

## ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ НЕФТЯНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ И ВОЗМОЖНОСТЬ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ТОНКИХ ПЛЕНОК И КАПЕЛЬ НЕФТИ

В. Л. Барабанов  
(ИПНГ РАН)

В нефтяной практике принято разделять продуктивные коллекторы по смачиваемости поверхности пор на гидрофильные и гидрофобные [1].

В гидрофильных коллекторах имеется тенденция к заполнению мелких пор водой и к непосредственному контакту водной фазы с большей частью внутрипоровой поверхности. Нефть занимает центр наиболее крупных пор, а также расширения поровых каналов промежуточных размеров. Нефть и вода, как правило, образуют непрерывные фазы. В гидрофобных коллекторах прослеживается тенденция к заполнению нефтью более мелких пор и к непосредственному контакту нефти с большей частью внутрипоровой поверхности. Нефть образует сплошную пленку. Остаточная вода является прерывистой фазой и представлена в виде диспергированных капель в центре наиболее крупных пор.

При заводнении гидрофильных коллекторов вода постепенно заполняет поры от мелких к более крупным, что сопровождается вытеснением нефти из крупных пор. Остаточная нефть распределена в поровом пространстве сложным образом: часть ее остается в виде менисков в тупиковых порах, часть блокируется капиллярными силами в областях, объединяющих единицы и десятки сообщающихся пор. При заводнении гидрофобных коллекторов происходит постепенное заполнение пор водой от крупных к мелким. Остаточная нефть распределяется в поровом пространстве в виде приповерхностных пленок с высокой степенью сплошности, что намного увеличивает период основной нефтеотдачи, но зато суммарная нефтеотдача гидрофобных коллекторов может превышать нефтеотдачу гидрофильных.

Представлены результаты лабораторных экспериментов по влиянию низкочастотного сейсмического воздействия в диапазоне частот от 5 до 40 Гц на фильтрационные параметры водо- и нефтенасыщенных сред. Обнаружено универсальное сходство реакции порового давления на сейсмическое воздействие, что проявляется в его локальном повышении. При этом изменяются и электрические характеристики порового пространства в области активной фильтрации. Возможной причиной этого является изменение смачиваемости поверхности пор под влиянием наведенных слабых электромагнитных полей. Обнаружено также, что на поздних стадиях несмешивающегося вытеснения нефти водой в пористых средах могут формироваться автоколебательные структуры. Период колебаний нефтяных капель и пленок может варьировать от десятых долей секунды и менее до первых минут. Режим автоколебаний, как правило, отличается сильной неустойчивостью, но способен активизироваться за счет внешнего резонансного волнового воздействия. Обсуждаются возможности метода вибросейсмического воздействия в практике разработки обводненных нефтяных месторождений.

The laboratory experiments for the influence of low-frequency seismic waves from 5 to 40 Hz on the permeability of water and oil-filled porous media were carried out. The universal response of pore pressure on the seismic action was found. The pore pressure is increased during the action. The electrical parameters of pore space in the area of the active multiphase flow are changed too. The possible cause of the effect is the change of the wettability of pore surface due to induced weak electric and magnetic fields. The self-organized oscillation structures can be formed on the later stages of the immiscible displacement oil by water. The period of the oscillations can be varied from less than second to more than minute. These oscillations are strong non-steady but may be induced by internal resonance wave simulations. The perspective of the seismic wave simulation method for the recovery of strong flooding oil reservoirs is discussed.

Эти особенности заводнения коллекторов с разной смачиваемостью неоднократно подтверждались экспериментально (см., например, работы [2, 3]).

В то же время, очевидно, что разделение нефтяных коллекторов на гидрофильные и гидрофобные есть идеализация действительности. Коллектор считается гидрофильным, если в сухом состоянии внутрипоровая поверхность менее чем на 17 % заполнена углеводородными соединениями, и гидрофобным, если углеводороды заполняют более 40 % внутрипоровой поверхности [4]. Смачиваемость коллекторов может значительно изменяться со временем. После формирования залежи в первоначально гидрофильных породах некоторые компоненты нефти могут проникать через водную пленку и адсорбироваться на внутрипоровой поверхности, делая ее все более гидрофобной. Гидрофобизация поверхности происходит в основном за счет полярных молекул поверхностно-активных углеводородов —

нафтеновых кислот, смол, асфальтенов и др., которые занимают активные центры минеральной поверхности [5].

