

В.Г. Прачкин, М.С. Муллакаев, д-р техн. наук, Д.Ф. Асылбаев, канд. техн. наук
(Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва, Россия).
E-mail: mullakaev@mail.ru

Повышение продуктивности скважин методом акустического воздействия на высоковязкие нефти в каналах призабойной зоны скважины

Акустические методы интенсификации добычи нефти основаны на разных физических процессах, протекающих или создаваемых в призабойной зоне под воздействием ультразвука. Исследование этих процессов позволяет выявить основные физические механизмы акустического воздействия, одним из которых является нелинейное взаимодействие ультразвуковой волны с жидкостью, заполняющей пористую структуру коллектора.

Мощное акустическое излучение, генерируемое погружным устройством, распространяется в призабойной зоне скважины главным образом по ее твердым структурам. Пористая структура нефтяного пласта состоит из множества каналов, трещин, капилляров, соединяющих полости и обеспечивающих перетекание их жидкого содержимого. Задачей ультразвукового воздействия является стимуляция различными способами этого течения с целью увеличения выхода конечного продукта из ствола скважины. Существуют способы, ориентированные на декольматацию нефтяного коллектора (устранение препятствий на путях течения нефти под воздействием ультразвука [1–2]). Другие способы ориентированы на силовые возможности забора жидкофазного сырья созданием оптимальных условий его всасывания с помощью эффекта акустического течения [3–4] или увеличения пористости пласта [5]. Ультразвук применяется также для акустического нагрева отдельных областей призабойной зоны [6], а также совместно с химическими реагентами [1].

В данной работе рассмотрены вынужденные колебания флюида на частоте падающей акустической волны в каналах коллектора, радиус каналов мал по сравнению с длиной волны. Возникающие колебательные деформации стенок канала, вызванные распространяющимся ультразвуковым полем, передаются флюиду, создавая не только высокочастотные возмущения, но и движение жидкости с постоянной скоростью, способное увеличить перенос жидкости через поперечное сечение канала. Поэтому под воздействием ультразвука жидкость в таком канале приобретает другую эффективную вязкость, величина которой существенно ниже. Расчеты выполнены и представлены в рамках упрощенной, но практически значимой модели.

Расчет акустического воздействия на эффективную вязкость нефти в каналах призабойной зоны скважины

В общем случае акустическая волна имеет сферический (в случае точечного источника) или цилиндрический (для протяженной нитевидной генерации) фронт (рис. 1). Расчеты при такой постановке задачи существенно усложняются, поскольку пространственное распределение поля акустических деформаций в твердотельной структуре пласта будет описываться уже не экспонентой, как в случае плоского фронта, а шаровыми или цилиндрическими функциями.

Расчеты по взаимодействию ультразвука с жидкостью, находящейся в каналах, трещинах, капиллярах, порах призабойной зоны скважины, проведены для одномерной плоской ультразвуковой волны, длина волны λ существенно превышает радиус каналов.

Применяемое упрощение не принципиально, незначительно влияет на численное значение коэффициентов в результирующих выражениях и значительно снижает громоздкость выкладок.

При описании распространения акустической волны в твердотельном материале структуры пласта

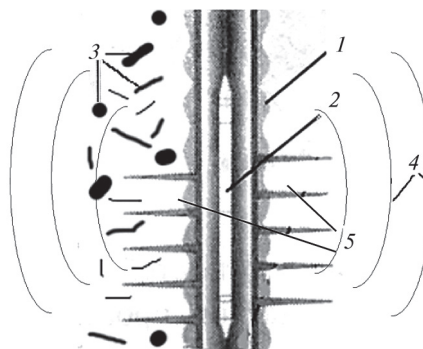


Рис. 1. Схема взаимодействия ультразвука с пористой структурой нефтяного пласта при акустической стимуляции скважин:

- 1 — цементный камень;
- 2 — погружное устройство;
- 3 — пористая структура пласта (каналы, трещины, капилляры, поры);
- 4 — фронт перемещающейся акустической волны; 5 — перфорационные каналы

