

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Ю.И. Горбачев (МГУ), Н.И. Иванова (МГУ), Т.В. Колесников (ИНЕФ),
А.А. Никитин (МГУ), Э.И. Орендлихерман (ИНЕФ).

Нефтяные компании проявляют все возрастающий интерес к повышению нефтеотдачи за счет воздействия на нефтяные пласты с помощью знакопеременных давлений различной частоты и интенсивности. Объектом воздействия могут быть как пласт в целом, так и *призабойная часть пласта* (ПЗП). Цель данной статьи рассмотреть физику явлений и технологию воздействия на ПЗП с целью ее очистки.

Воздействие проводят с помощью свабов [9], пульсаторов давления (в том числе, имплозионных) [9, 11], пороховых генераторов и аккумуляторов давления [3, 19], электроискровых излучателей (спаркеров) [4, 15, 20], магнитострикционных и пьезокерамических излучателей [6]. Частотный спектр перечисленных воздействий занимает диапазон от тысячных долей герца (при свабировании) до десятков килогерц (для магнитострикторов и пьезокерамики), диапазон изменения давления простирается от тысячных - сотых долей мегапаскаля для магнитострикторов и пьезокерамики, до десятков мегапаскалей для остальных методов. Учитывая, что акустика в широком смысле, изучает упругие колебания от самых низких (условно, нулевых частот) назовем перечисленные воздействия акустическими.

Общим, во всех случаях, является объект воздействия. На рис.1 приведен типичный график зависимости отношения текущего дебита Q к его потенциальному значению Q_n от расстояния R до стенки скважины и степени снижения проницаемости околоскважинного пространства порового коллектора [14].

Видно, что дебит зависит от проницаемости пород, залегающих в пределах прискважинного слоя толщиной примерно 1,0 метр. Именно этот слой определяет производительность

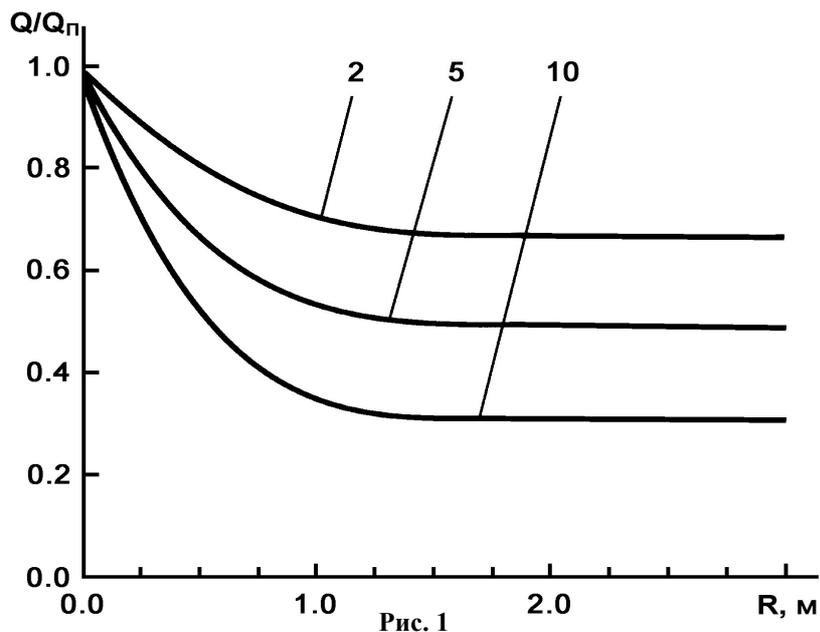


Рис. 1

скважины, является ее гидродинамическим стоком. Он и должен быть объектом воздействия.

Из общей акустики известно, что процесс является волновым, если

$$L / v \gg T,$$

где L - характерный размер объекта воздействия, v - скорость упругой волны, T - период синусоидальных колебаний или время нарастания импульса. Положив скорость волны в породе равной 3000 м/с видим, что к волновым следует отнести процессы с частотой $f > 10$ кГц, характерной для магнитострикционных и пьезокерамических излучателей. В остальных случаях возникающей упругой волной можно пренебречь и считать, что создаваемое знакопеременное давление приложено к “пробке”, закупоривающей коллектор и имеющей характерный размер $L \approx 1,0$ м. Сказанное позволяет оценить соответствующие градиенты давления. Для электроискровых излучателей, свабов, пульсаторов давления, пороховых генераторов и аккумуляторов давления, они достигают десятков мегапаскалей (сотен атмосфер) на метр, а для волновых - могут быть оценены по формуле

$$\text{grad } p \approx 4 p_0 / \Lambda,$$

где Λ - длина волны, p_0 - амплитуда акустического давления. Соответственно, для магнитострикторов и пьезокерамики (p_0 для них, как уже говорилось, имеет порядок тысячных - сотых долей мегапаскаля, а Λ - порядок 10^{-1} м) $\text{grad } p$ меняется в пределах десятых - сотых долей мегапаскаля (от единиц до десятых долей атмосферы) на метр [7.].

Преобладающая частота применяемых в настоящее время излучателей магнитострикционного и пьезокерамического типа равна 20 – 25 кГц. Поэтому основанную на их применении технологию можно назвать ультразвуковой. Ей и будет уделено основное внимание.