Степень гидрофобизации нефтяных коллекторов может изменяться в широких пределах. Так, согласно работе [6], для коллекторов Уренгоя доля гидрофобной поверхности пор составляет 20...25 %, на Астраханском газоконденсатном месторождении — 19 и 25 % соответственно для газо- и нефтесодержащих пластов.

Таким образом, реальные нефтяные коллекторы в большинстве своем характеризуются смешанным типом смачиваемости — крупные поры покрыты пленкой адсорбированной нефти и являются преиму-

щественно гидрофобными, мелкие поры насыщены водой и относятся преимущественно к гидрофильным. При заводнении коллекторов со смешанной смачиваемостью происходит как бы встречное заполнение пор водой: от мелких к крупным и от крупных к мелким. В результате период нефтеотдачи увеличивается, но возрастает и ее эффективность [1].

Эти особенности микроструктуры смачиваемости и закономерности нефтеотдачи подтверждены и результатами экспериментов, и данными численного моделирования [7]. По разным данным максимум нефтеотдачи достигается при степени гидрофобизации поверхности пор от 30 до 60 %. Эта величина может существенно меняться в зависимости от минерального состава скелета породы, физико-химических свойств насыщающих жидкостей и других факторов.

Анализ приведенных представлений о роли смачиваемости при разработке продуктивных коллекторов приводит к выводу о том, что овладение и правильное использование методов, регулирующих смачиваемость, — мощный инструмент в практике нефтедобычи. Одним из таких методов является направленное низкочастотное сейсмическое воздействие на залежь [8].

Ниже изложены некоторые результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния низкочастотного сейсмического воздействия на фильтрационные процессы в проницаемых пористых средах и дается их интерпретация с точки зрения влияния упругих волн на микроструктуру межфазной поверхности.

Лабораторные эксперименты проводили с различными по абсолютной проницаемости искусственными и естественными геоматериалами — от 15 мД до 20 Д. Исследовали следующие режимы фильтрации: 1) стационарную однофазную фильтрацию воды или нефти соответственно через первоначально водо- или нефтенасыщенные образцы; 2) стационарную двухфазную фильтрацию смеси вода — нефть с разным соотношением заданных входных расходов; 3) нестационарное вытеснение нефти водой или воды нефтью при постоянном или варьирующем во времени расходе вытесняющей фазы. В процессе экспериментов фиксировали следующие параметры: вариации порового давления в двух или трех точках по длине образца; вариации электросопротивления и разности естественных потенциалов на трех или более участках образца; вариации выходного парциального расхода жидкостей. Упругое сейсмическое воздействие на пористую среду осуществляли в режиме одноосного сжатия и расширения с амплитудой смещения не более 1 мкм. Частота колебаний варьировала от 10...15 до 40...50 Гц. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

В результате экспериментов было зафиксировано влияние сейсмического воздействия на параметры одно- и двухфазных фильтрационных потоков. Это проявилось, прежде всего, в повышении порового давления внутри временного интервала воздействия.

