

DOI:

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПРИРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Ахметзянов А.В., Самохин А.В., Ярошенко Е.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65

atlaswa@gmail.com, samohinalexey@gmail.com, yaryegor@mail.ru

Аннотация: В процессе разработки месторождений нефти применяются волновые периодические возмущения для увеличения дебита скважин и повышения конечной нефтеотдачи пластов. В неоднородной среде, при наличии диссипации и/или дисперсии, гармонические колебания, создаваемые в забоях скважин, превращаются в пилообразные волны с периодическими ударными фронтами. Учёт и использование этого обстоятельства приведет к увеличению доли извлекаемых запасов месторождений: создаваемые опускным вибратором: внешние гармонические возмущения, преобразованные в диссипативной среде в пилообразные ударные волны вызывают кавитацию в жидкой среде, и вторичные ударные волны, образующиеся от схлопывающихся пузырьков, преодолевают капиллярные силы, удерживающие остатки нефти на поверхностях пустот и трещин. Эти эффекты приводят к заметному снижению проницаемости коллектора и значительному повышению конечной нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений.

Ключевые слова: периодические колебания в неоднородной среде, дисперсия, диссипация, пилообразные волны, кавитация.

Введение

Пилообразные волны — бегущая волна возмущения, профиль которых содержит как разрывы, так и гладкие участки. В среде без дисперсии любое периодическое возмущение на больших расстояниях превращается в "пилу с треугольными зубцами". Каждый период содержит разрыв и почти прямолинейный участок профиля. При дальнейшем распространении изменяются лишь пиковые значения возмущений. Профили пилообразных волн довольно устойчивы и мало изменяются как при парном взаимодействии, так и при слабом воздействии дополнительных факторов — дифракции, дисперсии, низкочастотной модуляции и т.п. То есть, пилообразная волна — явление, устойчивость которого связана с сильным проявлением нелинейных свойств среды.

Пилообразные волны аналогичны ударным волнам, но распространяются в средах с вязкостью. Стандартные ударные волны представляет собой пример сильного разрыва гидродинамических параметров, когда функции, их описывающие, претерпевают конечные разрывы. К сильным разрывам относятся также тангенциальные (контактные) разрывы. Существует, однако, понятие слабого разрыва, когда сами параметры непрерывны, а претерпевают разрывы те или иные их пространственные производные, причем только нормальные производные (пилообразные волны как раз и являются слабо разрывными). Поверхности слабого разрыва распространяются относительно среды со скоростью, равной скорости звука см. обзор [1].

Исследований и приложения теории нелинейных пилообразных волн связаны сейчас с распространением волн в неоднородных средах, см. обзор [2]. Эти проблемы можно условно разделить на две группы: задачи, связанные с проблемой формирования интенсивных воздействий (ударов), а также обратные задачи нелинейного неразрушающего контроля и диагностики (восстановление параметров источника, рассеивателей, трассы распространения сигнала).

1 Модели

Для описания пилообразных волн необходимо правильно определить положение и форму ударного фронта, а также величины возмущений при переходе через фронт ударной волны. С этой целью используются уравнения Бюргерса

$$u_t = -2uu_x + \varepsilon^2 u_{xx}$$

и Kortvega-де Фриза–Бюргерса

$$u_t = -2uu_x + \varepsilon^2 u_{xx} + \lambda u_{xxx},$$

приводящие к принципиально верному описанию характерных эффектов в пространственно одномерной ситуации. Различие между этими уравнениями состоит в том, учитывается ли дисперсия среды или нет (ε, λ — коэффициенты, постоянные для однородных сред, и связанные с

вязкостью/диссипацией и дисперсией среды, u -- приведённая величина возмущения). Начально-граничная задача выглядит так:

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

Волновая картина определяется отношением $\gamma = \varepsilon^2/\sqrt{\lambda}$. На рис. 1 изображена трансформация синусоиды в пилу при относительно малой диссипации, $\gamma = 0.22$. С увеличением расстояния x , пройденного волной, мелкие детали исходного временного профиля постепенно исчезают. На удалении от источника порядка нескольких характерных длин [5-8]. На всех рисунках движение вправо.