необходимо исходить из уравнения упругости, учитывая его вязкость и теплопроводность, для вектора \mathbf{U} соответствующего смещения

$$\rho_0 \partial_{tt}^2 \mathbf{U} = \left[\rho_0 (c_l^2 - c_t^2) + \zeta_0 + \frac{\eta_0}{3} \right] \nabla \operatorname{div} \mathbf{U} + (\rho_0 c_t^2 + \eta_0) \Delta \mathbf{U} - \frac{E\alpha}{3(1-2\sigma)} \nabla T, \quad (1)$$

и уравнения теплопроводности в твердом теле [9] для температуры T :

$$C_V \partial_t T + \frac{C_p - C_V}{\alpha} \partial_t \operatorname{div} \mathbf{U} = \chi \Delta T, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность материала; c_l и c_t — скорости соответственно продольных и поперечных колебаний в твердом теле; E — модуль Юнга; σ — коэффициент Пуассона; C_p и C_V — теплоемкости при постоянных соответственно давлении и объеме; ζ_0 и η_0 — коэффициенты первой и второй вязкости; α — коэффициент теплового расширения материала; χ — коэффициент теплопроводности.

Если направление распространения акустической волны выбрать вдоль оси z , а источник излучения поместить в начало координат $z = 0$, то граничное условие для смещения U продольной волны будет представлено следующим равенством:

$$U(z = 0, t) = U_m \exp(-i\omega t), \quad (3)$$

где U_m — амплитуда смещения на выходе источника излучения; ω — частота колебаний источника.

Когда акустическая волна встречает на своем пути полость, заполненную жидкостью плотностью ρ , она через колебания стенок вызывает возмущения в жидкой среде, характеризуемые скоростью \mathbf{v} . Система уравнений Навье — Стокса для таких возмущений состоит из двух уравнений. Одно — соотношение непрерывности:

$$\partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (4)$$

другое — уравнение движения жидкости:

$$\partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} - \nu \Delta \mathbf{v} = -\nabla p / \rho, \quad (5)$$

где p — давление в жидкости; \mathbf{v} — кинематическая вязкость ($\nu = [3\zeta_0 + 4\eta_0]/3\rho$).

В задаче по исследованию поведения возмущений жидкости, вызываемых колебаниями стенок, ограничивающих объем жидкости, естественным граничным условием является равенство компонент скоростей стенки и жидкости на месте раздела фаз, направленных по нормали к границе. При этом принято: жидкость заполняет всю полость, воздушно-газовая прослойка отсутствует.

Система уравнений с граничными условиями (1)–(5) является исходной для изучения как медленных стационарных движений, так и быстрых

осцилляторных возмущений, возникающих в результате действия внешних сил или флуктуационных пертурбаций. Будучи линейной в части описания твердотельной фазы, система уравнений носит достаточно общий характер, позволяя исследовать широкий класс явлений, возникающих при взаимодействии твердого тела с жидкостью, поведение которой полностью отвечает уравнениям (4), (5) с учетом нелинейности.

В рамках предложенной модели, прежде всего, необходимо рассчитать поведение вектора смещения $\mathbf{U}(z, t)$ при удалении от источника излучения. Для этого решение линейной системы (1), (2) можно найти в комплексной форме с учетом продольных колебаний и их затухания при распространении в твердотельной структуре пласта:

$$U(z, t) = U_m \exp(-i\omega t + ikz - \kappa z), \quad (6)$$

где $k \equiv 2\pi/\lambda$; κ — пространственный декремент, создаваемый теплопроводностью и вязкостью материала твердотельной субстанции.

Используя представление (6) для смещения и температуры, претерпевающей изменения в результате внешнего воздействия, из уравнений (1), (2) можно получить следующее выражение для декремента пространственного затухания:

$$\kappa = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c_l^2} \left[\left(\frac{4}{3} \eta_0 + \zeta_0 \right) + \frac{\alpha^2 \chi T \rho_0^2 c_l^2}{3C_p^2} \left(1 - \frac{4c_t^2}{3c_l^2} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Частота ω при этом оказывается связанной с длиной продольной волны известным дисперсионным соотношением $\omega = k c_l$.

