

© А.А. ГУБАЙДУЛЛИН, С.А. КОНЕВ

timms@tmn.ru

УДК 532.59, 532.546.

ВОВЛЕЧЕНИЕ В ФИЛЬТРАЦИЮ ОСТАТОЧНОЙ НЕФТИ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ*

АННОТАЦИЯ. На специально изготовленной и собранной экспериментальной установке, в которой использована двумерная прозрачная модель реального керна, изучено влияние амплитудно-частотных характеристик акустического воздействия на вовлечение в фильтрацию капель нефти, защемленных в сужениях поровых каналов при вытеснении дистиллированной водой и мицеллярным раствором. Обнаружено влияние акустического воздействия на защемленные капли нефти, в результате которого они проходят сужения поровых каналов при градиенте давления на порядок меньшем, чем требуется без воздействия.

SUMMARY. On specially manufactured and assembled experimental equipment for the research of acoustic effect on porous structures in which the two-dimensional glass model of a real core is used, the influence of amplitude-frequency characteristics of acoustic effect on the mobilization of oil drops which are pinched in narrow spots of porous channels, is studied at replacement by distilled water and micellar solution. The article revealed the influence of acoustic effect on the pinched drops of oil which pass through narrow spots of porous channels at a pressure gradient in order smaller, than it is required for their mobilization without this effect.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Пористая структура, капля нефти, акустическое воздействие.

KEY WORDS. Porous structure, drops of oil, acoustic effect.

В последнее десятилетие возрос интерес к проблеме вибрационной (акустической или сейсмической) стимуляции фильтрации в пористой среде, особенно в связи с приложениями для повышения нефтеотдачи пласта. В сравнении с другими методами повышения нефтеотдачи, используемыми в настоящее время, такие методы не наносят вреда окружающей среде и являются экономически целесообразными. Промышленные испытания вибрационного, акустического и ультразвукового воздействия на пласт для повышения нефтеотдачи в США и Советском Союзе начались в конце 70-х годов прошлого столетия. В последнее же время значительный интерес к подобным исследованиям вызван примерами рентабельного повышения нефтеотдачи при вибро-акустическом воздействии в масштабах месторождения в США и Китае.

При двухфазной фильтрации (нефть-вода) упругие колебания изменяют смачиваемость на границах раздела фаз, возникают силы притяжения между каплями диспергированной фазы, которые в условиях обводненного пласта приводят либо к кластеризации, слиянию капель в «ручейки» разрозненной

* Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы механики взаимодействий в технических и природных системах» (Проект 23-15).

нефтяной фазы в водном потоке, либо к появлению капель нефти размерами, значительно меньшими радиусов поровых каналов, и увеличению их подвижности. Эти факторы повышают фазовую проницаемость для нефти и снижают ее для воды. Для реальных промысловых условий наиболее характерной является трехфазная фильтрация (нефть-вода-газ), при которой описанный выше механизм сочетается с влиянием колебаний на высвобождение газовой фазы в виде мелких пузырьков. Последние, в зависимости от их числа, могут двигаться с водой с той же или большей скоростью. При этом пластовое давление может быть выше или ниже давления насыщения нефти газом. Если фильтрация происходит при давлении ниже давления насыщения, то влияние упругих колебаний проявляется в том, что они могут создать в нефти разрывы и трещины, которые могут стать зародышами пузырьков, и далее включится пузырьковый механизм.

В некоторых работах прирост дебита на скважинах при акустическом воздействии объясняется разгазированием жидкости. Другие авторы настаивают на капиллярных механизмах повышения нефтеотдачи при вибрационном и акустическом воздействии на пласт. Современное состояние прикладных разработок применения виброакустического воздействия на пласт для повышения нефтеотдачи характеризуется тенденцией к развитию лабораторных исследований и промышленных испытаний [1], [2], [3].

В нашей работе, на специально изготовленной и собранной экспериментальной установке для исследования вибрационно-акустического воздействия на пористые структуры, в которой использована двумерная прозрачная модель реального керна, изучено влияние амплитудно-частотных характеристик вибрационно-акустического воздействия на мобилизацию капель углеводородов (нефть [4] и керосин [5]), защемленных в сужениях поровых каналов при вытеснении дистиллированной водой. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

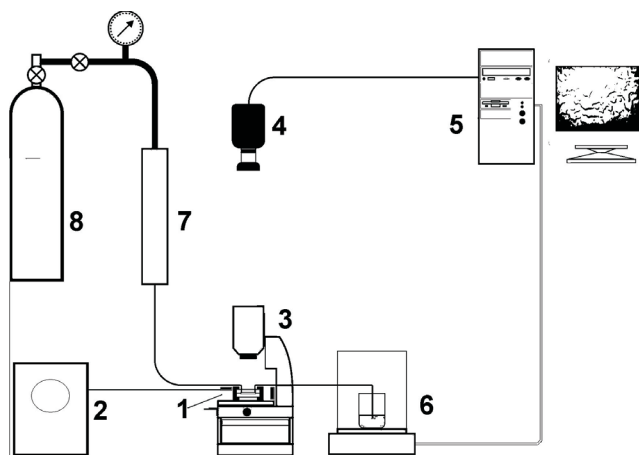


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — пористый образец в термостате с вибраторами, 2 — генератор, 3 — микроскоп, 4 — цифровая видеокамера, 5 — компьютер, 6 — электронные весы, 7 — ресивер, 8 — газовый баллон

