

УДК 51-7

МОДЕЛИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ СВЕРХВЯЗКИХ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ

А.В. Самохин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: samohinalexey@gmail.com

А.В. Ахметзянов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: atlaswa@gmail.com

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

Аннотация: Добыча трудноизвлекаемых запасов нефти с использованием тепловых и физико-химических активных реагентов в комбинации с высокочастотными волновыми воздействиями приводят к увеличению фактора нефтеотдачи пластов за счет ускорения процессов диффузии в насыщенных пористых средах. Приведены результаты вычислительных экспериментов использующих математическую модель цилиндрических волн в направлении неизотермического фильтрационного потока флюидов и показана эффективность циклических управляющих волновых воздействий.

1. 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 и неизотермического (с периодическим прогревом пласта) вытеснения нефти с применением различных вариантов активных реагентов, см. [1-4].

Нами изучался метод использования 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.

При всех перечисленных способах вытеснения трудноизвлекаемых запасов нефти формируются последовательные циклические зоны фильтрации. Следовательно, для создания нестационарных моделей указанных выше способов вытеснения можно воспользоваться решениями начально-краевых задач для обобщенных уравнений Бакли-Левверетта с учетом баланса концентраций реагента и тепловой энергии в насыщенной флюидами (вода и нефть) пористой среде пластов при вложенных гармонических управляющих воздействиях, определяемых в свою очередь решениями обобщенного уравнения KdV – Бюргерса. Гармонические управляющие воздействия в общей модели разработки залежей нефти представляются с расщеплением по физическому процессу, т.е. разделением высокочастотных колебаний вкладываемых в усредненный процесс фильтрационного вытеснения нефти в пористых средах залежей нефти с трудноизвлекаемыми запасами.

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

Исследования являются продолжением и обобщением результатов работы [5].

2. 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 априорную модель, описывающую изменение вязкости смеси в рабочем пространстве:

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

Здесь: T – температура, k – коэффициент связи между вязкостью и температурой, 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.

Температурные воздействия являются периодическими по времени: за быстрым разогревом рабочей зоны паровоздушной смесью следует относительно более медленное остывание до некоторого критического значения. Управляющими параметрами процесса прогрева являются: температура и давление подаваемого пара а также дискретный (кусочно) постоянный режим работы.

Для приемлемой точности решения поставленных задач требуются детализированный подход в моделировании термодинамических процессов внутри пласта.

Мы описываем термодинамически равновесный поток пара, нефти, воды и ПАВ:

- тремя уравнениями стечением охрания сохранения импульса для каждой из фаз; фактически это уравнения связей Дарси;
- уравнениями сохранения их масс (сохранения массы битума и суммарной массы воды и пара);
- уравнением сохранения энергии.

С течением времени вязкости флюидов в рабочей зоне выравниваются, см. рис. 1.

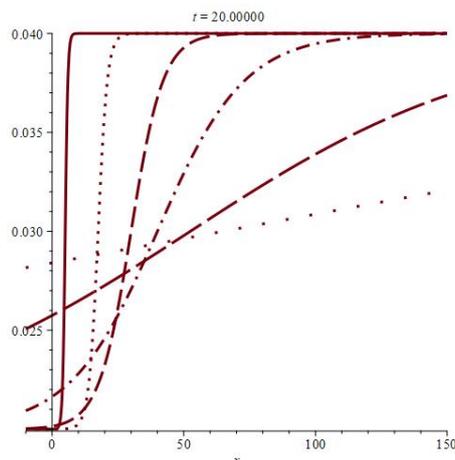


Рис.1. Изменение вязкости в соответствии с моделью. $\varepsilon_2 = 0.04$, $\varepsilon_1 = 0.02$, $\alpha = 3$, $\beta = 0.3$, $s = 5$. Слева направо показаны моменты $t=0; 4; 8; 12; 16; 20$.

3. 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.

После стабилизации форма волны продолжает меняться: затухание амплитуды постепенно сглаживает волну (сначала вновь приобретая квазигармоническую форму с исходной частотой и стремящейся к константе амплитудой синусоидальной компоненты).

Качественная картина процесса хорошо описывается уравнением Кортвега-де Фриза-Бюргера для цилиндрических волн (в безразмерной нормированной форме):

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

где u – приведённая величина возмущения

4. Численное моделирование распространения гармонических колебаний в среде переменной вязкости

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

На рис. 2 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 гармоник.

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

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

как это показано в статье [6].

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

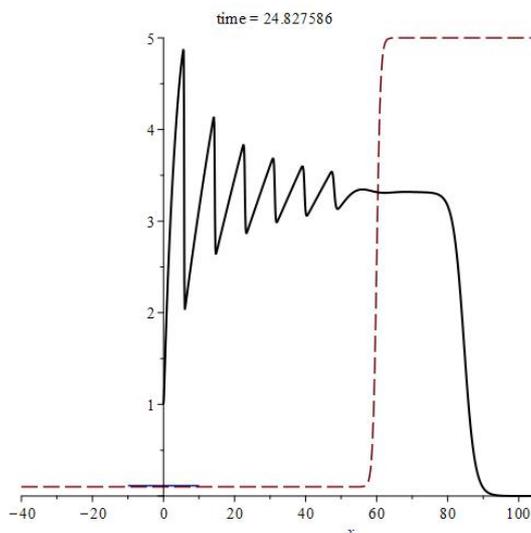


Рис. 2. Момент времени $t = 25$. Сплошная линия – амплитуда волнового воздействия, пунктирная линия – распределения вязкости в зависимости от расстояния от оси генератора колебаний.

Рис. 2 иллюстрирует распространение пилообразной волны вслед за движущейся границей раздела флюидов. На основании анализа подобных графиков можно сделать вывод об эффективности волновых воздействий в методе вытеснения остаточной нефти с применением ПАВ. За счет выбора подходящей начальной гармоник 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.

5. Заключение

В докладе рассматривается моделирование процессов добычи трудноизвлекаемых запасов нефти с использованием тепловых и физико-химических активных агентов в комбинации с управляющими высокочастотными волновыми колебаниями и представлены результаты качественных исследований с использованием вычислительных экспериментов на базе предложенной модели процессов.

Применение 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 комбинированный процесс управляющего воздействия распространяется ортогонально фильтрационному потоку. При этом 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 гармоник 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.

Можно быть уверенным в том, что 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.

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

Список литературы

1. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1995. 308 с.
2. Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов / Пер. с франц. М.: Недра, 1989. 422 с.
3. Сучков Б.М. Температурные режимы работающих скважин и тепловые методы добычи нефти. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2007. 406 с.
4. Земцов Ю.В., Мазаев В.В. Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (литературно-патентный обзор). Екатеринбург: Издательские решения, 2021. 240 с.
5. Akhmetzyanov A., Samokhin A. A Model of the Wave Displacement of Hard-to-recover Oil Fields Reservoirs by Active Reagents // Proceedings of the 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). IEEE, 2023. doi:10.1109/MLSD58227.2023.10303877.
6. Samokhin A.V. On Monotonic Pattern in Periodic Boundary Solutions of Cylindrical and Spherical Kortweg-de Vries-Burgers Equations // Symmetry. 2021. Vol. 13, No. 2. P. 220-235.