

УДК 622.276.6

УВЕЛИЧЕНИЕ ОТБОРА НЕФТИ ПУТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТЫ ПАКЕТАМИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Бажалук Я.М.¹, Карпаш О.М., Клымышин Я.Д., Гутак А.И., Худин Н.В.

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,
г. Ивано-Франковск, e-mail: ¹yaropolkbazhaluk@gmail.com*

Аннотация. Одним из перспективных направлений исследований в области повышения нефтеизвлечения из пластов является исследование влияния упругих колебаний на продуктивный пласт. Исследования по влиянию упругих колебаний на застойные зоны нефти в нефтяном пласте с целью повышения коэффициента нефтеизвлечения находятся на начальной стадии. Целью данной работы являются теоретические и экспериментальные исследования влияния упругих колебаний различных частот на фильтрацию нефтеводяных смесей в призабойной (ПЗП) и межскважинной (МЗП) зонах пласта и, как следствие, повышение производительности нефтяных скважин и коэффициента нефтеизвлечения на нефтяных месторождениях.

Ключевые слова: упругие колебания, фильтрация, нефть, частота, интенсивность

В последние годы возрастает интерес специалистов нефтегазовой промышленности к практическому использованию новых высокоэффективных и рентабельных технологий, обеспечивающих стабильный прирост добычи нефти в сложных геолого-промышленных условиях. В процессе разработки нефтяных месторождений уменьшается пластовое давление и на определенном этапе разработки месторождения существующая пластовая энергия становится недостаточной для вытеснения нефти из малопроницаемых зон пласта в эксплуатационные скважины, в результате чего в пласте появляются застойные (малоподвижные) зоны нефти. В неоднородных по проницаемости пластах в процессе вытеснения нефти водой создаются условия для блокирования нефти в менее проницаемых зонах пласта и, соответственно, увеличение притока воды к эксплуатационным скважинам, что приводит к уменьшению нефтеизвлечения из пластов.

Одним из перспективных направлений исследований в области повышения нефтеизвлечения из пластов является исследование влияния упругих колебаний на продуктивный пласт.

Основная часть описанных в литературе теоретических и экспериментальных исследований касается изучения влияния упругих колебаний на пористую среду призабойной зоны пласта.

Исследования по влиянию упругих колебаний на застойные зоны нефти в нефтяном пласте с целью повышения коэффициента нефтеизвлечения находятся на начальной стадии.

Недостаточно изученными являются механизмы взаимодействия поля упругих колебаний с пористой нефтеводонасыщенной средой пласта при фильтрации нефтеводяной смеси в нефтяном пласте. В первую очередь, это механизмы влияния упругих колебаний на скорость фильтрации флюидов в пористой среде.

Целью данной работы являются теоретические и экспериментальные исследования влияния упругих колебаний различных частот на фильтрацию нефтеводяных смесей в призабойной (ПЗП) и межскважинной (МЗП) зонах пласта и, как следствие, повышение производительности нефтяных скважин и коэффициента нефтеизвлечения на нефтяных месторождениях. Исследования проводились в Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа и научно-производственной фирме «Интекс».

Воздействия на ПЗП

Рассмотрим процессы воздействия упругими колебаниями на ПЗП с целью повышения производительности нефтяных скважин с привлечением понятий градиентов давления. Градиенты давления в ПЗП создаются скважинными или наземными гидравлическими генераторами упругих колебаний.

Анализ процессов воздействий упругими колебаниями на ПЗП с привлечением понятий градиентов давления является правомерным в связи с тем, что рассматриваются процессы, проходящие в скважине и в зонах пласта с линейными размерами, не превышающими длин волн упругих колебаний с частотами от единиц до нескольких тысяч герц. Так, например, по [1 - 3] резкое снижение проницаемости пласта в пристволенной зоне наблюдается на расстояниях от нескольких сантиметров до 1,5 - 2,0 м.

В данном исследовании рассматриваем импульсный режим работы гидравлического генератора, при котором в жидкой среде скважины создаются импульсы давления.