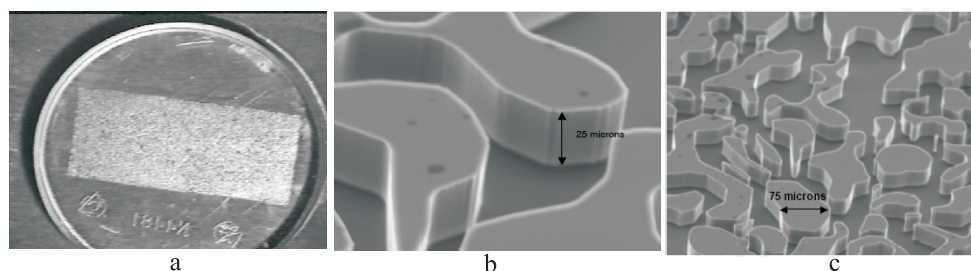


Рис. 2. Прозрачная модель пористой среды. а — пластина с вытравленной в верхнем слое структурой поровых каналов, отображающих картину пор аншлифа нефтеносного керна (размеры пористого слоя 40х20 мм, глубина пор 15-20 мкм, проницаемость 600 мД, пористость 0.55). б и с — изображения аналогичной пористой модели, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа [6]

Установка состоит из пористого образца, помещенного в медный термостат с вибраторами (1), вибрационно-акустическое воздействие производится пьезокерамическими вибраторами, встроенными в блок термостатирования и расположенными в вертикальной и горизонтальной плоскости, что позволяет производить воздействие различной геометрии. На пьезокерамические вибраторы с генератора (2) подается напряжение заданной частоты (1-20 000 Гц) и амплитуды (1-100 В), что позволяет вибратору совершать колебания с амплитудой до 1.0 мкм. Для визуализации эксперимента используется микроскоп (3) и цифровая видеокамера (4). В качестве пористого образца используется прозрачная модель пористой среды, изготовленная фотолитографическим способом и отображающая структуру пор реальной горной породы (керна из нефтяного пласта). Компьютер (5) позволяет проводить обработку видеоизображений, полученных на различных пространственных масштабах (от масштаба пор до масштаба модели). Высокочувствительные электронные весы (6), сопряженные с компьютером, используются для измерения расхода фильтрующихся жидкостей. Газовый баллон (7) и ресивер (8) позволяют задавать большие перепады давления на входе и выходе модели при первичном вытеснении нефти дистиллированной водой. Далее в экспериментах по вытеснению остаточной нефти в акустическом поле постоянный расход фильтрующей жидкости и фиксированное давление на входе модели задавались водяным столбом.

Через насыщенную нефтью (или керосином) модель, при давлении 0.2 МПа, в течение 1-5 часов фильтровали дегазированную воду, до момента прекращения появления нефти на выходе модели. Далее создавали постоянный расход жидкости через модель с остаточной нефтью при фиксированном давлении на входе. Давление на входе меняли от 0.005 до 0.02 МПа (от 50 до 200 см водного столба), с интервалом в 0.001 МПа (10 см). При каждом фиксированном давлении на входе плавно изменяли частоту акустического воздействия от 1 до 20 000 Гц на максимальной амплитуде, при этом наблюдали за поведением нефтяных капель, защемленных в сужениях поровых каналов.

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 3 и 4.

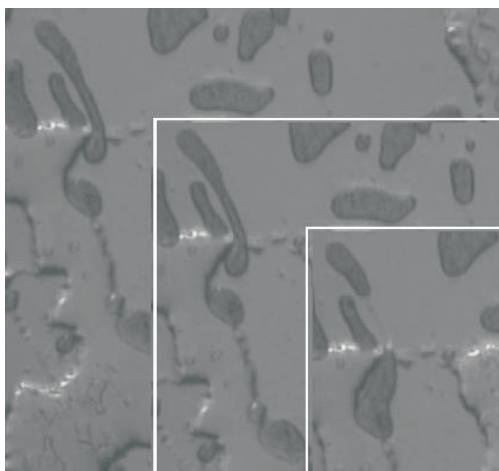


Рис. 3. Мобилизация капли нефти, защемленной в сужении порового канала, при вытеснении дистиллированной водой в акустическом поле частотой 1.2 кГц

На рис. 3 показано проскальзывание капли нефти, защемленной в сужении поры, при давлении на входе 0.014 МПа и вибрационно-акустическом воздействии на частоте 1.2 кГц. На рисунке представлены 3 последовательных кадра видеосъемки с разницей в 0.1 с. Видно, как часть капли преодолевает сужение порового канала и отрывается, сливаясь с другой неподвижной каплей, большего размера. Скорость проскальзывания составляет 50-100 мкм/с, по нашим оценкам.