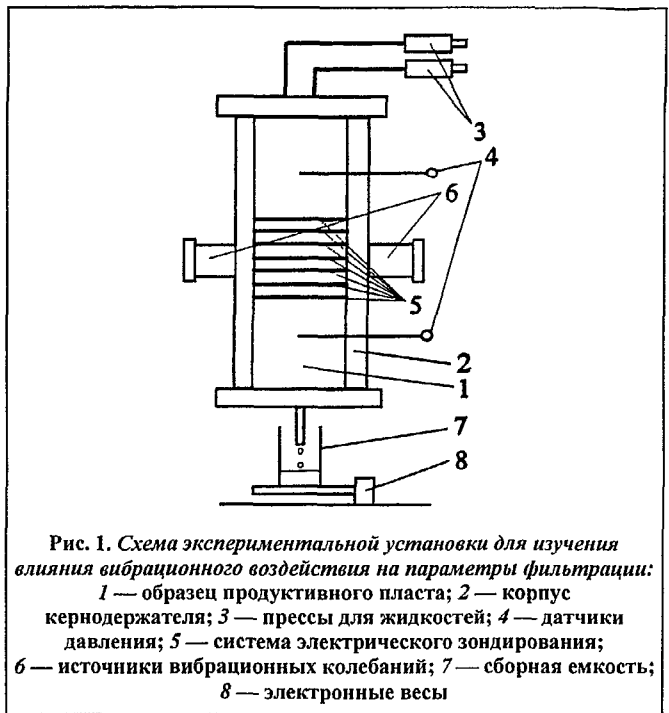


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения влияния вибрационного воздействия на параметры фильтрации: 1 — образец продуктивного пласта; 2 — корпус; 3 — прессы для жидкостей; 4 — датчики давления; 5 — система электрического зондирования; 6 — источники вибрационных колебаний; 7 — сборная емкость; 8 — электронные весы

На рис. 2 представлены результаты одного из экспериментов по вытеснению нефти водой после пропускания через образец приблизительно пяти поровых объемов воды, т. е. на участке кривой вытеснения, приближающейся к асимптоте. Очевидно, что в результате сейсмического воздействия изменилось не только поровое давление в двух точках измерения (кривые 1 и 2), но и формально рассчитанная по этим данным фазовая проницаемость по воде (кривая 3). Общий рост проницаемости, который был связан с

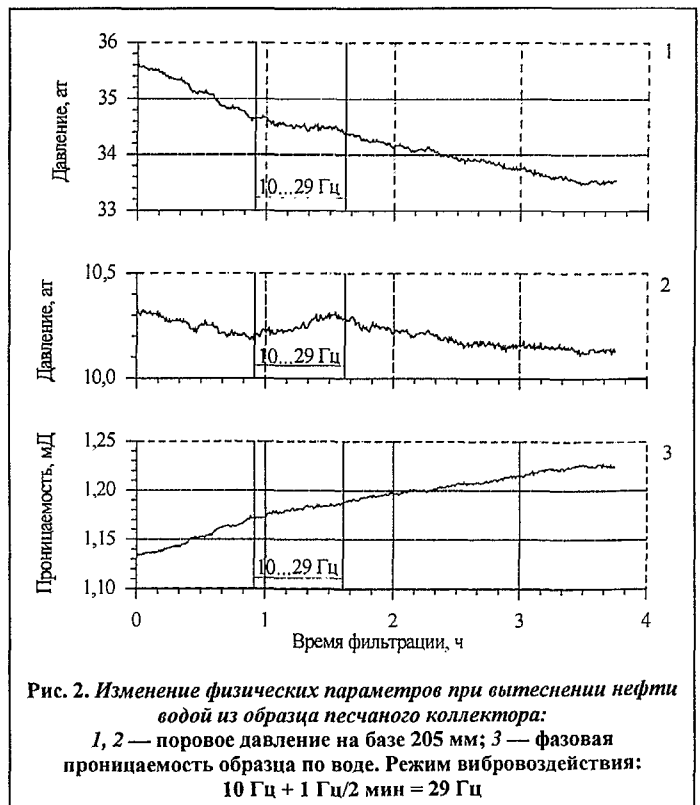


Рис. 2. Изменение физических параметров при вытеснении нефти водой из образца песчаного коллектора: 1, 2 — поровое давление на базе 205 мм; 3 — фазовая проницаемость образца по воде. Режим вибровоздействия: 10 Гц + 1 Гц/2 мин = 29 Гц

продолжающимся постепенным выносом из образца нефти, в результате сейсмического воздействия замедлился. Аналогичные результаты были получены и по другим экспериментам. Как правило, проницаемость по вытесняющей фазе в результате сейсмического воздействия ухудшалась. Было обнаружено также, что повторное сейсмическое воздействие внутри одного цикла фильтрации, как правило, либо вообще не проявляется в изменении порового давления, либо приводит к его скачкообразному снижению и сопровождается дополнительным выходом из модели вытесняемой фазы. Во многих деталях результаты лабораторного моделирования оказались сходными с данными натурных вибрационных экспериментов на нефтеносных и водоносных пластах [9—12].