При выводе формулы (7) учитывалась адиабатичность процессов, протекающих при распространении ультразвуковой волны, когда справедливо термодинамическое соотношение [7]

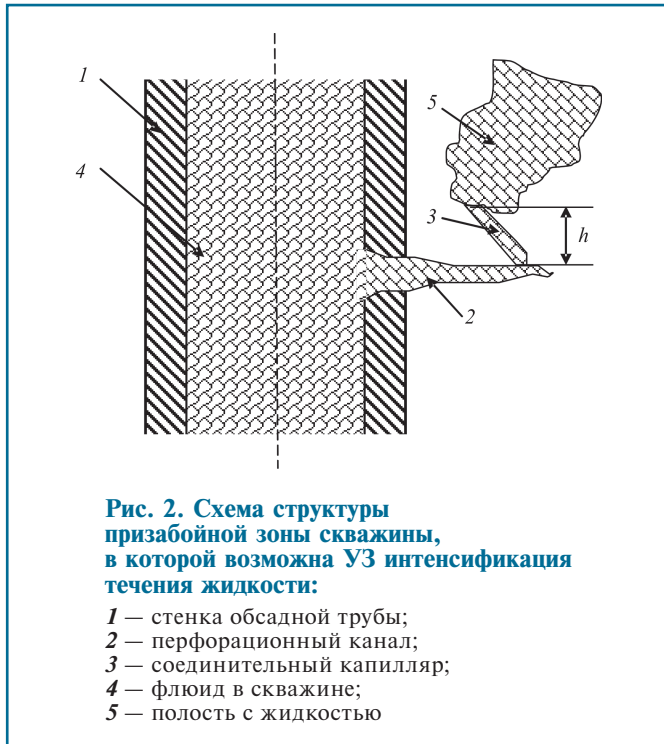
$$C_p - C_V = \alpha^2 T \rho_0 c_l^2 \left(1 - 4c_t^2 / 3c_l^2 \right), \quad (8)$$

и использовалось равенство, вытекающее из определения продольной и поперечной скоростей через модули упругости [7]:

$$\frac{E}{1-2\sigma} = 3\rho_0 c_l^2 \left(1 - 4c_t^2 / 3c_l^2 \right). \quad (9)$$

При наличии нелинейности характерная длина поглощения ультразвука $L_{y3} = 1/\kappa$ может оказаться значительно больше значения, определяемого формулой (7), что существенно повышает влияние ультразвука на призабойную зону скважины.

На рис. 2 приведен фрагмент структуры нефтяного пласта, иллюстрирующий стандартный механизм перетекания жидкости из призабойной зоны в ствол скважины. Из полости 5 жидкость перетекает в перфорационный канал по капилляру 3 под действием перепада давления Δp на концах капилляра.



Величина этого перепада может быть связана с гравитационным притяжением в случае, когда концы капилляра находятся на разной высоте с перепадом h : $\Delta p = \rho gh$ (g — ускорение свободного падения). Изучение влияния ультразвукового поля на течение флюида по узким каналам и составляет предмет последующего рассмотрения.

При расчете воздействия ультразвука на свойства жидкости будем исходить из уравнения Навье — Стокса (5), записанного как для стационарного движения жидкости со скоростью \mathbf{v} , так и для быстрых осцилляций под воздействием ультразвука, происходящих с известной частотой $\omega = 2\pi f$ и скоростью \mathbf{u} , зависящей от задаваемой амплитуды ξ ультразвуковых колебаний:

$$\overline{(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u}} = \nabla p + \mu\Delta\mathbf{v}; \quad (10)$$

$$\rho\partial_t\mathbf{u} = i\mathbf{k}p_0e^{-i\omega t+i\mathbf{k}\mathbf{r}} + \mu\Delta\mathbf{u}, \quad \xi = kp_0 / (\rho\omega^2), \quad (11)$$

