

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ И МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА
ПРОЦЕССЫ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТА НЕФТИ

Е.М. Баркалова

Научный руководитель - профессор, д.ф.м.н. С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Цель работы – провести библиографический анализ и критически оценить современное состояние методов исследования проблем акустического воздействия на процессы добычи и транспорта нефти, а также их эффективность.

Введение. Влияние ультразвука на скважину и пласт, приводящее к увеличению добычи, основано на двух аспектах гидроаккумуляции, которые являются актуальными: увеличение потока нефти через породы в насосный резервуар и снижение вязкости нефти, что облегчило бы прокачку [1]. Инженеры - исследователи из России, США и Китая добились большого прогресса в ультразвуковом снижении вязкости нефти, ультразвуковом удалении пробок, ультразвуковой деэмульсации и обезвоживании и ультразвуковой очистке от накипи. Очевидно, что в настоящее время ультразвуковой метод добычи нефти, представляется одним из наиболее перспективных волновых методов. В силу этого, тема работы является актуальной.

Характеристика аспектов проблемы. Анализ данных показывает, что внимание специалистов сосредоточено на следующих вопросах.

Ультразвуковое снижение вязкости нефти. Сильные кавитационные эффекты при использовании ультразвуковой технологии для высоковязких нефтей позволяют добиться сокращения количества тяжелых крупных молекул, таких как асфальтены и крупные коллоидные частицы. Что в свою очередь ведет к снижению молекулярной массы, а значит, к снижению вязкости. Измерения динамической вязкости сырой нефти под действием ультразвукового поля Чжена Дзяхуна [3] показали, что вязкость нефти снижается на 20-25% после ультразвуковой обработки в течение 30-60 мин. С учётом того, что акустический метод позволяет добиться улучшения реологических свойств нефти, а также оказывает благоприятное влияние на призабойную зону, был проведен ряд расчётов российскими исследователями [5], которые показали, что ультразвуковое воздействие позволяет добиться: увеличения в 2 раза коэффициента продуктивности; увеличения среднесуточного дебита скважин в 2,5 раза; уменьшения среднего значения обводненности – на 26%.

Ультразвуковое удаление отложений. Вибрация создает колебания ультразвуковой частоты, которые воздействуют на парафиновые кристаллы в области парафинообразования и вызывают их перемещения, что не позволяет кристаллам осесть на стенку нефтепровода. Ультразвуковая технология эффективно показывает себя при удалении и предотвращении образования парафиновых отложений в нефтепроводах и загрязнений пласта вблизи ствола скважины, тем самым уменьшает скин фактор на 25%. Установлено, что колебания вызывают тепловой эффект, разрушают отложения парафина, причём, чем выше частота колебаний, тем эффективнее воздействие.

Ультразвуковая деэмульсация и обезвоживание. Деэмульсация и обезвоживание с помощью акустического воздействия подразумевает возникновение конденсации и снижение вязкости под влиянием волн ультразвука, что позволяет каплям воды соединяться в сырой нефти. Это, в свою очередь ускоряет процесс разделения фаз нефти и воды в эмульсии. В японском патенте [2] говорится, что содержание воды в нефти морских загрязнений составляет всего 1,45 % (масс.) после одночасовой ультразвуковой обработки при температуре 80 °С. В то время, как при использовании термического осаждения в течение 1 часа содержание воды более 31,5 %. Оптимальное время ультразвукового воздействия составляет 10-15 минут. Эффект от ультразвуковой и химической деэмульсации и обезвоживания может достигать более 60 % (происходит снижение количества эмульсии с 76% до 19%). Интенсивность ультразвука – это главный фактор, который влияет на ультразвуковое деэмульгирование – чем выше частота колебаний, тем сильнее воздействие.

Ультразвуковая очистка от накипи. Воздействие ультразвуковых колебаний на поверхность труб, подверженных образованию накипи на поверхности, способно предотвратить и разрушить уже сформировавшиеся образования. Эффект кавитации, вызванный ультразвуком, может разрушить накипь кристаллов соли до крошечных взвешенных частиц в среде, таким образом, эти крошечные частицы могут стекать вместе с потоком жидкости. Благодаря образующимся в результате акустического воздействия центрам кристаллизации, которые находятся в постоянном перемещении/смещении, осаждение кристаллов и их последующий рост значительно затрудняется. Образуется тонкодисперсный шлам по некоторому объёму флюида, который выносится с потоком. Таким образом происходит нарушение условий кристаллизации, и, как следствие, прекращение отложений, либо разрыхление образующейся накипи. Разрушение уже накопленных солевых отложений происходит за счёт образования микротрещин, которые по мере своего роста прочищают оборудование.

В условиях предлагаемого моделирования дебита при воздействии ультразвука необходимо учесть поведение флюида в пористой проницаемой среде без акустического воздействия и при улучшении нефтеотдачи.