Гидроимпульсы давления, действуя с определенной частотой повторения на окружающую скважинную слоистую среду (вода-сталь-цемент-пласт), возбуждают в пласте волновые пакеты упругих затухающих колебаний определенной длительности.

Параметры волновых пакетов (максимальная амплитуда колебаний в пакете, длительность пакета) определяются как акустическими характеристиками пласта (добротность, скорость распространения и коэффициент поглощения упругих колебаний, акустическое сопротивление), так и параметрами последовательности гидроимпульсов давления (амплитуда, частота повторения импульсов). При увеличении частоты повторения пакетов скважность последовательности пакетов (отношение периода повторения к длительности пакета) будет уменьшаться [4].

Так результаты исследований представленные в [5] показывают, что при воздействии на песчаник механических импульсов давления интенсивностью 90 Вт/см^2

в пласте создаются волновые пакеты в спектральном разложении которых преобладают гармоничные составляющие в диапазоне частот 20 - 1000 Гц, а длительность пакетов в среднем составляет 0,1 с. Таким образом, при частоте повторения пакетов 10 Гц, скважность данной последовательности пакетов будет равна единице.

Исходя из приведенных значений спектров частот, скоростей акустических волн в средах скважинного пространства и продуктивного пласта, а отсюда и длин акустических волн в этих средах, характерных геометрических размеров сред, где нас интересует влияние упругих колебаний на пласт, можно, как это отмечено в [1], использовать неволновые методы анализа, основанные на понятии градиента давления $\text{grad } p$:

$$\text{grad } p = \frac{dp}{dt} \approx \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad (1)$$

где Δp – перепад (изменение) давления между двумя единичными площадками среды (изотропного и однородного в принятом направлении), которые удалены друг от друга на расстоянии Δl .

В период эксплуатации скважины, в процессе фильтрации при поступлении в ПЗП различного типа коагулирующих частиц, пластовый флюид превращается в ПЗП в коллоидно-дисперсную структуру (КДС), которая представляет собой неньютоновскую жидкость [1, 6, 7]. Указанная жидкость создает значительное гидравлическое сопротивление при движении флюида, что вызывает падение дебита скважины. Для начала движения неньютоновской жидкости в порах пласта предельный градиент давления можно оценить с помощью следующего неравенства [1, 6]:

$$\text{grad } p > \frac{\tau_0}{K_{np}^{1/2}}, \quad (2)$$

где: τ_0 – предельное напряжение сдвига, которое соответствует минимальному перепаду статического давления, вызывающее разрушение пространственной сетки КДС; K_{np} – коэффициент проницаемости пласта.

В нашем случае давление изменяется во времени. Это изменение давления (как и фронт давления) перемещается в среде со скоростью C_n распространения акустических волн в этой среде (физика этих явлений одна и та же). За время Δt фронт давления упругой волны Δp пройдет расстояние Δl со скоростью C_n , отсюда получаем:

$$\text{grad } p = \Delta p / \Delta l = \Delta p / (C_n \Delta t) = (\Delta p / \Delta t) : C_n. \quad (3)$$

Скорость распространения упругих колебаний C_n в среде является величиной постоянной, которая определяется физическими параметрами среды, в нашем случае – продуктивного пласта. Числитель выражения (3) равен скорости изменения давления во времени. Как известно из теории гармонического анализа [8, 9, 10], чем короче фронты импульсных процессов, тем больше амплитуды выс-

ших гармонических составляющих на которые раскладываются импульсные процессы. Отсюда следует, что с учетом (3) мы можем получить одни и те же градиенты давлений, как при высокочастотных действиях, так и при низкочастотных, но достаточно больших по амплитуде (по перепадам давлений).

Как было сказано выше – малопроницаемая зона продуктивного пласта, которая окружает перфорированную зону скважины, обусловлена образованием в пласте КДС, которая представляет собой "пробку" с размерами стенки по толщине не более 1,5 - 2,0 м. При таких геометрических размерах "пробки" коэффициент прохождения упругой энергии находится на уровне 0,6 [2].