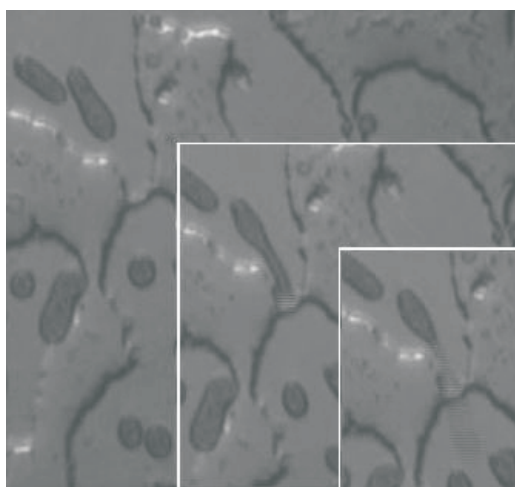


Рис. 4. Мобилизация капли нефти, защемленной в сужении порового канала, при вытеснении дистиллированной водой в акустическом поле частотой 2.0 кГц

Мобилизация капли нефти, обнаруженная при воздействии на частоте 2.0 кГц и при давлении на входе модели 0.015 МПа, представлена на рис. 4, разница между кадрами 0.05 с, скорость проскальзывания на порядок выше и составляет 800-1000 мкм/с.

При вытеснении нефти 0.5% мицеллярным раствором сульфонола, проскальзывание капли нефти было обнаружено при давлении на входе 0.01 МПа и волновом воздействии на частоте 0.7 кГц, причем скорость проскальзывания капли в 2-3 раза ниже, чем при вытеснении дистиллированной водой. Кроме того, в эксперименте наблюдалось, что волновое воздействие приводит к укрупнению ганглий нефти путем слияния в поровых каналах, особенно при вытеснении нефти мицеллярным раствором.

Выводы

1. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования вибрационно-акустического воздействия на пористые структуры в процессе вытеснения остаточных углеводородов, в которой использована двумерная прозрачная модель реального керна.

2. Обнаружено, что при вибрационно-акустическом воздействии защемленные капли нефти проскакивают сужение поровых каналов при градиенте давления на порядок меньшем, чем требуется для мобилизации капель без вибрационного воздействия. Так, капли нефти, защемленные в сужениях пор, были неподвижны при фильтрации дегазированной воды вплоть до давления 0.2 МПа на входе модели.

3. В эксперименте наблюдалось, что вибрационно-акустическое воздействие приводит к укрупнению ганглий нефти путем слияния в поровых каналах.

4. Укрупнение ганглий путем слияния в поровых каналах и проскальзывание сужения поровых каналов при градиенте давления на порядок меньшем, чем требуется для мобилизации капель без вибрационного воздействия, было обнаружено и для капель керосина.

5. При вытеснении мицеллярным раствором, проскальзывание капли нефти было обнаружено при более низком давлении на входе модели и более низкой частоте вибрационно-акустического воздействия, причем скорость проскальзывания капли в 2-3 раза ниже, чем при вытеснении дистиллированной водой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Андреев В.Е., Котенев Ю.А. Проблемы и перспективы волновой технологии многофазных систем в нефтяной и газовой промышленности. СПб.: Недра, 2008.
2. Li, W., Vigil, R., Beresnev, I.A., Iassonov, P., Ewing, R. Vibration-induced mobilization of trapped oil ganglia in porous media: Experimental validation of a capillary-physics mechanism // Journal of Colloid and Interface Science, 289, 2005, Pp. 193-199.
3. Николаевский В.Н., Степанова Г.С. Нелинейная сейсмика и акустическое воздействие на нефтеотдачу пласта // Акустический журнал, 2005, Т. 51, С. 150-159.
4. Губайдуллин А.А., Конев С.А., Саранчин С.Н. Экспериментальное исследование вибро-акустического воздействия на фильтрацию углеводородных систем в пористых средах // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы всероссийской научно-технической конференции. (20-21 октября 2009 г., Тюмень), Т. 1. Тюмень, 2009. С. 70-72.
5. Губайдуллин А.А., Конев С.А., Саранчин С.Н. Экспериментальное исследование вибрационно-акустического воздействия на вытеснение остаточных углеводородов в пористой среде // Тез. докл. Росс. Конф. «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», посвященной 70-летию ак. Р.И. Нигматулина. (21-25 июня, Уфа). Уфа: Изд-во Нефтегазовое дело, 2010, С. 95-96.
6. Kovscek A.R., Tang G.-Q., Radke C.J. Verification of Roof Snap Off as a Foam-Generation Mechanism in Porous Media at Steady State // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, P.1-26, doi:10.1016/j.colurfa.2007.02.035.
7. Губайдуллин А. А. Волновые воздействия при вытеснении углеводородов в пористых средах // Проблемы и достижения прикладной математики и механики. Сб. науч. тр. к 70-летию ак. В.М. Фомина. Новосибирск: Изд-во «Нонпарель», 2010, С. 35-49.