где \mathbf{k} — волновой вектор ультразвуковых колебаний, связанный с их длиной волны в жидкости соотношением $\lambda = 2\pi/k$; p_0 — амплитуда высокочастотного давления, представляющая собой ту часть устанавливаемой ультразвуковым генератором величины, которая, согласно (6), дошла до рассматриваемой полости в уменьшенном из-за диссипации виде; p — стационарное давление, создаваемое внешними силами; μ — динамическая вязкость; \mathbf{r} — пространственная вектор-координата (черта сверху означает усреднение по времени за период колебаний $T_s = 2\pi/\omega$).

Из формулы (2) можно найти пространственный декремент затухания ультразвука в жидкости κ_s , описываемый соотношением:

$$\kappa_s = k^2\mu / (\rho\omega) = \omega\mu / (\rho s^2), \quad (12)$$

где s — модуль скорости распространения ультразвуковой волны в жидкости. Для вязких жидкостей как правило $\kappa \ll \kappa_s$, и далее будем рассматривать только этот случай возникновения вынужденных колебаний в жидкости.

В качестве приоритетной задачи рассмотрим, как изменяется формула течения Пуазейля при ультразвуковом воздействии на жидкость в цилиндрической полости радиусом R . Будем считать, что координата z направлена вдоль оси цилиндра (длину этой трубы обозначим L). Это означает, что для стимулирующей акустической волны, падающей под углом β к этой оси, вместо волнового числа k следует использовать проекцию волнового вектора $k\cos\beta$ на эту ось. Рассмотрим случай, когда $kR \ll 1$ и $\kappa \ll \kappa_s$. Тогда из (10) можно записать:

$$v = \left\{ \Delta p / L + \rho\xi^2\omega^2\kappa \right\} (1 / 4\mu)(R^2 - r^2). \quad (13)$$

Расход флюида Q определим по формуле:

$$Q = \rho \int_0^R r dr \int_0^{2\pi} d\varphi v = \frac{\pi R^4 \rho}{8\mu} \left\{ \frac{\Delta p}{L} + \rho\xi^2\omega^2\kappa \right\}, \quad (14)$$

где φ — азимутальная переменная в цилиндрической системе координат.

Как видно из (14), ультразвук эффективно увеличивает текучесть жидкости, повышая ее расход. Разделяя расход флюида на спонтанную Q_0 и вынужденную Q_s (связанную с ультразвуковым воздействием) части, выражение (14) можно записать в следующем виде:

$$Q = Q_0 + Q_s, \quad Q_0 = \frac{\pi R^4 \rho}{8\mu} \frac{\Delta p}{L}, \quad Q_s = \frac{\pi R^4 \rho^2 \xi^2 \omega^2 \kappa}{8\mu}. \quad (15)$$

Введя эффективную вязкость $\mu_{\text{эфф}}$, учитывающую влияние ультразвука в форме, позволяющей сохранить стандартный вид формулы Пуазейля, в которой вместо μ фигурирует $\mu_{\text{эфф}}$, получим

$$Q = Q_0 \frac{\mu}{\mu_{\text{эфф}}}; \quad \mu_{\text{эфф}} = \frac{\mu}{1 + Q_s / Q_0}. \quad (16)$$

Из (16) видно, что эффективная вязкость всегда меньше того значения, которое свойственно невозмущенной жидкости, т. е. $\mu_{\text{эфф}} < \mu$. Это указывает на увеличение переноса жидкости в присутствии ультразвука.

Рассмотренный механизм ускорения переноса жидкости в поле акустической волны носит характер прямого действия (процесс возникает непосредственно на месте реализации эффекта). Это отличает его от

таких способов восстановления скважин, как использование акустического течения, которое создается внутри ствола между поверхностями обсадной трубы и погружного устройства, а возникающее вихревое движение оказывает действие уже в призабойной зоне. Поэтому применение обсуждаемого эффекта наиболее эффективно в локальных местах, где влияние других методов воздействия значительно слабее.