Поэтому в ближней зоне пласта на расстояниях от стенки скважины до нескольких метров, формы акустических импульсов давления (волновых пакетов), образующиеся при воздействии на пласт гидроимпульсами давления, изменяются мало.

Если создать по всей толщине "пробки" КДС крутизну переднего фронта волнового пакета $dp/dt \approx \Delta p/\Delta t$, согласно (2), достаточную для создания $\text{grad } p$, который вызывает разрушение структуры КДС, то неньютоновская жидкость в ПЗП становится более текучей и может быть вытеснена в скважинное пространство. Вытеснить разрушенную структуру КДС из пласта необходимо потому, что она способна самовосстанавливаться [1, 7]. С этой точки зрения целесообразно сочетание импульсных АД с одновременной депрессией на пласт.

Исходя из вышеприведенного, можно сделать вывод, что анализ процессов механических воздействий на ПЗП с применением понятий градиентов давления позволяет связать физико-механические характеристики системы пласт-коллектор-пластовый флюид с необходимыми значениями градиентов давления в пласте, создаваемых с целью изменения характеристик указанной системы.

Действительно, выражение (2) определяет величину градиента давления, необходимого для изменения физико-механических характеристик системы пласт-флюид. Зная радиус зоны измененной проницаемости и градиент давления, который должен действовать в этой зоне, можно определить технические параметры скважинного генератора импульсов давления для конкретных скважин.

Для обеспечения действия градиента давления по всей длине радиуса зоны измененной проницаемости рассчитанное значение Δl должно быть больше фактического значения радиуса зоны измененной проницаемости R . Значение Δl будет зависеть от амплитуды и продолжительности переднего фронта импульсов давления, а также от значения C_n .

Величина $\text{grad } p$, необходимая для разрыва связей между коагулирующими частицами кольматанта определяется согласно выражению (2) для конкретного пласта исходя из величины предельного напряжения сдвига пластового флюида τ_0 и коэффициента проницаемости пласта K_{np} . Согласно выражению (3) необходимую амплитуду импульсов давления в пористой среде пласта можно определить

из установленного для конкретного пласта значения $\text{grad } p$, длительности переднего фронта волновых пакетов Δt , а также величины радиуса зоны измененной проницаемости R . В первом приближении длительность переднего фронта волновых пакетов можно принять, как время нарастания амплитуды колебаний в пакете от минимального до максимального значений, которое, с достаточной для практических расчетов точностью, соответствует переднему фронту гидроимпульсов давления, создаваемых гидрогенератором в скважинной среде. Указанное диктуется потребностью в простом инженерном расчете параметров последовательности гидроимпульсов давления, действующих из скважины на пласт. Время нарастания давления в скважине (длительность переднего фронта импульса давления) можно определить с помощью быстродействующего электронного манометра.

Значение R вычисляют по результатам гидродинамических исследований пласта на основе стандартных методик, а длительность переднего фронта импульса давления для конкретного импульсного генератора устанавливают не менее отношения R/C_n .

После импульсно-волнового воздействия создается оптимальная для конкретных геолого-технических условий депрессия на пласт с помощью стандартных технологий и оборудования с целью удаления кольматанта из ПЗП.

Задержки с созданием депрессии на пласт приводят к повторной коагуляции частиц кольматанта (самовосстановление коагуляционных структур) и тем самым к повторной блокировке ПЗП.

В связи с этим для создания депрессий целесообразным является использование струйных насосов, которые позволяют в широких пределах плавно изменять забойное давление. Конструктивное сочетание гидравлического генератора импульсов давления и струйного насоса позволяет эффективно очищать от кольматирующих веществ ПЗП. После импульсно-волнового воздействия на пласт, с помощью струйного насоса производится выбор оптимального значения депрессии, при которой количество кольматирующих веществ в пробах жидкости, которые берутся на выбросе циркуляционной системы, через равные промежутки времени, будет минимальным, а приток жидкости из пласта будет стабильным [11].