Детальный анализ экспериментального материала позволил сделать заключение о коренной причине наблюдаемого эффекта. Эта причина заключается во влиянии низкочастотных сейсмических колебаний на тончайший пограничный слой на контакте минеральный скелет—жидкость или, иными словами, на смачиваемость внутриводной поверхности по отношению к разным по химическому составу жидкостям.

С точки зрения электрокинетики этот пограничный слой является двойным электрическим слоем Гюо-Чепмена, характеристики которого в конечном итоге определяют поверхностные явления. В упрощенном изложении физика формирования двойного электрического слоя состоит в следующем [13, 14]. Если молекулы жидкости представить в виде точечных силовых центров, обладающих дипольным или квадрупольным моментом, то на поверхности жидкости эти молекулы должны выстраиваться со строго определенной, преимущественно единой, ориентацией, нарушаемой малыми тепловыми флуктуациями. Благодаря этому поверхность жидкости оказывается покрытой «жестким» слоем (слоем Гельмгольца), толщина которого равна размеру одной молекулы. Если жидкость находится в контакте с твердой фазой, обладающей адсорбционным потенциалом, избирательным к ионам определенного заряда, то вне неподвижного слоя Гельмгольца формируется размытый диффузионный слой, плотность зарядов в котором убывает с увеличением расстояния от поверхности раздела фаз. Знак и величина заряда на поверхности твердой фазы зависят от ряда факторов и, прежде всего, от условий ее образования и дальнейшей эволюции. К числу этих факторов относятся температура, давление, рН насыщающей поры жидкости, равновесной с минеральной фазой.

В конечном итоге структура и характеристики двойного электрического слоя отражают степень смачиваемости поверхности порового пространства по отношению к заполняющим поры жидкостям. Если предположить, что низкочастотное сейсмическое воздействие влияет на адсорбционную способность поверхности порового пространства и вследствие этого на ее смачиваемость и электрокинетические параметры, то в результате это проявляется в виде изменчиво-

сти таких макропараметров, как поровое давление и фазовая проницаемость.

Это подтверждается влиянием сейсмического воздействия на электрические параметры пористой среды, обнаруженным в лабораторных экспериментах по вытеснению нефти водой. Так, на рис. 3 представлен фрагмент изменения разности естественных электрических потенциалов на трех разных базах внутри рабочей части образца. Очевидно, что при сейсмическом воздействии произошло необратимое изменение разности потенциалов одинакового знака с амплитудой от 4 до 6 мВ.

Физический механизм, определяющий влияние низкочастотных сейсмических колебаний на параметры многофазной фильтрации в проницаемых пористых средах, представляется в виде сложной разветвленной цепочки эффектов, каждый из которых подтверждается экспериментально.

Так, относительно недавно было обнаружено, что низкочастотное сейсмическое воздействие с земной поверхности приводит к увеличению кажущейся электрической проводимости горных пород терригенного комплекса, особенно на участках, где развиты тектонические нарушения, предположительно флюидонасыщенные. Эти результаты были получены при зондировании становлением электрического поля верхней части разреза Бузулукской впадины (север Прикаспия) [15]. Отмечается, что увеличение проводимости сохраняется более суток после вибрационного воздействия.

В экспериментах с образцами терригенных пород со смешанной, искусственно-регулируемой смачиваемостью, насыщенных смесью нефть — вода, установлено увеличение электрической проводимости при уменьшении смачиваемости поверхности пор [16]. Известно также, что электрическая поляризация поверхности твердой фазы на границе с электролитом приводит к изменению краевого угла смачиваемости [17]. При этом в большинстве экспериментально исследованных систем водный раствор — металл максимальная смачиваемость наблюдается вблизи нулевого потенциала, а при положительном или отрица-