Технология заключается в акустическом воздействии (АВ) на пласты-коллекторы с целью восстановления их продуктивности или приемистости, если эти показатели снизились в процессе эксплуатации за счет образования зон пониженной проницаемости (скин-слоев) в их призабойных зонах. При проведении обработки, с помощью скважинного прибора, опускаемого в зону перфорационных отверстий на обычном каротажном кабеле, в скважине возбуждается акустическое поле интенсивностью до 10 кВт/м^2 . Его интенсивность в породе вблизи стенки скважины составляет 1 кВт/м^2 , что обеспечивает интенсивность порядка $0,2 \text{ кВт/м}^2$ в породе на расстоянии около одного метра от стенки [12].

Глубина залегания объектов воздействия может достигать многих тысяч метров. Воздействие осуществляется избирательно, поточечно с разрешением до одного метра по вертикали, т.е. без влияния на необрабатываемые (например водоносные) интервалы. Оборудование и подготовка скважины не отличаются от таковых при стандартных геофизических исследованиях. Широкий набор скважинных приборов различного диаметра позволяет проводить воздействие как в открытом стволе, так и через насосно-компрессорные трубы. В нагнетательных скважинах обработка может проводиться при закачке и во время остановки, а в скважинах газлифтного и фонтанного фондов - без

прекращения добычи и подъёма насосно-компрессорных труб. На механизированных скважинах обработку целесообразно совмещать с подземным или капитальным ремонтом оборудования. Акустическое воздействие обладает эффектом последствия, т.е. положительный эффект от его применения сохраняется от нескольких недель до двух лет и более. Метод экологически чист, а затраты на его проведение ниже, чем при химобработке и, тем более, гидроразрыве.

Восстановление потенциальной производительности скважин достигается за счет разрушения органических и неорганических структур, кольтирующих в процессе добычи или нагнетания призабойные части пластов-коллекторов и приводящих к возникновению скин-слоев. Существует два главных механизма их образования. Первый, обычно называемый *стрейнинг* (straining: – в данном случае - фильтрование), характерен, в основном, для кольтирующих структур минерального происхождения. Он заключается в кольтации поровых каналов частицами песчаников, глин и т.д., размер которых не на много меньше эффективных размеров поровых каналов (в пять и менее раз меньше размеров зерен, слагающих пласт) [24, 25]. Такие частицы, минеральный состав которых в основном совпадает с минеральным составом коллектора, всегда имеются в порах и в отсутствии течения находятся в осажденном состоянии, т.к. в силу их относительно большого размера гравитационные силы превышают силы отталкивания от стенок пор (отталкивание, связано с тем, что знаки поверхностных зарядов частиц и поровых каналов как правило совпадают). При возникновении течения и достижении им критических скоростей (согласно [25] – это десятые доли см/с для однофазных флюидов и сотые доли см/с для водонефтяных эмульсий) частицы увлекаются флюидом и кольтируют сужения поровых каналов. Расстояние от стенки скважины, на котором достигаются критические скорости, обычно не превышает нескольких десятков сантиметров и, соответственно, только залегающие в этом интервале частицы увлекаются потоком и вызывают кольтацию.

Большой размер частиц, вызывающих стрейнинг, предопределяет механический характер кольматирующих образований, причем кольматируются в основном узости поровых каналов. Эти факторы предопределяют невысокую прочность кольматирующей системы в целом. По данным вышеназванной работы, небольшие знакопеременные воздействия (например, обратный ток флюида или акустическое воздействие малой амплитуды) приводят к их разрушению, восстановлению исходной проницаемости и, соответственно, дебита.

Стрейнинг реализуется на начальном этапе эксплуатации добывающих скважин, т.е. пока минеральные частицы относительно большого размера не удалены потоком из области, где скорость достигает критических значений (новые частицы в интервал не привносятся, т.к. скорости вне его ниже критических).

Для частиц органического происхождения – парафиновых, асфальтеновых – стрейнинг протекает аналогичным образом, хотя в силу высокой плавучести, обусловленной близостью плотностей пластового флюида и материала кольматанта, даже частицы относительно большого размера не отложены изначально на стенках поровых каналов. Причем такие частицы, находящиеся во флюиде вне пределов ПЗП, стрейнинга обычно не вызывают, т.к. отфильтровываются на пути движения к забою.

Итак, стрейнинг реализуется на начальном этапе эксплуатации добывающих скважин, т.е. пока частицы относительно большого размера не удалены потоком из ПЗП. Кроме того, процесс кольматации в результате стрейнинга можно считать «быстрым». В эксперименте, описываемом в работе [25], при прокачке всего 100 поровых объемов (Pore Volume) жидкости (100 PV), проницаемость образца упала на 15 – 30%.