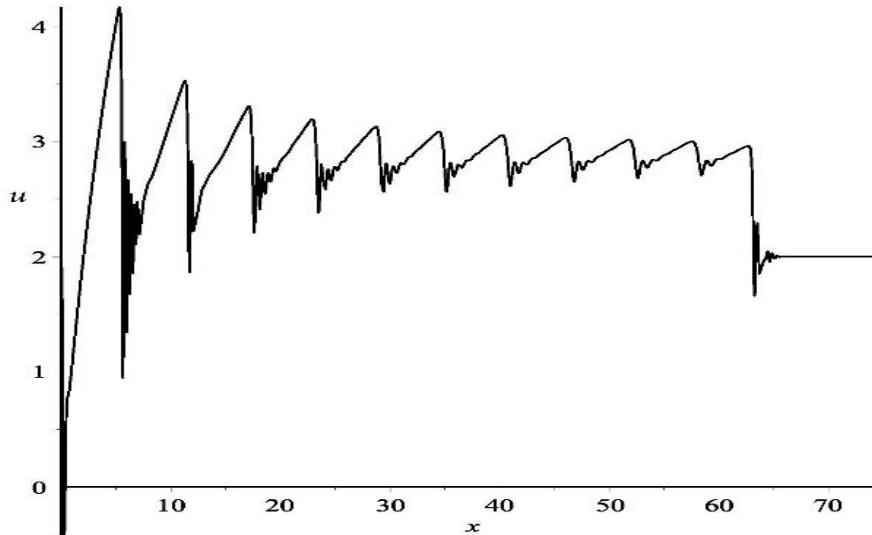


Рис. 1. Уравнение Kortvega-де Фриза-Бюргерса, $\gamma = 0.22$

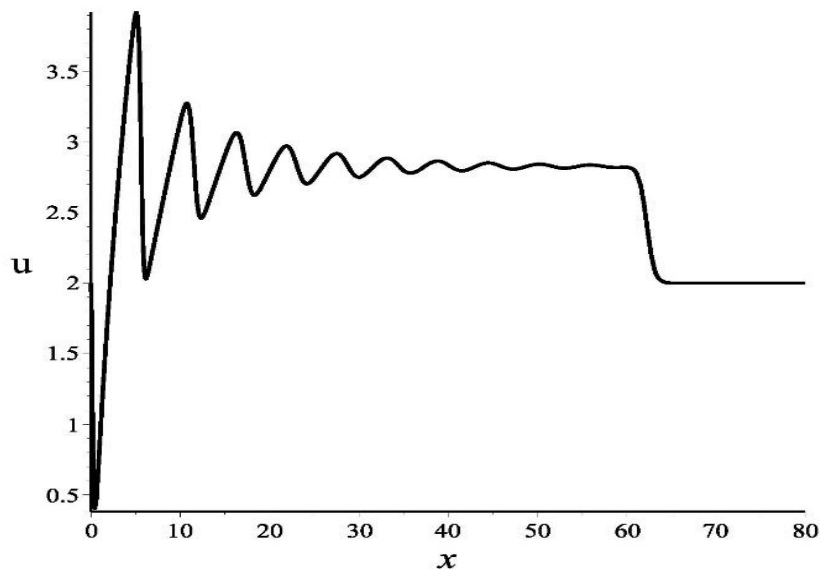


Рис. 2. Уравнение Kortvega-де Фриза-Бюргерса, $\gamma = 5.1$

На рис. 2 – то же, при заметной диссипации, $\gamma = 5.1$. Пилообразный профиль в этом случае наблюдается только вблизи источника колебаний. Для колебаний, описываемых уравнением Бюргерса ($\lambda = 0$), картина схожая, но отсутствуют осцилляции в начале каждого цикла, рис. 3, 4 и 5. На рис. 6 показана трансформация одинокого импульса, солитона для $\gamma = 0.22$.