Поэтому в теоретических исследованиях рассматриваемой проблемы следует уделять особое внимание следующим физическим процессам:

1. *Механизм действия акустических волн в пористых средах.* Нефтяной пласт предполагается как модель трещинно-кавернозного карбонатного коллектора. Поры в породе нефтяного пласта состоят из многочисленных параллельных капиллярных пучков постоянного диаметра. После воздействия акустических волн на нефтяной пласт, вязкость нефти уменьшается на 25-30 %. После воздействия акустических волн на нефтяной пласт, диаметр капилляров становится больше, поверхностное натяжение ϕ уменьшается пропорционально квадрату радиуса r ((формула (1)), капиллярные силы ν – пропорционально кубу радиуса r ((формула (2)).

2. *Механизм действия акустических волн в нефтяном пласте.* Из формулы (3) видно, что после воздействия акустических волн на сырую нефть, коэффициент вязкости нефти μ_h уменьшится, Δp возрастёт, средняя скорость идеальной жидкости $|u|$ будет расти и после этого увеличится добыча и нефтеотдача. Когда частота вибраций звукового радиатора зафиксирована, увеличение амплитуды ускорения стенки a (за счёт увеличения амплитуды смещения) вызовет увеличение градиента инерционного давления на жидкость, что усилит эффект закупоривания.
3. *Влияние акустических волн на поток сырой нефти.* Волновое действие преобразователей заключается в том, что акустические волны, генерируемые преобразователями, действуют на капиллярные стенки, которые образуют вибрацию, влияющую на нефтяной пласт. Согласно формуле (4) поток сырой нефти увеличивается с увеличением амплитуды смещений ζ и угловой частоты колебаний ω . Когда акустические волны воздействуют на нефтяной пласт, внутреннее давление добавляет периодическое усилие возмущения, основанное на исходном давлении, которое также увеличивает градиент давления между внутренним давлением и вокруг источника звука, и увеличивает нефтеотдачу в нефтяном пласте.
4. *Фильтрацию флюида.* Уравнение фильтрации пластового флюида, представляет собой объединение закона Дарси (связь градиента давления P с массовой скоростью фильтрации \vec{V}), и уравнения состояния флюида, (связь давления P' и отклонения плотности ρ' через квадрат скорости звука c^2) (5). Процесс фильтрации можно считать независимым, поскольку параметры пористости m , проницаемости k и вязкости η зависят от времени и координат в пространстве с незначительным изменением скорости.
5. *Перенос и диффузия углеводородной примеси.* Добыча нефти сопровождается депрессией в интервале перфорации скважины и переносами жидкости с примесью тяжёлых молекул углеводорода из пласта. При неравномерном распределении концентраций смеси в растворе, диффузия движется в сторону, где концентрация меньше. При определённых условиях возможно осаждение или растворение части примеси на стенках пор, что свидетельствует о том, что концентрация тяжёлой примеси непостоянна. Так уравнение массового содержания тяжёлых компонентов в пластовом флюиде примет вид (6)
6. *Изменение проницаемости, радиуса пор, пористости.* Состояние порового канала зависит от концентрации примеси: если она достигает избыточного значения, поровый канал заиливается, в обратном случае – происходит прочистка, поскольку разность концентраций – текущей и равновесной – противоположна по знаку скорости, с которой происходит изменение радиуса пор. Описание этой разности описывается законом экспоненциальной зависимости (7).

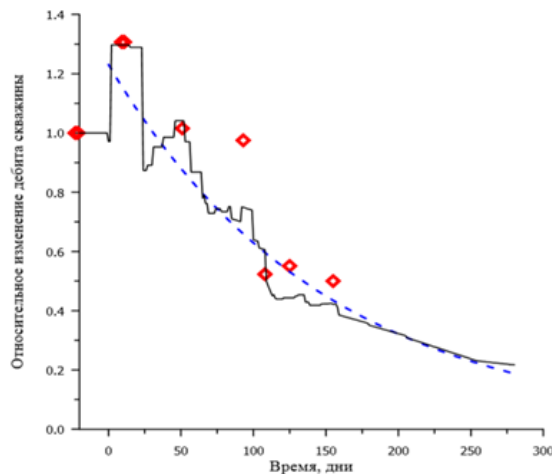


Рис. 1. Зависимость воздействия ультразвука на дебит скважины от времени влияния. Сплошная линия – данные, усредненные по 10 скважинам, ромбы – выборка значений по одной из скважин, пунктир – экспоненциальная аппроксимация [5].