Одновременно со стрейнингом развивается другой – медленный - процесс кольматации. В его основе причины физико-химического характера. Кольматация в этом случае возникает в результате действия органических и неорганических частиц, размер которых существенно меньше (более, чем в 5

раз) эффективных размеров поровых каналов. Эти частицы способны мигрировать по пласту на большие расстояния не будучи отфильтрованными. Учитывая реальные эффективные размеры пор коллекторов, можно утверждать, что размер таких частиц не должен превышать $5 \cdot 10^{-6}$ м. Жидкости, содержащие частицы такого размера, являются *коллоидно-дисперсными системами* (КДС) - суспензиями, состоящими из *дисперсной среды* - жидкости, и *дисперсной фазы* - коллоидных частиц размером от $5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-9} м. Особенность коллоидных частиц, как органических, так и неорганических, в том, что они седиментационно устойчивы, т.е. при относительно небольших концентрациях могут находиться во флюиде не оседая и не создавая агрегатов при любых значениях скорости течения, в том числе и стремящихся к нулю. Для неорганических частиц такая устойчивость обусловлена в частности тем, что знаки их поверхностных зарядов и поверхностных зарядов стенок пор совпадают (как правило они отрицательны). Устойчивость органических КДС связана с низким межфазным натяжением поверхности частица – углеводородная жидкость и их высокой плавучестью, обусловленной малой плотностью.

При прямолинейном течении суспензионного потока невысокой концентрации система устойчива, т.е. частицы не отлагаются на стенках поровых каналов при любых скоростях. Однако, фактически, поровые каналы извилисты, имеют сужения и ответвления. Условно, их можно подразделить на относительно прямолинейные и «искривленные». На скоростях, превышающих критические значения, начинается отложение частиц на фронтальных по отношению к направлению потока стенках зерен породы [26], поскольку при обтекании зерен центробежные силы, действующие на частицы в местах искривления потока, стремятся приблизить их к стенкам поровых каналов. При достижении критических скоростей, центробежные силы преодолевают силы отталкивания и переводят частицы в область действия молекулярных электростатических сил притяжения - сил Ван-дер-Ваальса. В описанном в работе [26] эксперименте, скорости потока имели значения от сотых до десятых долей сантиметра в секунду.

В результате постепенного – слой за слоем - отложения частиц на фронтальной стороне зерен «искривленные» поровые каналы постепенно кольматируются структурированными системами частиц, а перераспределение потока между искривленными и относительно прямолинейными каналами приводит к заметному росту концентрации частиц в последних. Поскольку частицы в каналах распределены статистически, существует вероятность одновременного попадания в то или иное поровое сужение такого их количества, при котором сужение закупоривается. Это явление носит название *бриджинг* (bridging – мостообразование) [22]. С ростом концентрации частиц вероятность бриджинга быстро растет, что интенсифицирует процесс кольматации теперь уже прямолинейных каналов. В конечном счете, поровое пространство ПЗП кольматируется практически полностью.

Данный механизм действует значительно длительнее стрейнинга. Так, согласно данным того же эксперимента, первая фаза – закупорка искривлений – завершается после прокачки 200 PV. Его второе отличие от стрейнинга в том, что кольматируется все поровое пространство. И, наконец, третье - в том, что коллоидные частицы в образующихся структурах связаны не механически, а электрически, силами межмолекулярного взаимодействия через прослойки жидкости, составляющей дисперсную среду. Такое структурирование частиц носит название *коагуляции*. Ей подвержены как органические, так и неорганические частицы, причем наличие электрических сил сцепления приводит к тому, что кольматационные структуры в этом случае прочнее, чем в результате стрейнинга.

На начальном этапе структурирования возникают *дальние коагуляционные структуры (гели)*, в которых частицы находятся на сравнительно больших расстояниях. Силы сцепления невелики. Для гелей неорганического происхождения они составляют в среднем 10^{-11} Н. При росте концентрации частиц, возникающем за счет гравитационного уплотнения гелей, достигается *вторая критическая концентрация*, при которой возникают *ближние*

коагуляционные структуры. Частицы в них находятся на существенно меньших расстояниях, силы сцепления возрастают на 2 - 3 порядка [5, 18, 23].

Образовавшиеся структуры представляют собой пространственные сетки, пронизывающую пластовой флюид. Такой структурированный флюид становится неньютоновской жидкостью [2, 7, 10]. Его вязкость возрастает на несколько порядков и ПЗП теряет потенциальную проницаемость. Для ее восстановления необходимо произвести полное объемное разрушение пространственной сетки. Это вернет жидкости ньютоновские свойства, в том числе, изначальную вязкость, на некоторое, характерное для данной КДС, время. Если за это время скважина будет промыта и избыток частиц дисперсной фазы удален из ПЗП, проницаемость окажется восстановленной. В противном случае повышенная концентрация частиц вновь приведет к образованию структурной сетки. **Рисунок 2** иллюстрирует вынос частиц кольматанта после акустического разрушения пространственной структуры (указанная в подрисуночной надписи аббревиатура АРСиП – Акустическая Реабилитация Скважин и Пластов – логотип ЗАО «ИНЕФ», выполнявшей воздействие).