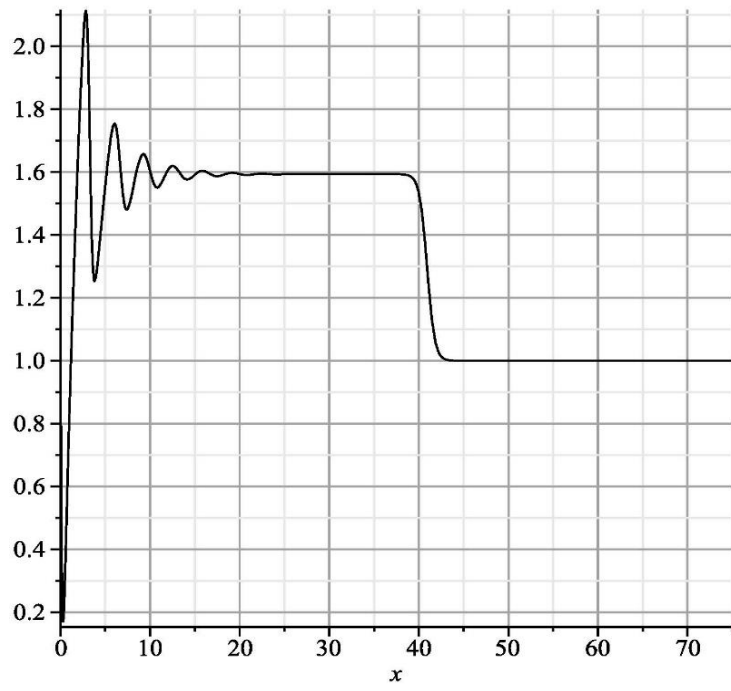


Рис. 3 Уравнение Бюргера, $\varepsilon = 0.5$

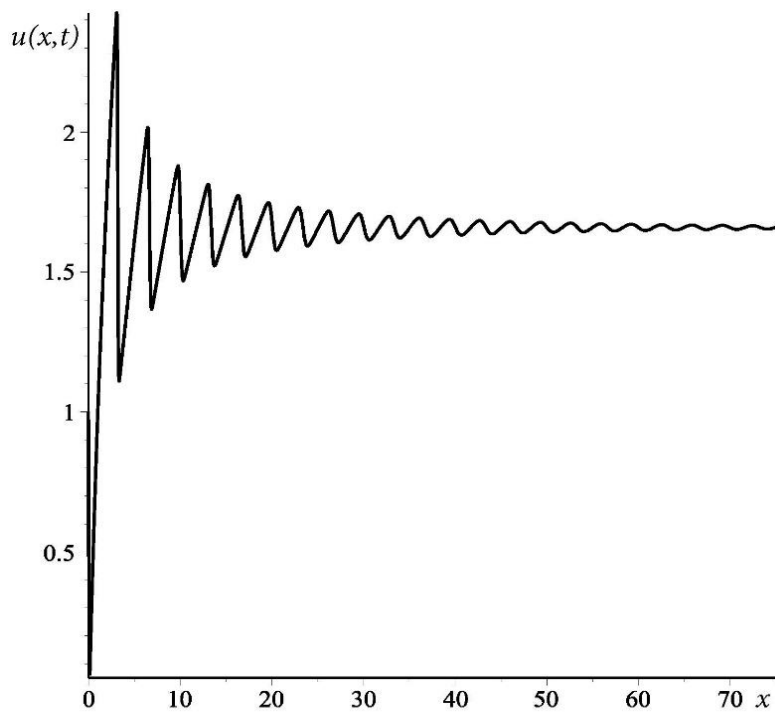


Рис. 4 Уравнение Бюргера, $\varepsilon = 0.2$

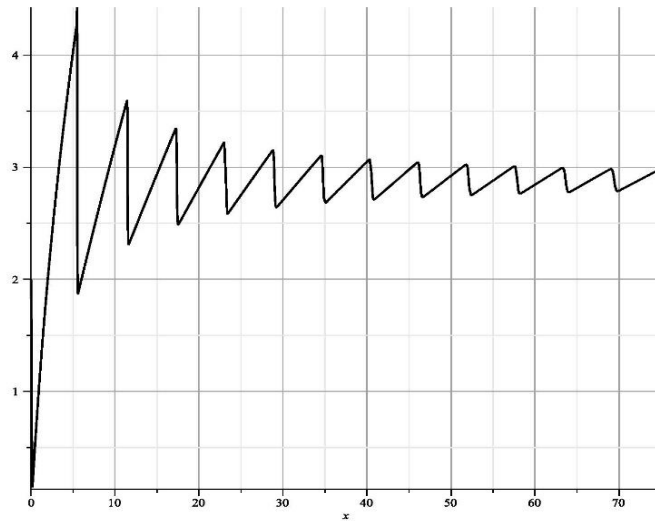


Рис. 5. Уравнение Бюргера, $\varepsilon = 0.15$

Для полупрямой $x \in [0; \infty)$ и периодического возмущения в точке $x = 0$ вида $u(0, t) = u_0 + b \sin(\omega t)$ асимптотика соответствующих решений уравнения Бюргера такова:

$$u = \frac{a}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\theta)}{\sinh(n(1+X)/2 \cdot R)}$$

