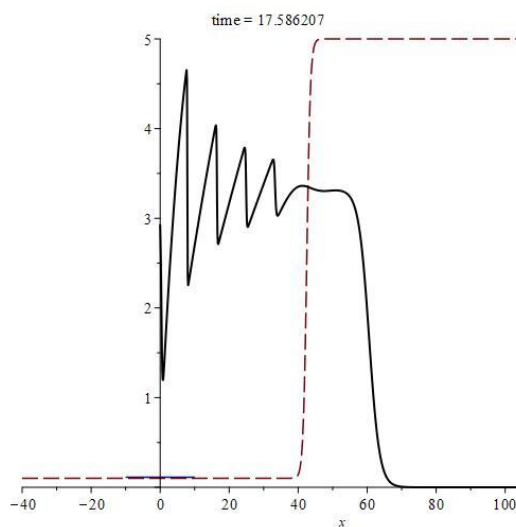


Рис. 5. Момент времени $t = 18$. Сплошная линия – амплитуда волнового воздействия, пунктирная линия – распределения вязкости в зависимости от расстояния от оси генератора колебаний

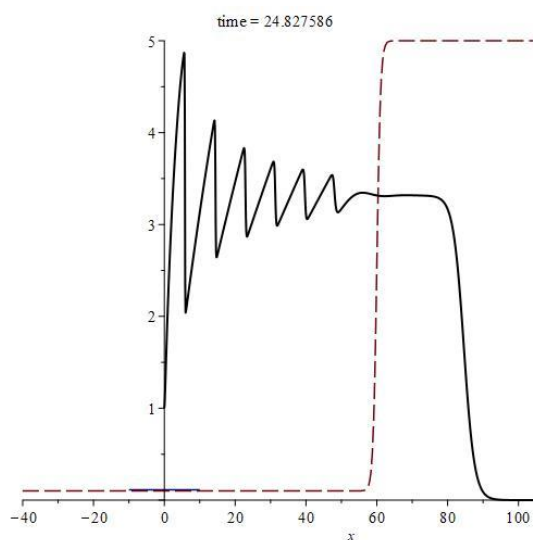


Рис. 6. Момент времени $t = 25$. Сплошная линия – амплитуда волнового воздействия, пунктирная линия – распределения вязкости в зависимости от расстояния от оси генератора колебаний

На основании анализа графиков 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 растворе и скорость процесса.

4. Заключение

В докладе 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 и сопровождается выравниванием фильтрационных параметров 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 приводят к тому, что резкие границы между водой 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. Нами изучена качественная картина этого процесса.

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.

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 волны: её 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.

Нами 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 растворе и скорость

процесса.

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 большей эффективности процессов вытеснения трудноизвлекаемых запасов нефти и значительному повышению нефтеотдачи пластов.

Литература

1. *Сургучев М.Л.* Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. - М.: Недра, 195. - 308 с.
2. *Земцов, Ю.В., Мазаев, В.В.* Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (литературно-патентный обзор).– Екатеринбург, Издательские решения. –2021. – 240 с
3. *Наугольных К.А.* Поглощение волн конечной амплитуды / в сб. Мощные ультразвуковые поля – М.: Наука, 1968. – С 7-
4. *Samokhin A.V.* On Monotonic Pattern in Periodic Boundary Solutions of Cylindrical and Spherical Kortweg–de Vries–Burgers Equations // *Symmetry* 2021, 13(2), 220.