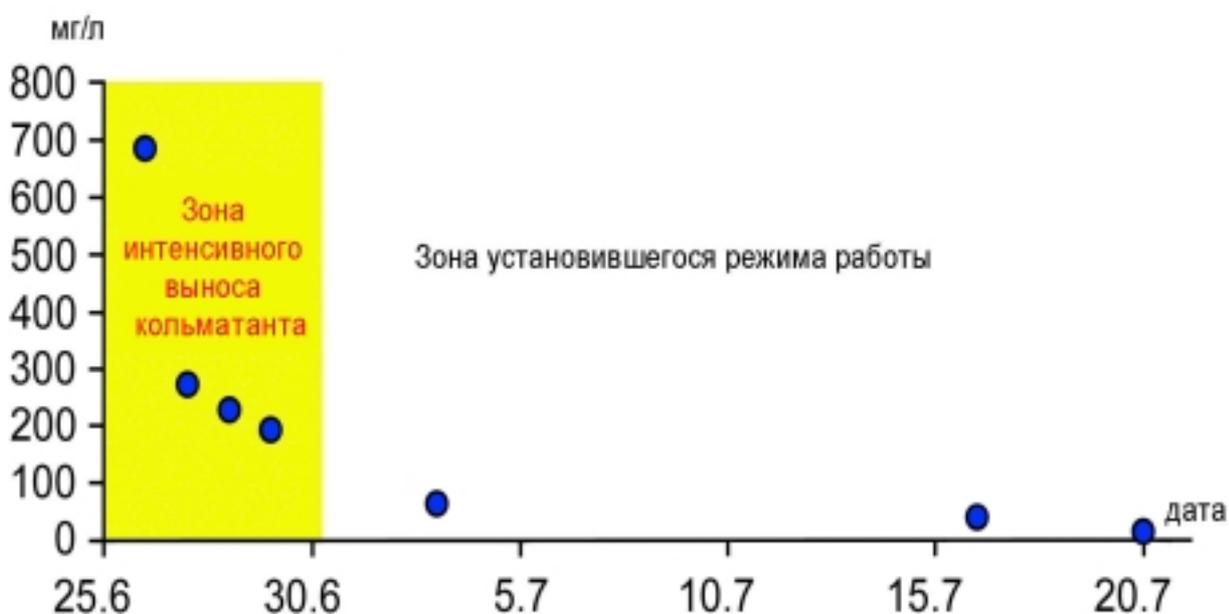


Рис. 2

Одновременно растет дебит скважины. В данном примере его прирост составляет 237% по нефти. Процент обводненности продукции остается прежним.

Для разрушения структуры надо заставить неньютоновскую жидкость двигаться сквозь пористую среду, т.к. известно, что при движении структурированных КДС сетка разрушается [7, 10]. Необходимый для начала движения неньютоновской жидкости через пористую среду *предельный градиент давления* можно оценить с помощью следующего неравенства [1]:

$$\text{grad}_c p > \tau_o / k_{np}^{1/2}, \quad (2)$$

где τ_o - предельное напряжение сдвига, необходимое для начала движения, а k_{np} – коэффициент проницаемости. Например, для коллектора с $k_{np} = 100$ мД (10^{-14} м²) имеем: $\text{grad}_c p > \tau_o \cdot 10^7$ м⁻¹. Видно, что даже для хороших коллекторов $\text{grad}_c p$ должен численно на несколько десятичных порядков превосходить предельное напряжение сдвига.

Таблица 1. Реологические характеристики нефтей ряда месторождений Татарии (по данным работы [8])

Месторождение	N Скважины	Предельное напряжение сдвига МПа·10 ⁻⁷ (дин/см ²)	Вязкость нефти Па·с·10 ⁻³ (сПз)	Предельный градиент давления МПа·м ⁻¹ (дин/см ³)·10 ⁵
Таймурзинское	851	1,280	16,0	0,095
Туймазинское	198	0,100	8,0	0,0075
Арланское	952	0,098	8,0	0,0025
		0,090	9,0	0,0018
		0,069	8,0	0,0028
		0,057	8,0	0,0003
		0,030	9,0	0,0003
		0,020	10,0	0,0003

Сказанное подтверждают результаты экспериментов, приведенные в Таблице 1. Видно, что значения градиентов давления в этом примере действительно превосходят предельные напряжения сдвига на несколько порядков. Впрочем, они невелики и могут быть реализованы с помощью источников акустического воздействия. Произошло это потому, что исследовались образцы, насыщенные нефтями сравнительно невысокой вязкости,

τ_0 для которых много ниже, чем для структурированных КДС на основе парафинов или асфальтенов.

Наши исследования показывают (Табл. 2), что для коагуляционных парафиновых структур, аналогичных тем, что образуются в пластовых условиях, τ_0 зависит от концентрации парафина и, в целом, на два - три порядка выше приведенных в Табл. 1. Поэтому, соответствующие градиенты давления достижимы, причем не всегда, при использовании пороховых генератор и других источников высоких давлений. С помощью ультразвуковых излучателей они не реализуемы. Вместе с тем, как видно из Табл. 2, τ_0 для таких структур в несколько раз меньше, чем для кристаллизационных структур, образующихся в трубопроводах при снижении температуры.

Таблица 2. Зависимость предельного напряжения сдвига от концентрации парафина для структур различного типа.

Концентрация парафина, %	Предельное напряжение сдвига, МПа·10 ⁻⁷ (дин/см ²)	Тип структуры
12	124	Коагуляционная
20	440	Кристаллизационная
30	940	Кристаллизационная

Каким же образом осуществляется очистка ПЗП в тех случаях, когда градиенты давления недостаточен для разрушения структуры?