Воздействия на МЗП

Исследованию влияния упругих колебаний на фильтрацию нефте-водяных смесей в обводненном пласте, с целью повышения нефтеизвлечения из пластов, посвящено много научных работ [12, 13]. В указанных работах исследуются процессы воздействия полей упругих колебаний сейсмических частот, создаваемых мощными наземными вибраторами, на нефтяные пласты со сложившимися застоными зонами нефти. Вибраторы устанавливаются на месторождении в межскважинных зонах и создают на средней глубине залегания нефтяных пластов

интенсивность упругих колебаний не более $0,000001 \text{ Вт/см}^2$. Несмотря на незначительную интенсивность колебаний, полученные промышленные результаты свидетельствуют о наличии промышленного эффекта при виброрейсмических воздействиях на пласты. Одновременно отмечается и отсутствие эффекта, либо отрицательный эффект при указанных воздействиях для определенных геолого-технических условий [13].

Как показано в [14] уменьшение капиллярного сопротивления для нефти и изменение реологических характеристик нефтегазоводяного флюида при воздействии на пласт упругих колебаний, наблюдается при значении интенсивности колебаний более $0,1 \text{ Вт/см}^2$.

Учитывая различные оценки интенсивности колебаний, необходимой для изменения фильтрационных процессов в пласте, авторами сформулированы следующие теоретические и экспериментальные задачи по исследованиям влияния упругих колебаний на МЗП:

- определить на основе экспериментальных исследований порог интенсивности колебаний, при котором происходят изменения фильтрации в пласте;
- определить в терригенном коллекторе, на основе экспериментальных исследований, коэффициент поглощения волновых пакетов, создаваемых при ударной нагрузке пласта;
- теоретически обосновать возможность создания в пласте на расстоянии до 100 м интенсивности колебаний, необходимой для изменения скорости фильтрации в пласте.

Указанное расстояние принято, исходя из среднего расстояния между нагнетательными и эксплуатационными скважинами в 200 - 300 м и необходимости установки на месторождении не менее двух гидравлических генераторов импульсов давления в нагнетательных скважинах, для эффективного воздействия на застойные зоны нефти в МЗП [15].

Экспериментальные исследования по влиянию упругих колебаний на обводненную модель пласта со сформированной застойной зоной нефти проводились путем воздействия на пласт волновых пакетов длительностью 0,1 с и частотой повторения 1 Гц. В результате проведенных исследований оценено качественное и количественное влияние упругих колебаний на фильтрацию нефте-водяных смесей в обводненном пласте с застойными зонами нефти. Результаты исследований свидетельствуют, что импульсно-волновое воздействие на нефте-водяную смесь при ее фильтрации в пористой среде приводит к уменьшению капиллярного сопротивления для нефти в системе "нефть-вода" и, как следствие, к повышению нефтеизвлечения, а интенсивность колебаний в волновом пакете, при которой происходят изменения фильтрации в модели пласта, составляет $0,01 \text{ Вт/см}^2$ [16].

При частоте повторения пакетов 1 Гц и длительности пакета 0,1 с, среднее значение интенсивности можно оценить как $\frac{0,01 \cdot 0,1}{1} = 0,001$ Вт/см².

Экспериментальные исследования по определению коэффициента поглощения волновых пакетов в терригенном коллекторе проводились при ударной нагрузке пласта на менилитовых (аргилитовых) отслоениях Бытковского нефтяного месторождения.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность создания в менилитовом пласте в поверхностных условиях упругих колебаний волнового пакета интенсивностью 0,1 Вт/см² на расстоянии до 73 м от источника колебаний при интенсивности импульса давления в точке удара 90 Вт/см² [5].

Экспериментально определено, что значение коэффициента поглощения волновых пакетов, созданных ударными действиями на пласт в поверхностных условиях в менилитовых отслоениях нефтяных месторождений, равно 0,047 м⁻¹ [5].