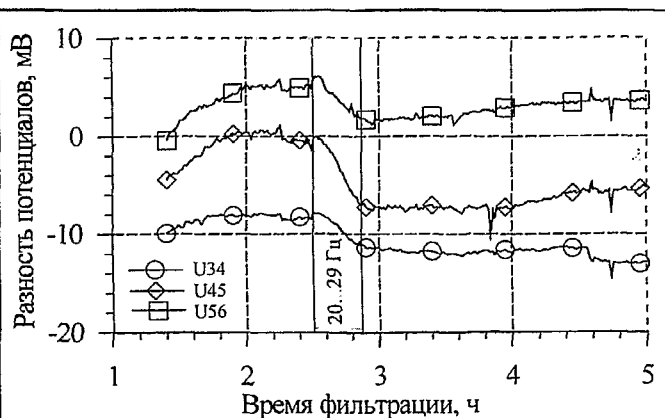


Рис. 3. Влияние вибровоздействия на разность естественных потенциалов в рабочей части образца при вытеснении нефти водой

тельном потенциале смачиваемость ухудшается. Известно также, что вода после прохождения через магнитное поле значительно хуже смачивает многие твердые тела и это изменение смачиваемости может сохраняться от нескольких часов до нескольких суток. Эти и другие факты позволяют предположить, что низкочастотное сейсмическое воздействие на нефте- и водонасыщенные пласты при благоприятных условиях может привести к возбуждению слабых электромагнитных полей, которые в свою очередь повлияют на смачиваемость поверхности пор по отношению к насыщающим жидкостям.

Этот эффект может усиливаться благодаря резонансному возбуждению собственных колебаний тонких пленок и капель нефти, которые существуют в пористой среде при двухфазной фильтрации и несмешиваемом вытеснении. Для изучения этих процессов были проведены специальные лабораторные эксперименты на плоской прозрачной модели пористой среды.

Модель представляет собой две тонкие пластины из кварцевого песка, плотно склеенные друг с другом. На внутренней поверхности пластин выполнены линейные каналы толщиной от 0,3 до 0,9 мм. Размер модели 70×70 мм. Каналы образуют ромбовидную регулярную сетку. Расстояния между соседними каналами — 4 мм по горизонтали и 15 мм по вертикали. Боковые стенки модели непроницаемые. На входе и выходе каналы соединены узкими отверстиями, поперечными по отношению к фильтрационному потоку. Модель устанавливали либо горизонтально, либо вертикально с возможностью подачи различных жидкостей сверху или снизу. Для детального наблюдения структуры насыщения каналов использовали биокюльеры с 7-кратным увеличением. В процессе экспериментов замечали вариации давления и расход жидкости.

Перед началом каждой серии экспериментов предварительно очищенную и высушенную модель вакуумировали и заполняли дегазированной водой. Затем в модель нагнетали порцию нефти. В качестве последней использовали образцы натуральных нефтей с плотностью от 0,75 до 0,80 г/см<sup>3</sup> и вязкостью от 3,0 до 5,2 сП. Заполнение водонасыщенной модели нефтью осуществляли до прорыва языка к выходному каналу. Вытеснение нефти водой производили после достижения некоторого равновесного состояния нефтенасыщенности каналов, которая в среднем составляла 80...90 %.

На стадии вытеснения нефти из модели выполняли визуальные наблюдения за микроструктурой фильтрационных потоков в отдельных капиллярных каналах и в их пересечениях. Начальная фаза вытеснения, при которой нефтяная фаза сохраняла подвижность, продолжалась относительно короткое время. Невытесненная (остаточная) нефть сохранялась в форме отдельных пленок и капель, прилипших к стенкам капиллярных каналов, нередко заполняя все их поперечное сечение. На следующей стадии промывки при установившемся потоке воды и практической потере

подвижности нефти особое внимание уделяли изучению динамических явлений, а именно периодическим и аperiodическим пульсациям тонких пленок и капель нефти. К наиболее ярко выраженным динамическим структурам такого типа относятся следующие.

1. Вдоль стенок капиллярного канала напротив друг друга расположены две капли нефти. В центральной части канала происходит течение воды. Форма капель постепенно меняется, происходит их сближение. Смыкание капель приводит к образованию нефтяной перемычки, резкой остановке течения воды и возмущению скорости течения в соседних каналах. Далее под влиянием подпора воды происходят деформирование нефтяной перемычки, ее утоньшение и, наконец, разрыв. Капли нефти скачкообразно стягиваются к стенкам и через определенное время начинают расти навстречу друг другу. Периодичность этого процесса составляла от 10 с до нескольких минут. Отметим также, что при деформировании нефтяной перемычки совершала нерегулярные колебания с частотой 1...10 Гц.