Данные рисунка 1 наглядно демонстрируют, что средняя продолжительность эффекта ультразвукового воздействия по тепловому механизму составляет 1,5 – 2 месяца и сопровождается средним увеличением дебита 35%. Описанная в работе [5] модель физических явлений при акустическом воздействии содержит параметры, выбираемые методом подгона A, B, τ_c , значения которых не зависят от химических свойств нефти.

$$\varphi = \frac{E_s - E_l}{\pi r^2} \quad (1)$$

$$v = \frac{2 \cdot (E_s - E_l)}{\pi r^3} \cos \theta \quad (2)$$

где E_s – энергия двухфазного пограничного слоя, E_l – энергия такого же объёма молекулярного уровня в фазе, θ – угол смачивания жидкости к породе

$$|\Delta p_s| > A_j, u = -\frac{K}{\mu_h} \Delta p \left(1 - \frac{A_j}{|\Delta p_s|}\right) \quad (3)$$

где K – проницаемость капилляра, Δp – градиент внешнего давления, $A_j = 2\tau_0/R$ – порог отсоединения (минимальный градиент давления, для начала движения нефти), τ_0 – предел текучести при напряжении сдвига, R – радиус капилляра, Δp_s – градиент статического внешнего давления.

$$V_{cp}(t) = \int_0^R V_r(r, t) 2\pi r dr = \frac{\pi R^4}{8\mu_h} \left(\rho \zeta \omega^2 e^{i\omega t} + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (4)$$

где $V_r = \mathbf{u} - \dot{\mathbf{s}}_t$ – относительная скорость сырой нефти относительно стенок капилляров, \mathbf{u} – скорость потока сырой нефти по направлению X

$$\frac{\partial mP}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{k \rho_0 c^2}{\eta} \cdot \text{grad } P \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla C = D \Delta C + \frac{1}{\tau_c} \cdot (C - C_s(P, T)) \quad (6)$$

$$R = R_0 \exp \left(\frac{-t}{\tau_{eff}} \right) \quad (7)$$

Заключение. Описанная модель объясняет долговременный положительный эффект от акустического воздействия и позволяет объективно оценить роль теплового механизма при воздействии ультразвука. Учётный механизм *кольматажа* в пространстве около скважины позволяет проводить исследования с альтернативными механизмами ультразвукового воздействия.

Литература

1. Anna Abramova, Vladimir Abramov, Vadim Bayazitov, Artyom Gerasin, Dmitriy Pashin. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery // Journal Engineering. – 2014. - №6. -P. 177–184.
2. Hongxing Xu. Experimental Study on Ultrasonic Treatment for Removal of Near Wellbore Damage and Technological Parameters Optimization // China University of Petroleum. - 2009.
3. Zheng Jiahong. The Analyse of Porous Media Permeability in Oil Stratum by Ultrasonic // Harbin Institute of Technology, China Academic Journal Electronic Publishing House. – 2010. -№7. -P.2.
4. Максимов Г.А., Радченко А.В. Моделирование интенсификации нефтедобычи при акустическом воздействии на пласт из скважины // Электронный журнал «Техническая акустика»– 2003. -№10.
5. Муллакаев М. С., Абрамов В. О., Печков А. А., Еременко И. Л., Новоторцев В. М., Баязитов В. М., Есипов И. Б., Баранов Д. А., Салтыков А. А. Ультразвуковая технология повышения продуктивности низкодебитных скважин // Нефтепромысловое дело. - 2012. - №4. -С. 25-32

РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ ГАЗОВОЙ И НЕФТЯНОЙ ФАЗ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

М.Р. Брыксин

Научный руководитель - профессор, д.ф.-м.н. С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Актуальность. На данный момент существует проблема успешного транспортирования углеводородов от места добычи к потребителям трубопроводным транспортом. Трубопроводы простираются на десятки и сотни километров, проходят через различные климатические, географические и природные условия. Для успешной эксплуатации трубопроводов и сохранения их на многие годы необходимо моделирование потока флюида в трубе с целью предсказания особенностей влияния этого флюида на материал труб. Заметим, что при транспортировке добываемой нефти и газа обычно возникают отдельные проблемы, связанные с обеспечением стабильного потока флюида, которые должны решаться надлежащим образом, чтобы обеспечить экономически эффективное производство. Все это требует создания методик корректного прогноза свойства флюида, его эволюции по каналу с произвольным режимом течения и взаимодействия со стенками трубопровода.

Анализ библиографических источников показывает, что на сегодняшний день существует достаточное количество работ по расчету свойств флюида в трубопроводах в однофазных средах, но лишь небольшое количество ориентировано на процессы в гетерогенных (двухфазных) системах. Соответственно, в этой теме все еще остается много проблем, требующих всестороннего анализа. Поэтому данная работа фокусируется на изучении свойств и параметров флюида, его состава, плотности при течении двухфазного газонефтяного потока в горизонтальных трубах

Целью данной работы является расчет плотности для газовой и нефтяной фаз в двухфазном потоке в горизонтальных трубах с использованием экспериментальных данных.

Свойства флюида в этом исследовании были получены с помощью прямых измерений, расчетов и термодинамического моделирования в программах PVTsim 19 и TUVAX из работы Ake Rittirong [1]. В качестве газовой фазы использовался природный газ, поставляемый компанией Oklahoma Natural Gas Company, а в качестве нефтяной фазы – конденсат Garden Banks. Состав Oklahoma Natural Gas приведен в таблице 1. Средняя молекулярная масса (MW) газовой фазы представляет собой средневзвешенное значение каждого компонента на основе его мольной доли.