Дополнительные исследования проведены на этом же месторождении, с целью уточнения коэффициента поглощения различных спектральных составляющих волновых пакетов показали, что значение коэффициента поглощения для диапазона частот 50 - 80 Гц с наибольшей интенсивностью колебаний равно 0,055 м⁻¹. Указанное подтверждается экспериментальными данными приведенными в [17] для поверхностных условий. В таком случае для пластовых условий согласно [17, табл. 2.1] принимаем коэффициент $k \lambda = 0,63$ дБ. Учитывая, что для частоты 50 Гц длина волны в терригенном коллекторе равна 80 м, коэффициент поглощения для этой частоты будет равным $k = \frac{0,63}{80 \cdot 8,686} = 10^{-3}$ м⁻¹.

Теоретические исследования проводились по следующим направлениям:

1. Определение интенсивности колебаний, создаваемых гидравлическим генератором в скважине, необходимой для получения в терригенном коллекторе интенсивности 0,01 Вт/см² на расстоянии не менее 100 м от генератора.

2. Определение значений градиентов давления, которые создаются вследствие прохождения волновых пакетов упругих колебаний в пластовой среде и оценка суммарного градиента давления необходимого для изменения фильтрации в пласте.

Исследование акустических воздействий на МЗП с целью повышения нефтеизвлечения из пластов проводились с привлечением понятий градиентов давления. Такой подход диктуется тем, что средние размеры участков нефтяного месторождения, которые находятся в зоне действия скважинных генераторов, не превышают длины волн упругих колебаний, создаваемых генераторами в МЗП.

Для расчетов принимались следующие данные:

– частота заполнения волнового пакета равна 50 Гц (гармоника из спектрального разложения волнового пакета с наибольшей энергией колебаний) (рис. 2);

– длительность импульса принималась $t_i = 0,1$ с;

– период повторения импульсов $T = 0,1$ с.

В таком случае, учитывая, что период повторения импульсов является равным длительности импульсов, значение интенсивности волновых пакетов упругих колебаний I_i будет равным среднему значению интенсивности I_c .

Учитывая то, что нижняя часть насосно-компрессорных труб вместе с гидравлическим генератором представляет собой линейный излучатель упругих колебаний значительной длины, принимаем в первом приближении, что указанный излучатель генерирует цилиндрическую волну.

Поэтому для оценки интенсивности колебаний на входе в пласт, необходимой для получения интенсивности $0,01$ Вт/см² на расстоянии 100 м можно использовать выражение для определения изменения интенсивности цилиндрической волны с расстоянием [18]:

$$I_c = \frac{I_0}{x} \cdot e^{-2kx}; \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{I_c \cdot x}{e^{-2 \cdot k \cdot x}} = \frac{0,01 \cdot 100}{e^{-2 \cdot 10^{-3} \cdot 100}}, \quad (5)$$

где I_0 , I_c – соответственно, значения интенсивности колебаний последовательности волновых пакетов на входе в пласт и на расстоянии 100 м от скважины в Вт/см²; k – коэффициент поглощения для диапазона частот 50-80 Гц; x – расстояние между точками определения интенсивности волновых пакетов в пласте, м.

После вычислений получаем $I_0 = 1,221$ Вт/см².

Для оценки интенсивности колебаний в скважине, необходимой для создания на входе в пласт $I_0 = 1,221$ Вт/см², воспользуемся следующими аргументами:

1. Прохождение энергии упругих колебаний через систему обсадная колонна-цементное кольцо является весьма значительным в связи с тем, что длины волн, создаваемые гидравлическим генератором в обсадной колонне и цементном кольце, существенно больше толщины слоев металла и цемента.

2. В связи с этим часть обсадной колонны в зоне действия гидрогенератора является генератором упругих колебаний, акустической нагрузкой которого является насыщенная пластовая среда (учитывая близость акустических характеристик цементного камня и пласта-песчаника).

Исходя из указанного, и учитывая результаты исследований прохождения упругих колебаний из скважины в пласт [2], оцениваем интенсивность колебаний на входе в пласт на уровне 0,6 от акустической мощности генератора.