2. На пересечении капиллярных каналов образуется прилипшая к острию клина массивная капля нефти. От этой капли по направлению потока воды формируется нитевидная пленка с небольшим утолщением на конце. Положение пленки неустойчиво, и она смыкается с гидрофобным участком канала. Под влиянием подпора воды пленка выгибается, отрывается от стенки, скачкообразно перемещается к гидрофобному участку противоположной стенки и прилипает к нему. Затем снова выгибается, отрывается и т. д. Периодичность такого процесса также составляет от 10 с до первых минут. Число таких маятниковобразных колебаний может достигать 10...15, затем следует отрыв пленки либо ее залипание в одном из положений.

3. При утоньшении нефтяной перемычки в капиллярном канале, окруженной двумя вогнутыми менисками воды, иногда наблюдается заметный рост амплитуды ее собственных изгибных колебаний. При этом перемычка может двигаться в направлении водяного потока. Часто возникают целые системы таких перемычек, как правило, останавливающихся в узлах пересечений капиллярных каналов, но продолжающих совершать синхронные колебания. При частоте колебаний, составляющей первые доли герца, такие структуры могут существовать в течение нескольких десятков минут.

Перечисленными динамическими явлениями, отражающими поведение остаточной нефти в пористой среде, список не ограничивается. Наблюдались и более сложные, но более короткоживущие структуры. В ряде экспериментов по вытеснению удалось не только проследить изменчивость периодов колебаний пленок и капель нефти, но и обнаружить эффект их резонансного возбуждения за счет наложения внешних вибраций.

Так, на рис. 4 представлены графики изменения периодов колебаний нефтяных капель при постоянном

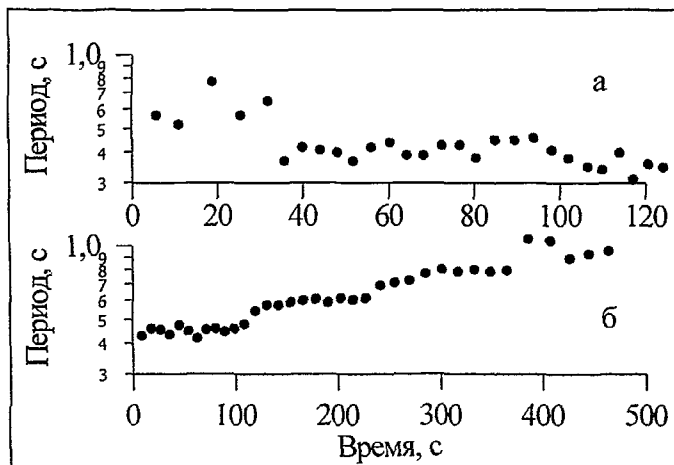


Рис. 4. Изменение периода автоколебаний нефтяных пленок при постоянном (а) и экспоненциально уменьшающемся (б) расходе вытеснения

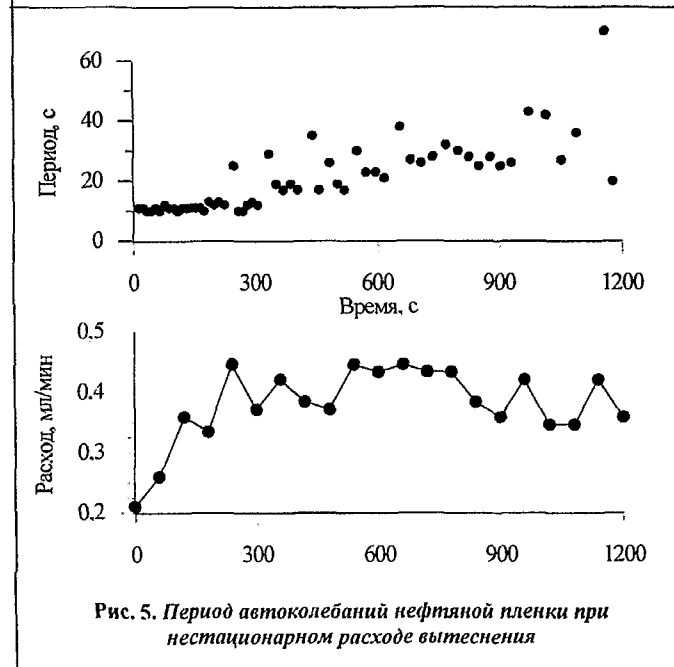


Рис. 5. Период автоколебаний нефтяной пленки при нестационарном расходе вытеснения