Частицы в узлах сетки совершают колебательные движения. Энергия колебательного движения растет, в частности, при нагреве. В результате связи между некоторыми частицами нарушаются. Это приводит к ослаблению структуры, снижению предельных напряжений сдвига и, соответственно, смещению реологических кривых по оси абсцисс в направлении нуля (рис. 3а

[15].

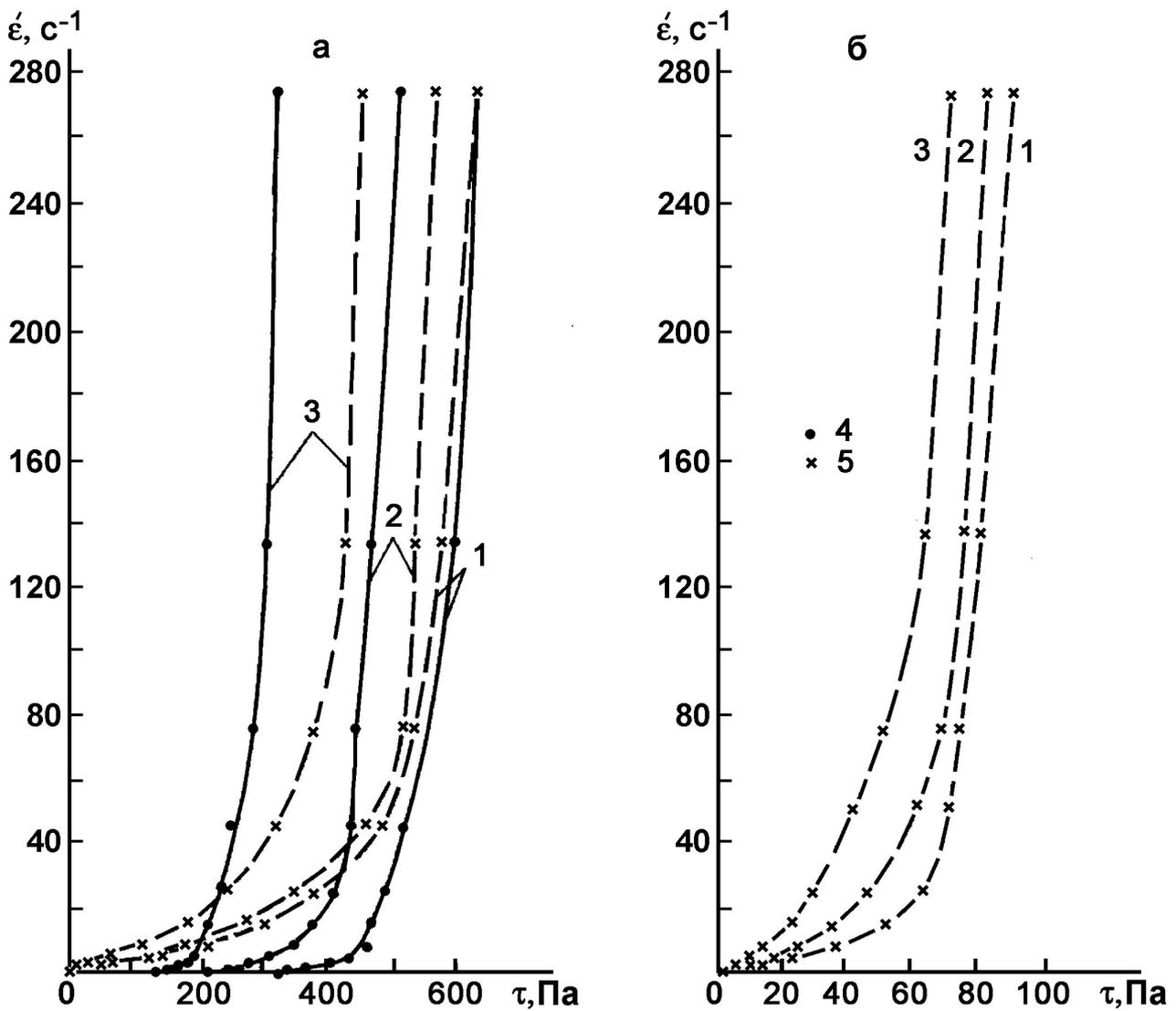


Рис. 3

Исследования показывают, что при ультразвуковом воздействии температура ПЗП возрастает на 10-12° С за счет диссипации акустической энергии [13]. Для полного разрушения структурной сетки этого недостаточно. Однако и при более значительных изменениях температуры предельные градиенты давления могут быть снижены максимум в два – три раза, а не на порядки, как во многих случаях необходимо, т.к. по мере роста числа высвободившихся частиц увеличивается вероятность их столкновения и, следовательно, повторной коагуляции. В результате, устанавливается динамическое равновесие между процессом разрушением сетки и ее восстановлением - *релаксацией*. Таким образом, повышение температуры за счет

диссипации акустической энергии не является основным механизмом очистки ПЗП, хотя и может играть вспомогательную роль.