Здесь R - число Рейнольдса, $\theta = \omega(t - x/u_0)$

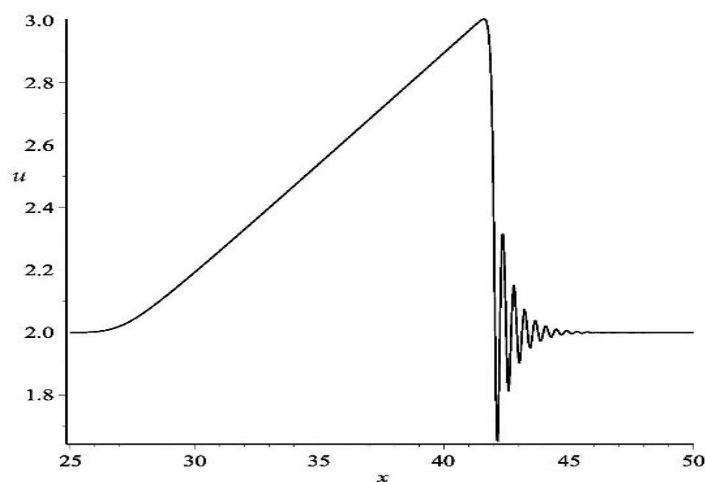


Рис. 6. Уравнение Кортвега-де Фриза-Бюргера, трансформированный солитон

Приведённые выше уравнения Бюргера и Кортвега-де Фриза-Бюргера соответствуют простейшей модели с одной пространственной переменной. Они позволяют оценить принципиальные эффекты, но для адекватного описания волн в плоских слоях, характерных для нефтегазовых месторождений, следует использовать двумерные уравнения.

Двумерное уравнение Бюргера представляет собой особую форму несжимаемого уравнения Навье-Стокса, не имеющего члена давления и уравнения неразрывности. Оно является распространённым уравнением в частных производных от гидродинамики и часто используется для различных физических приложений, таких как моделирование газовой динамики и ударных волн, исследование малых волн на воде, при рассмотрении модели химических реакций - диффузии и т.д.

Благодаря значительному набору симметрий уравнение имеет значительный запас автомодельных решений (в том числе, типа бегущих ударных волн, что следует из наличия галилеевой симметрии), а благодаря наличию линеаризующего преобразования Коула-Хопфа известны многие точные решения. По этой причине уравнение также использовалось для сравнения нескольких численных алгоритмов. В последние несколько лет численное решение системы многомерных уравнений Бюргера привлекло большое внимание и привело к различным методам конечных разностей, конечно-элементных и граничных элементов.

Двумерное уравнения Бюргера имеет вид

$$u_t = -uu_x - vu_y + \frac{1}{R}(u_{xx} + u_{yy})$$
$$v_t = -uv_x - vv_y + \frac{1}{R}(u_{xx} + u_{yy})$$

Здесь неизвестные функции u, v зависят от x, y, t и R – число Рейнольдса.

Начально-граничная задача на области D формулируется так:

$$u|_{\partial D} = f(x, y, t)|_{\partial D}, v|_{\partial D} = g(x, y, t)|_{\partial D},$$

где f и g – известные функции. Конкретно, для задачи моделирующей опускной вибратор, область представляет собой кольцо, а границей является пара концентрических окружностей; на меньшей окружности задаётся гармоническое колебание, а на внешней окружности (как и внутри) изначально нулевые значения

Эта модель ближе к реальным задачам, однако не учитывает вероятных неоднородностей пластов, которые превращают постоянные коэффициенты уравнений в функции пространственных переменных (или, даже, в динамически изменяющиеся функции). Принципиальные эффекты, возникающие в неоднородной среде, изучались в [5, 8].

2 Возможности применения в нефтедобыче

Ближайшей перспективой наших исследований является определение диапазона γ (или определение характерной зависимости γ от пространственных координат) для нефтеносных слоев.

Мы исходим из аналогии с медицинскими приложениями — прежде всего ударным волновым бесконтактным удалением почечных и желчных камней из почек человека. Периодические акустические импульсы генерируются вне тела пациента и дробят камни в его почках: при этом фронтальная поверхность мишени разрушается, как правило, за счет кавитации — большими давлениями при коллапсе пузырьков либо кумулятивными струйками, образующимися при их несимметричном схлопывании [3]. Тыльная поверхность может разрушаться отрицательными давлениями, возникающими при отражении фронта импульса от поверхности внутрь образца [4].

Акустическая кавитация является результатом концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и схлопыванием кавитационных пузырьков. В целом образование кавитационного пузырька можно описать следующим образом. В фазе разрежения акустической волны в жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром окружающей жидкости. Во время сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который подвергается сильному адиабатическому сжатию.