(а) и приблизительно экспоненциально снижающемся (б) расходе вытесняющей фазы (воды). Из графиков видно, что при постоянном расходе воды период колебаний капль может измениться почти на порядок, что, очевидно, свидетельствует о неустойчивости колебательной системы. При экспоненциальном убывании расхода имеется тенденция к экспоненциальному росту периода колебаний. Однако последняя закономерность выдерживается не всегда. Как видно из другого примера (рис. 5), период колебаний пленки относительно стабилен в стадии роста расхода, а после стабилизации расхода наблюдается потеря устойчивости колебательной системы с тенденцией роста периода колебаний. Этот рост продолжается до тех пор, пока колебания пленки не прекратятся.

Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов, отметим следующее. Наблюдения за микроструктурой двухфазного течения воды и нефти в плоской прозрачной модели показали, что каждая из

фаз движется преимущественно не по собственной системе капиллярных каналов, а в режиме хаотического диспергирования/слияния, сопровождающегося резкой перестройкой микроструктуры межфазной поверхности внутри наиболее активных каналов. Этот факт качественно согласуется с моделью многофазной фильтрации А.Я. Хавкина [18], т. е. с моделью случайного процесса поэлементного взаимодействия вытесняющей и вытесняемой фаз.

Особенно ярко колебательный режим двухфазного течения проявляется на стадии выхода кривой вытеснения нефти водой на асимптоту. Именно на этом участке мениски и нефтяные пленки проявляют свойства автоколебательных систем. При этом источником энергии автоколебаний является течение вытесняющей фазы (воды). В дальнейшем эти автоколебания вырождаются, и система остаточной нефтенасыщенности, близкая к предельной, становится неподвижной. Отсюда, в частности, следует вывод об эффективности вибрационного воздействия на интенсификацию фильтрационных процессов. Очевидно, что максимальный эффект от этого воздействия можно ожидать на кривой вытеснения, выходящей на асимптоту, но не ранее (из-за подавления автоколебаний другими гидродинамическими эффектами) и не позднее (из-за вырождения автоколебаний).

Механизм резонансного воздействия на микроструктуру многофазного фильтрационного потока в тонких каналах определяется эффектом капиллярного гистерезиса и подтверждается как численными моделями [19], так и прямыми лабораторными экспериментами [20]. Собственная частота колебаний нефтяных пленок и других межфазных границ определяется такими параметрами, как их размеры, коэффициент поверхностного натяжения, плотность и вязкость жидкостей [21].

Возможность резонансного возбуждения колебаний нефтяных пленок и капель в описываемой модели была подтверждена экспериментально. При этом нижняя частота источника составляла 5 Гц, тогда как исследованные колебательные системы имели частоту на 1...2 порядка меньше, т. е. возбуждение было не прямым, а косвенным. Выражалось оно, прежде всего, в потере относительной неподвижности капель и пленок и генерации колебательного режима их движения возле положения равновесия. В редких случаях наблюдались срыв капли из положения равновесия и вовлечение ее в фильтрационный поток воды. Наблюдения показали, что этот эффект опять-таки наиболее ярко проявляется на выходе кривой коэффициента вытеснения на асимптоту, на более поздних стадиях вытеснения нефтяная фаза окончательно теряла подвижность.