Итак, разрушения структурной сетки можно достичь путем увеличения энергии колебательных движений коллоидных частиц. Увеличение интенсивности колебаний за счет повышения температуры обеспечивает лишь частичное ее разрушение. Если же реализовать воздействие, при котором процесс разрушения будет идти быстрее, чем релаксация, произойдет полное разрушение структуры и, как следствие, восстановление изначальной вязкости флюида η_{min} [7, 16]. Такую возможность дает прямое возбуждение в среде упругих колебаний. Анализ приведенных на **рис. 3** зависимостей скорости деформации $\dot{\epsilon}$ коагуляционных материалов от напряжения сдвига τ показывает, что под воздействием вибраций меняется вид функции $\dot{\epsilon}=f(\tau)$: аппроксимирующий ее график становится не кусочно-прерывистым (сплошные линии), а монотонно стремящимся к нулевому значению градиента давления (пунктирные линии). Это значит, что при акустическом воздействии происходит практически полное разрушение структуры.

Возвращение флюиду ньютоновских свойств означает снижение его вязкости на несколько порядков, в связи с чем на несколько порядков снижается и предельный градиент давления, необходимый для начала его движения. Выше было показано, что численно такой градиент на несколько десятичных порядков превышает значение τ_0 . Поэтому необходимая для его достижения депрессия на пласт должна быть высокой. Однако, как правило, достаточными оказываются те перепады давления, которые обеспечивали ранее потенциальный дебит скважины. Следовательно, если сразу после проведения воздействия обеспечить соответствующую депрессию на пласт, КДС придет в движение и избыток частиц коагулянта будет удален из ПЗП (см. рис. 2).

Частота, необходимая с точки зрения исключения влияния релаксации, определяется условием:

$$T \ll \theta,$$

где T - период колебаний, а θ - время релаксации системы. Анализ показывает, что частоты, при которых влиянием релаксации можно пренебречь, имеют порядок нескольких десятков герц. Из перечисленных в статье источников, такие частоты достижимы лишь для электроискровых излучателей (спаркеров), а также источников магнитострикционного и пьезокерамического типов.

К настоящему моменту фирмами, выполняющими АВ, обработаны тысячи скважин на различных месторождениях стран СНГ. Так, ЗАО «ИНЕФ», специализирующееся на применении пьезокерамических излучателей, за период с 1992 по 2001 годы обработало около 1100 скважин на различных нефтегазовых месторождениях России, Казахстана, Туркмении и Азербайджана. В результате накоплен значительный опыт, позволяющий сделать ряд важных выводов.

Для высокодебитных скважин (соответственно, для коллекторов с высокой проницаемостью) коэффициент успешности (отношение числа успешных обработок к их общему числу) достигает 75% (рис.4).

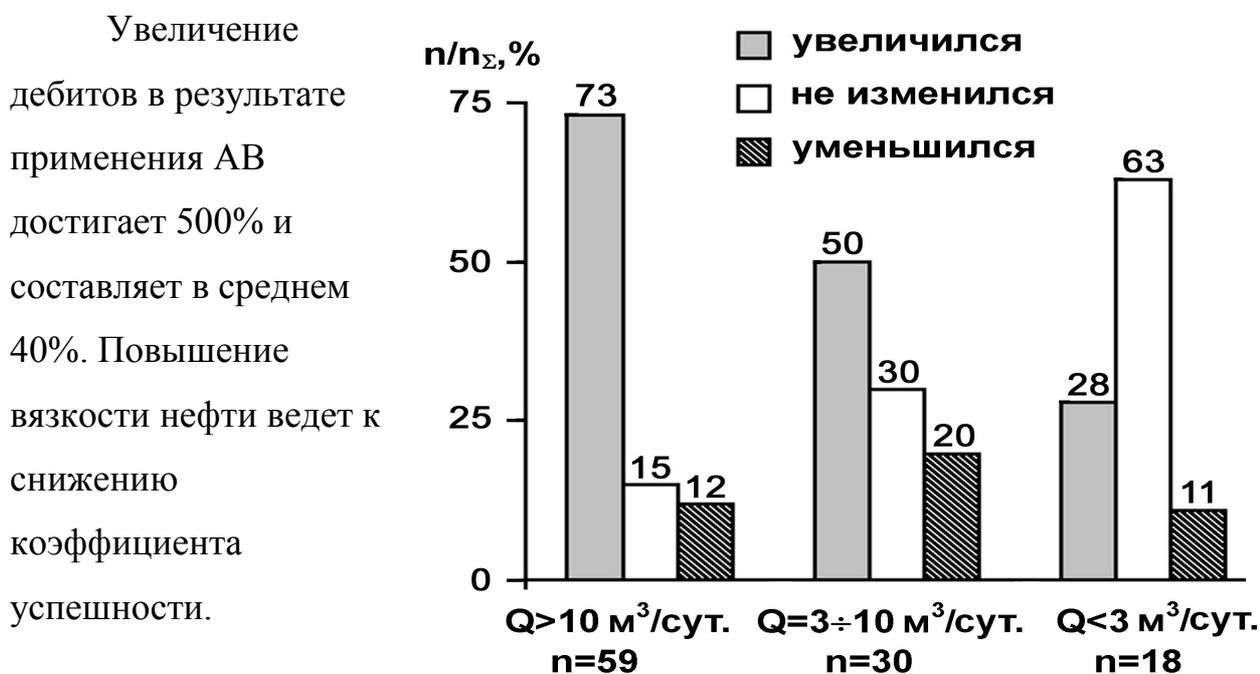


Рис. 4

В нагнетательных скважинах коэффициент успешности несколько выше, чем в добывающих. Продолжительность эффекта колеблется от нескольких

недель до 2-х и более лет. **На рисунке 5** приведен типичный пример применения АРСиП на скважине № 375 (Азербайджан, горизонт 7).