Необходимо отметить, что кавитацией в жидкости это образование заполненных паром и газом полостей или пузырьков при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров. Соотношение содержания газа и пара в полости может быть различным (теоретически от нуля до единицы). Но понижение давления в жидкости до давления насыщенных паров возможно также при кипении или вакуумировании жидкости. Но эти процессы распространяются по всему объему жидкости в отличие от кавитации, которая имеет ограниченную область. Для решения сформулированных задач нас интересует акустическая кавитация, возникающую при прохождении через жидкость акустических колебаний.

В момент схлопывания пузырьков, давление и температура газа достигают значительных величин (до 100 МПа и 1000°C), см. [9]. После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве.

Поскольку в процессе нефтедобычи при вытеснении нефти активными реагентами часть углеводородов удерживается в поровом пространстве пласта капиллярными силами. В зависимости от типа смачиваемости породы нефть может образовать тонкую пленку на стенках пор, удерживаемую силами адгезии и не участвующую в фильтрационном процессе. Также возможно образование мелкодисперсных капель углеводородов, занимающих поровое пространство и блокирующих фильтрационное течение. Эти эффекты приводят к заметному снижению проницаемости коллектора и значительно повышению конечной нефтеотдачи пластов природных залежей нефти и газа.

Основным методом повышения нефтеотдачи в стране является заводнение. Широкое применение заводнения в свое время позволило значительно повысить эффективность разработки нефтяных

месторождений. Однако за годы промышленной разработки нефтяных месторождений их основные эксплуатационные объекты достигли поздней стадии, которая характеризуется высокой выработанностью залежей нефти и значительным обводнением продукции скважин.

Основной целью наших планируемых исследований является исследование и расчёт следующего процесса: внешние гармонические возмущения, преобразованные в диссипативной среде в пилообразные ударные волны вызывают кавитацию в жидкой среде, и вторичные ударные волны, образующиеся от схлопывающихся пузырьков, преодолевают капиллярные силы, удерживающие остатки нефти на поверхностях пустот и трещин. Результаты этих исследований могут привести к увеличению нефтеотдачи до 10-15% даже на уже истощенных месторождениях за счет доизвлечения остаточных запасов. Таким образом применение таких технологий в будущем будет эквивалентно открытию новых крупных месторождений. При этом затраты на достижение эквивалентного объема дополнительной добычи нефти будут минимальны, поскольку на старых месторождениях основная инфраструктура уже существует и не нужно бурить и осваивать скважины, сооружать нефтегазосборные сети, дороги и другие необходимые промышленные объекты.

3 Актуальные проблемы, теоретические и вычислительные

На пути к этим целям есть ряд теоретических трудностей. Процесс распространения ударных пилообразных волн в жидкостях имеет ряд особенностей, т. к. при высоких температурах, плотностях и больших градиентах различных параметров происходят сильные межмолекулярные взаимодействия, возможны разрывы химических связей, фазовые превращения и т. д. Особенно это касается воды, многие параметры которой имеют сложные зависимости от температуры и давления. В настоящее время создано много структурных моделей воды, однако не существует единой микроскопической теории строения, которая объяснила бы всю совокупность физических свойств воды, образования и распространения ударных волн в воде.

Для расчета параметров на фронте ударной пилообразной волны необходимо пользоваться ударной адиабатой (зависимостью между давлением и плотностью в ударном фронте). В отличие от газов для конденсированных сред, включая жидкость, получить уравнения состояния нелегко. Поэтому их определяют экспериментально и пользуются эмпирическими формулами, см [2].

Отметим, что рисунки соответствуют процессам в однородной среде, для которой получены аналитические оценки величин скачков в разрывах. В стратифицированных средах, характерных для месторождений, модели значительно усложняются, и, по-видимому, потребуется создание эффективной и скоростной компьютерной модели.

Проблема численного решения таких уравнений состоит в том, чтобы достичь достаточной точности одновременно в разрывных областях (для ударных волн) и на относительно гладких участках. Для этого необходимо устранить дефекты классических схем, иногда приводящие к паразитным осцилляциям вблизи разрывов (отметим, впрочем, что для моделей с дисперсией похожие осцилляции имеют внутренние причины!), нелинейным неустойчивостям на гладких участках, порождаемым значительными градиентами.

Для устранения перечисленных трудностей в необходимо применять схемы, для которых: порядок точности для гладкой части не ниже второго; при этом расчет разрывов происходит без порождения фиктивных осцилляций и без введения искусственной вязкости при отсутствии дисперсии. Так, обнадеживающие результаты получены в работе [10], где применялась конечно-разностная схема Кранка-Николсона для решения двумерных нелинейных уравнений Бюргерса и расчёты двух численных примеров представлены для иллюстрации эффективности метода.