Таким образом, цикл лабораторных экспериментов показал, что влияние низкочастотного сейсмического воздействия на микроструктуру многофазных фильтрационных процессов наиболее ярко проявляется на заключительной стадии несмешивающегося вытеснения, т. е. в условиях практической потери подвижно-

сти вытесняемой фазы. Эффект сейсмического воздействия можно объяснить с позиции влияния на параметры смачиваемости активных поровых каналов в сочетании с резонансным возбуждением собственных колебаний остаточных капель и пленок нефти. Такая совокупность процессов дает возможность разработки и применения новых технологий нефтедобычи из сильнообводненных истощенных коллекторов нефти с помощью направленного вибрационного сейсмического воздействия с земной поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Н.Н. Остаточное нефтенасыщение разрабатываемых пластов. — М.: Недра, 1992. — 270 с.
2. Фаткуллин А.Х., Сайфуллин З.Г., Вережкина К.И. Экспериментальное исследование влияния смачивания на взаимное вытеснение двух несмешивающихся жидкостей в линейном неоднородном пласте // Тр./ ВНИИ. — 1969. — Вып. 35. — С. 29—37.
3. Lin E., Huang E. The effect of rock wettability on water blocking during miscible displacement// SPE Res. Eng. — 1990. — Vol. 5, № 2. — P. 205—212.
4. Huang E., Holm L. Effect of WAG injection and rock wettability on oil recovery during CO<sub>2</sub> flooding// SPE Res. Eng. — 1988. — Vol. 3, № 1. — P. 119—129.
5. Нестеренко Н.Ю. Смачиваемость пород-коллекторов пластовыми флюидами // Геология нефти и газа. — 1995. — № 5. — С. 26—35.
6. Приваленко Н.В., Сечина Л.С., Тен С.М. Исследование гидрофобизации поверхности пор продуктивных пород // Разработка газоконденсатных месторождений: Докл. Междунар. конф. Секция 1. — Краснодар, 1990. — С. 35—38.
7. McDougall S., Sorbie K. The impact of wettability on water-flooding: pore-scale simulation// SPE Res. Eng. — 1995. — Vol. 10, № 3. — P. 208—213.
8. Сейсмическое воздействие на нефтяные залежи/ Под ред. М.А. Садовского и А.В. Николаева. — М.: ИФЗ РАН, 1993. — 239 с.
9. Результаты экспериментального изучения вибрационного воздействия на нефтяные залежи / С.М. Аммосов, В.Л. Барабанов и др. // Современные методы увеличения нефтеотдачи пластов. — М.: Наука, 1992. — С. 98—102.
10. Симкин Э.М. Геолого-промысловые исследования низкочастотного вибросейсмического воздействия для повышения продуктивности нефтяных пластов и ресурсов извлекаемых запасов // Геоинформатика. — 1998. — № 3. — С. 3—6.
11. Об эффективности вибросейсмического воздействия с дневной поверхности на нефтепродуктивные пласты / М.В. Курленя, Б.Ф. Симонов и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1998. — № 1. — С. 14—17.
12. Результаты применения вибросейсмической технологии на Суторминском месторождении / В.Н. Белоненко, М.В. Павлов и др. // Нефтепромысловое дело. — 2000. — № 8, 9. — С. 18—22.
13. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975. — 592 с.
14. Нюссик Я.М., Комов И.Л. Электрохимия в геологии. — Л.: Наука, 1981. — 240 с.
15. О влиянии вибровоздействия на электрические свойства геологической среды / Э.Л. Озерков, О.А. Агеева и др. // Геофизика. — 1998. — № 3. — С. 30—34.
16. Donaldson E.S., Siddiqui T.K. Relationship between the Archie saturation exponent and wettability// SPE. Form. Eval. — 1998. — Vol. 4, № 3. — P. 359—362.
17. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. — М.: Химия, 1976. — 232 с.
18. Хавкин А.Я. Особенности нефтеотдачи пластов при многофазной фильтрации (обзор экспериментов) // Экспресс-информ. / ВНИИОЭНГ. Сер. "Разработка нефтяных месторождений и методы повышения нефтеотдачи". — 1990. — Вып. 10. — С. 23—33.
19. Barrat J.-L., Bucquet L. Large slip effect at a nonwetting fluid-solid interface// Physical Rev. Lett. — 1999. — Vol. 82, № 23. — P. 4671—4674.
20. Kalinitchenko V.A., Sekerj-Zenkovitch S.Ya. On the immiscible fluid displacement in capillary under oscillating pressure drop// Experimental Thermal and Fluid Sci. — 1998. — Vol. 18, № 3. — P. 244—250.
21. Charlaix E., Gayvallet H. Dynamics of harmonically driven fluid interface in a capillary// J. Physique. — 1992. — Vol. 2, № 11. — P. 2025—2038.