В результате обработки, дебит возрос в среднем приблизительно на 250% .

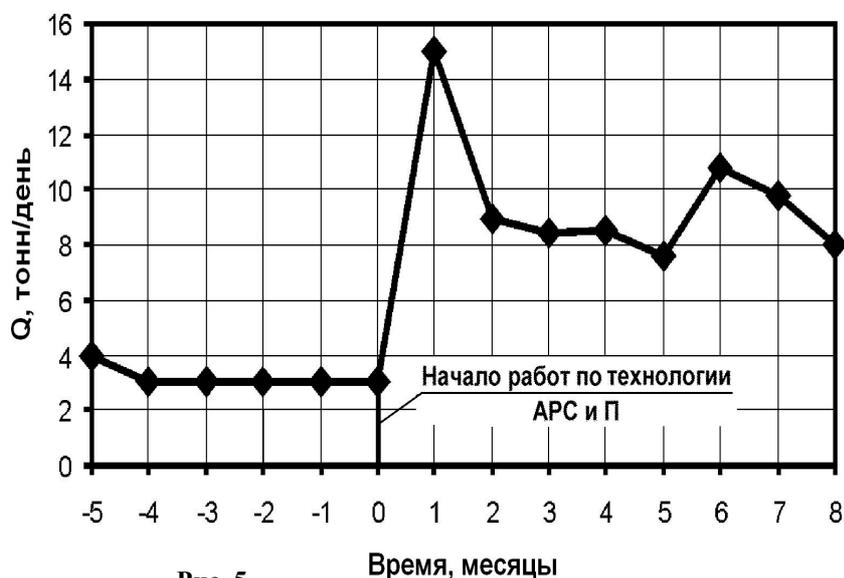


Рис. 5

Обрабатывались песчаники проницаемостью 200 мД и пористостью 20%. Вязкость флюида – 1 мПа.с

Выше было отмечено, что акустическому воздействию должны подвергаться только гидродинамические стоки скважин, т.е. ПЗП. Высокая частота, реализуемая магнитострикционными и пьезокерамическими излучателями, ограничивает глубину воздействия именно этой зоной. Вместе с тем, метод так дешев и прост в реализации, что большое количество скважин может быть обработано за относительно короткое время и, поскольку пласт - это сложная гидродинамическая система, он во многих случаях в целом реагирует на проведение акустических обработок. Накопленный ИНЕФ опыт позволяет в каждом конкретном случае определить ту группу скважин, обработка которой обеспечивает воздействие в целом на пласт. Как правило, в такую группу входят в первую очередь нагнетательные скважины. Так, на месторождении Ватъеганское (Кагалым, Западная Сибирь), обработке были подвергнуты 13 нагнетательных скважин. В результате добыча нефти по

месторождению в целом возросла примерно на 20% при неизменном проценте обводненности продукции (рис. 6).