Заключение

Основным методом повышения нефтеотдачи является заводнение (закачка воды и водные растворы активных реагентов в сочетании с тепловыми и другими физико-химическими воздействиями) через нагнетательные скважины. Широкое применение такого управляющего воздействия в свое время позволило значительно повысить эффективность разработки нефтяных месторождений. Однако за годы промышленной разработки нефтяных месторождений их основные эксплуатационные объекты достигли поздней стадии, которая характеризуется высоким истощением извлекаемых запасов залежей нефти и значительным обводнением продукции скважин.

Широкое применение волновой технологии в нефтяной промышленности началось в 80-х годах прошлого века. В частности, проводились обработки пласта в призабойных зонах скважин волновыми генераторами, с целью очистки призабойной зоны от коагуляционных загрязнений. При этом

неоднократно наблюдалось увеличение дебитов не только в той скважине, которая подвергалась обработке, но и в окружающих ее скважинах. В этих удаленных скважинах наблюдалось также повышение нефти и снижение обводненности. Таким образом, была показана возможность охвата волновым воздействием системы, связанных гидродинамическим влиянием скважин. Повышение нефтеотдачи было зафиксировано и при обработке месторождений волнами, возбуждаемых с помощью гидроударов. Вышеуказанные результаты свидетельствуют, что волновое воздействие на пласт способно создать в поровом пространстве силы, значительно превышающие силы, существующие при стационарной фильтрации, что создает предпосылки для возможности освобождения капиллярно удерживаемой нефти и повышения нефтеотдачи. Однако, в настоящее время исследований механизмов воздействия волн на жидкость, удерживаемую в поровом пространстве, недостаточно. По существу, научные основы этого важного направления не созданы. Также недостаточно изучены волноводные свойства пластов, обусловленные их природными неоднородностями: вертикальной и горизонтальной слоистостью, наличием пропластков, трещин и разломов.

В дальнейших исследованиях мы планируем применить теорию пилообразных ударных волн к следующим задачам / целям:

- повышению нефтеотдачи при разработке неоднородных (трещиноватых и трещиновато-пористых) нефтенасыщенных резервуаров с учетом капиллярного взаимодействия между породой и фильтрующимися флюидами;
- сейсмическим исследованиям для выявления зон не охваченных фильтрационным процессами;
- вытеснению нефти активными реагентами и доизвлечения этих остаточных запасов, с применением физико-химических, тепловых, волновых и др. управляющих воздействий.

Рисунки в статье созданы при помощи пакета *PDETools* программы *Maple*.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-29-10013.

Литература

1. Шарфарец Б. П. О динамике ударных волн в жидкости. обзор. // Научное приборостроение, 26, № 4, 2016 - С. 43–5
2. Руденко О.В. Нелинейная пилообразные волны // УМН, 165, № 9, 1995 – С. 1011-1036
3. Church C.C., Crum L.A., in Proc. of 13 Inter. Congress of Acoust., 4, Belgrade 1985, p. 205
4. Musanov A.G., Rudenko O.V., Sapozhnikov O.A., in Advances of Nonlinear Acoustics, Singapore. World Scientific, 1993. P. 321
5. Samokhin A.V., The KdV soliton crosses a dissipative and dispersive border // arXiv:2002.00432 [nlin.SI], 2020. 11 pages
6. Samokhin A.V., Soliton transmutations in KdV--Burgers layered media, Journal of Geometry and Physics, 148, February 2020, 9 pages, 103547. <https://doi.org/10.1016/j.geomphys.2019.103547>
7. Samokhin A.V., Reflection and refraction of solitons by the KdV–Burgers equation in nonhomogeneous dissipative media, Theoretical and Mathematical Physics, 197(1): 1527–1533 (2018), DOI: 10.1134/S0040577918100094
8. Samokhin A., Nonlinear waves in layered media: solutions of the KdV -- Burgers equation // Journal of Geometry and Physics 130 (2018) pp. 33–39
9. Супотюк М.Г. Акустическая кавитация. - М.: Наука, 2008. 271с.
10. Srivastava V.K., Tamsir M, Bhardwaj U., Sanyasiraju YVSS, Crank-Nicolson Scheme for Numerical Solutions of Two-dimensional Coupled Burgers' Equations // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2, Issue 5, May-2011, pp. 1 - 7