Экспериментальная проверка влияния ультразвукового воздействия на вязкость нефти

При установившемся ламинарном движении вязкой несжимаемой жидкости секундный объемный расход определяется формулой Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu \Delta l},$$

откуда коэффициент динамической вязкости, Па·с

$$\mu = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 Q \Delta l}, \quad (17)$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ — перепад давления на концах капилляра, Па; Q — объемный расход жидкости, м³/с; d — диаметр трубки, м; Δl — длина трубки, м.

Относительное изменение вязкости можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon = \left(\mu_{\text{эфф}} - \mu \right) / \mu.$$

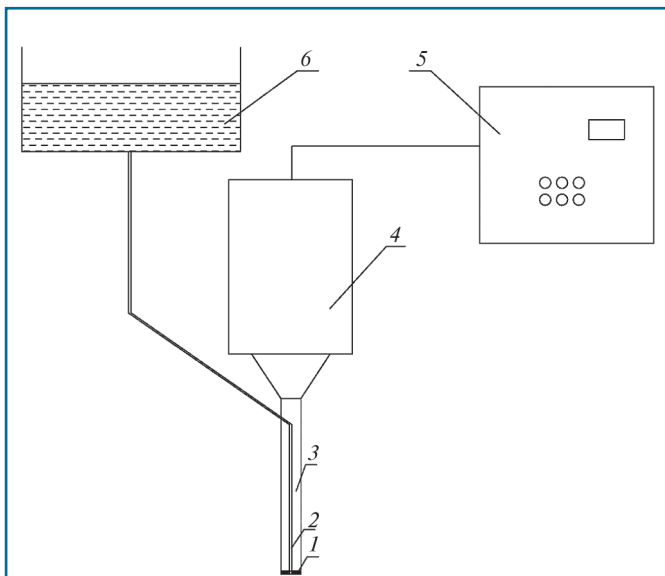


Рис. 3. Схема стенда для определения вязкости нефти при ультразвуковом воздействии:

- 1 — слой, поглощающий УЗ волны;
- 2 — цилиндрическое отверстие;
- 3 — волноводно-излучающая система;
- 4 — магнитострикционный преобразователь МСП 2/22;
- 5 — ультразвуковой генератор УЗГ 2/22;
- 6 — резервуар с нефтью

Учитывая выражение (16), получим:

$$\varepsilon = \left(|Q_0 - Q| \right) / Q, \quad (18)$$

где Q и Q_0 — объемные расходы нефти соответственно с ультразвуковым воздействием и без него, м³/с.

Для оценки эффекта воздействия УЗ на вязкость нефти различных месторождений разработан стенд (рис. 3) для экспериментального определения вязкости нефти в максимально приближенных условиях с УЗ и без УЗ.

Нефть, стекая из резервуара 6, поступает в цилиндрическое отверстие 2 диаметром 3 мм, просверленное в центре стержневого волновода 3. В качестве источника УЗ-колебаний использовался преобразователь МСП 2/22 (4) (питание от генератора 5 УЗГ 2/22 мощностью 2 кВт). УЗ-обработку проводили на резонансной частоте 21,8 кГц при амплитуде колебаний торца излучателя 3 мкм. Для поглощения отраженной УЗ-волны на границе металл — воздух и предотвращения образования стоячих волн в волноводе на торец излучателя приклеивали поглощающий слой 1.

Динамическую вязкость нефти определяли на измерителе низкотемпературных показателей нефтепродуктов ИНПН SX-850 — ротационном вискозиметре (измеряется крутящий момент при постоянной скорости сдвига 250 рад/с). Точность измерения температуры пробы составляет $\pm 0,2$ °С, точность определения динамической вязкости — 2 %. До измерения динамической вязкости осуществляли термостатирование пробы в течение 20...30 мин при температуре 20 °С.

Эксперименты проводили с применением нефти нескольких месторождений с различными структурно-групповыми и фракционными составами и физико-химическими свойствами (табл. 1).