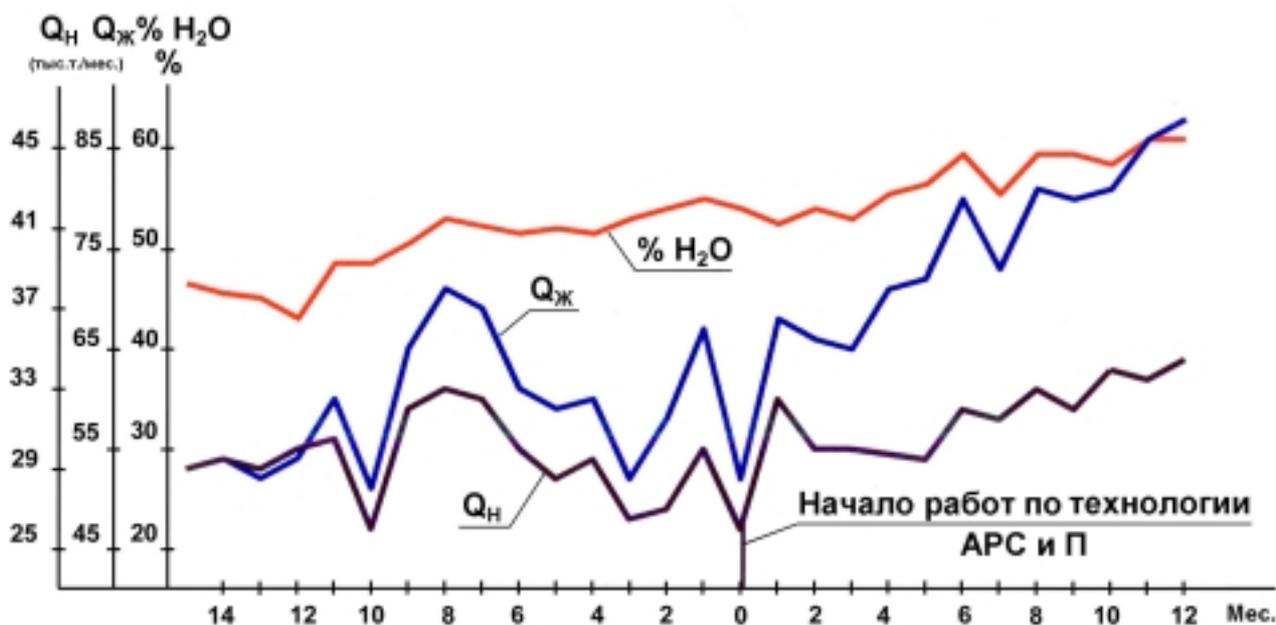


Рис. 6

Сопоставление результатов дебитометрии и диаграмм ПС показывает, что в процесс заводнения были вовлечены ранее не работавшие пропластки. В этой связи, акустическое воздействие можно рассматривать как технологию, направленную на повышения нефтеотдачи пласта в целом, что нашло отражение в аббревиатуре АРСиП (Акустическая Реабилитация Скважин и Пластов), являющейся логотипом ЗАО «ИНЕФ». Именно такой подход, позволяющий в полной мере реализовать достоинства акустического воздействия, отличает АРСиП от других акустических технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидравлика. М.: Недра, 1986, 303 с.
2. *Вахитов Г.Г., Кузнецов О.Л., Симкин Е.М.* Термодинамика призабойной зоны нефтяных коллекторов. М.: Недра, 1978, 200 с.
3. *Гайваронский И.Н.* Состояние и перспективы развития методов интенсификации притоков в нефтяных и газовых скважинах взрывными методами // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1998. Вып. 43.
4. *Герштанский О.С.* Опыт применения акустического воздействия на призабойную зону проницаемых пород на месторождениях Западного Казахстана // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1998. Вып. 48
5. *Горбачев Ю.И.* Физико - химические основы ультразвуковой очистки призабойной зоны нефтяных скважин // Геоинформатика, 1998, N 3.
6. *Горбачев Ю.И., Кузнецов О.Л., Рафиков Р.С., Печков А.А.* Физические основы акустического метода воздействия на коллекторы // Геофизика, 1998, N4.
7. *Горбачев Ю.И.,* Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений// НТВ «Каротажник», N 60, 1999, сс 55-67.
8. *Девликамов В.В., Хабибулин З.А.* Структурно - механические свойства нефтей некоторых месторождений Башкирии // Нефтяное хозяйство, 1969, N12.
9. *Камалов Ф.Х., Латыпов Р.С., Еникеев М.Д. и др.* Современное оборудование для испытания и интенсификации добычи // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1997. Вып. 38
10. *Крутин В.Н.* Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1998. Вып. 42.

11. *Кузнецов А.И., Мухаметдинов Н.Н.* Термоимплозионный метод обработки призабойной зоны нефтяного пласта // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1997. Вып. 40
12. *Кузнецов О.Л., Ефимова С.Ф.* Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983, 192 с.
13. *Максимов Г.А., Радченко А.В.* Роль нагрева при акустическом воздействии на пласт. // Геофизика, 2001, №6.
14. *Михайлов Н.Н.* Информационно - технологическая геодинамика околоскважинных зон. М. : Недра, 1996. 330 с
15. *Молчанов А.А., Дмитриев Д.Н., Ушкало В.А.* Аппаратура импульсного упругого воздействия на нефтяные пласты “Приток - 1” для интенсификации режима работы нефтегазовых скважин // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1998. Вып. 50.
16. *Николаева С.К., Королев В.А.:* О роли температуры в процессе тиксотропного структурообразования водонасыщенных глинистых грунтов. *Инж. геол. №5, 1981*].
17. *Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В.* Реология тиксотропных систем. К. Наукова думка, 1972, 120с.
18. *Осипов В.И., В.Н. Соколов, Н.А. Румянцева.* Микроструктура глинистых пород. М.:МГУ, 1989, с. 141-144.
19. *Савелов Р.П., Пивкин Н.М., Пельх Н.М., Южаников П.М.* применение порохового акустического аккумулятора давления для интенсификации добычи нефти // НТВ “Каротажник “. Тверь: 1998. Вып. 42.
20. *Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н.,* Нефтяное хозяйство. №1, 2002.
21. *Урьев Н.Б.* Физико - химические основы интенсификации технологических процессов в дисперсных системах. М.: Знание, 1980, 64с.
22. *Chauveteau, G., Saleehi, N and Leger, L.:* “Flow induced retention of colloids in porous media”. Part I – concepts and models. *ACS Symp.* June 1994.
23. *Gorbachev, Yu., Rafikov, R., Rok, V., & Pechkov, A.,* Acoustic well stimulation: theory and application// *First Break*, 1999, V17, №10, 331-334.

24. *Gruesbeck, C., Collins, R.E.*: “Entrainment and deposition of fine particles in porous media”. *Paper (SPE 8430)* Aug. 1982.
25. *Muecke, T.W.*: “Formation fines and factors controlling their movement in porous media” *J. Pet. Tech.* (April 1979) 144-50.
26. *C. Roque, et al.*: “Mechanisms of formation damage by retention of particles suspended in injection water” *Paper (SPE 30110)*. 1982.