В ходе экспериментов (табл. 2) фиксировали объем нефти, истекшей через трубку в течение определенного промежутка времени (экспериментальные значения Q и Q_0).

Далее определили значения динамической вязкости нефтей:

расчетные значения вязкости по формулам (15) и (16) с использованием известных параметров: $R = 3$ мм, $L = 20$ мм, $\nu = 21,8$ кГц, $\xi = 3$ мкм, $\Delta p = \rho g L$;

экспериментальные значения вязкости по расходам нефти Q и Q_0 на стенде (затем по формуле (18) вычислили относительное изменение динамической вязкости);

прямые измерения вязкости провели на вискозиметре.

После ультразвуковой обработки наблюдалось снижение динамической вязкости нефти в среднем на 23...34 % (табл. 3).

Расчетные, экспериментальные и измеренные значения динамической вязкости нефти трех место-

Таблица 1

Усредненные физико-химические свойства и фракционный состав нефтей различных месторождений

Параметр	Месторождение			
	Боровское	Усть-Тегусское	Самотлорское	
Плотность, кг/м ³ при 20 °С	910	892	851	
Вязкость динамическая, мПа·с, при 20 °С	146	363	289	
Температура застывания, °С	–15	–5,6	–9	
Массовое содержание, %	Серы	3,50	–	1,2
	Смол силикагелевых	12,54	35,7	3,7
	Асфальтенов	5,90	1,2	0,2
	Парафинов	8,81	12,3	8,2

Таблица 2

Объемный расход нефти с УЗ воздействием и без УЗ

Месторождение	Объем нефти, л, истекшей в течение, мин					
	без УЗ-обработки			с УЗ-обработкой		
	15	30	45	15	30	45
Боровское	1,51	3,22	4,69	2,15	4,52	7,45
Усть-Тегусское	0,69	1,31	2,02	0,86	1,71	2,63
Самотлорское	0,67	1,44	2,21	1,05	1,97	3,27

Таблица 3

Влияние УЗ-обработки на динамическую вязкость нефти

Месторождение	Значения						
	расчетные			экспериментальные	измеренные		
	μ , мПа·с	$\mu_{эфф}$, мПа·с	ϵ_p	ϵ_z	μ , мПа·с	$\mu_{эфф}$, мПа·с	ϵ_n
Боровское	146	103	0,29	0,37	138	106	0,23
Усть-Тегусское	363	256	0,30	0,23	371	263	0,29
Самотлорское	289	204	0,29	0,32	267	176	0,34

рождений, с учетом пределов принятых погрешностей, приблизительно одинаковы, что подтверждает состоятельность приведенных в работе расчетов.

Полученные результаты представляют большую ценность при разработке комплексной аппаратуры и технологии управления процессом реанимации нефтяных коллекторов, где исследуемый эффект может быть использован в качестве средства доставки химических реагентов в удаленные области призабойной зоны скважины.

Список литературы

1. Горбачев Ю.И. Физико-химические основы ультразвуковой очистки призабойной зоны нефтяных скважин // Геоинформатика. 1998. № 3. С. 7–12. 2. Печков А.А.,

Шубин А.В. Результаты работ по повышению продуктивности скважин методом акустического воздействия // Геоинформатика. 1998. № 3. С. 16–24. 3. Абрамов О.В., Градов О.М. Стационарное акустическое течение вязкой жидкости под воздействием мощного ультразвука // Материаловедение. 2007. № 11. С. 1–7. 4. Mullakaev M.S., Abramov O.V., Abramov V.O., Gradov O.M., Pechkov A.A. An ultrasonic technology for productivity restoration in low-flow boreholes // Chemical and Petroleum Engineering. 2009. P. 1–8. 5. Максимов Г.А., Радченко А.В. Моделирование интенсификации нефтедобычи при акустическом воздействии на пласт из скважины // Техническая акустика, 2003. № 10. С. 1–16. 6. Максимов Г.А., Радченко А.В. Роль нагрева при акустическом воздействии на пласт // Геофизика. 2001. № 6. С. 38–46. 7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 247 с.