Как известно, мощность, создаваемая гидравлическими скважинными устройствами, может быть определена по значениям перепада давления на устройстве и количеством рабочей жидкости, проходящей через устройство в единицу времени согласно выражению [19]:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta P}{600} \cdot \eta, \quad (6)$$

где: N – мощность гидрогенератора, кВт; ΔP – перепад давлений, бар; Q – расход жидкости, которую требует гидравлическое устройство, л/мин; η – коэффициент полезного действия устройства.

Максимальный перепад давления на гидрогенераторе типа ГКП-56, созданного фирмой «Интекс», составляет 4 МПа при расходе рабочей жидкости 340 л/мин. Таким образом, гидравлическая мощность, создаваемая генератором, составляет 16 кВт. Коэффициент преобразования гидравлической энергии в акустическую для генератора ГКП-56 составляет 18,3 %, отсюда акустическая мощность генератора равна 2,93 кВт. Внутренняя площадь перфорированной обсадной колонны в зоне максимальной интенсивности колебаний, создаваемых ГКП-56, составляет 350 см². Интенсивность колебаний в скважине, в таком случае, равна 8,37 Вт/см², а интенсивность колебаний на входе в пласт, учитывая потери акустической энергии при переходе из жидкой среды скважины в пласт при коэффициенте прохождения акустической энергии 0,6, можно принять равной 5 Вт/см².

Указанные расчеты подтверждают возможность создания в пласте на расстоянии 100 м от скважинного гидрогенератора интенсивности упругих колебаний 0,01 Вт/см².

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что воздействие на МЗП необходимо проводить на значительно меньших частотах, чем на ПЗП в связи с поглощением упругих колебаний в пористой среде пласта. Степень поглощения зависит от частоты колебаний, распространяющихся в пористой среде пласта. С помощью программы SpectraPLUS 5.0 сравнивая амплитуды спектральных составляющих волновых пакетов на различных расстояниях от точки ударной нагрузки пласта установлено, что в пласте-песчанике наименее поглощаются колебания сейсмического диапазона частот 1 - 80 Гц. На расстоянии более 2 м для оценки физических явлений в пористом пространстве пласта при прохождении упругих колебаний, необходимо учитывать поглощение спектральных высокочастотных составляющих волновых пакетов и постепенную трансформацию сложного волнового поля созданного волновыми пакетами в ПЗП в поле квазигармонических упругих колебаний низких частот (рис. 1).

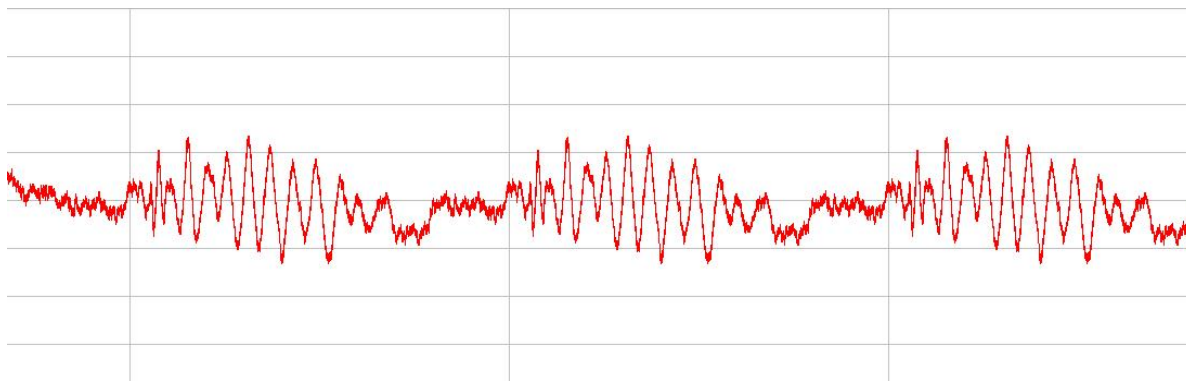


Рис. 1. Последовательность волновых пакетов упругих колебаний на расстоянии 50 м от точки ударной нагрузки пласта в программе SpectraPLUS

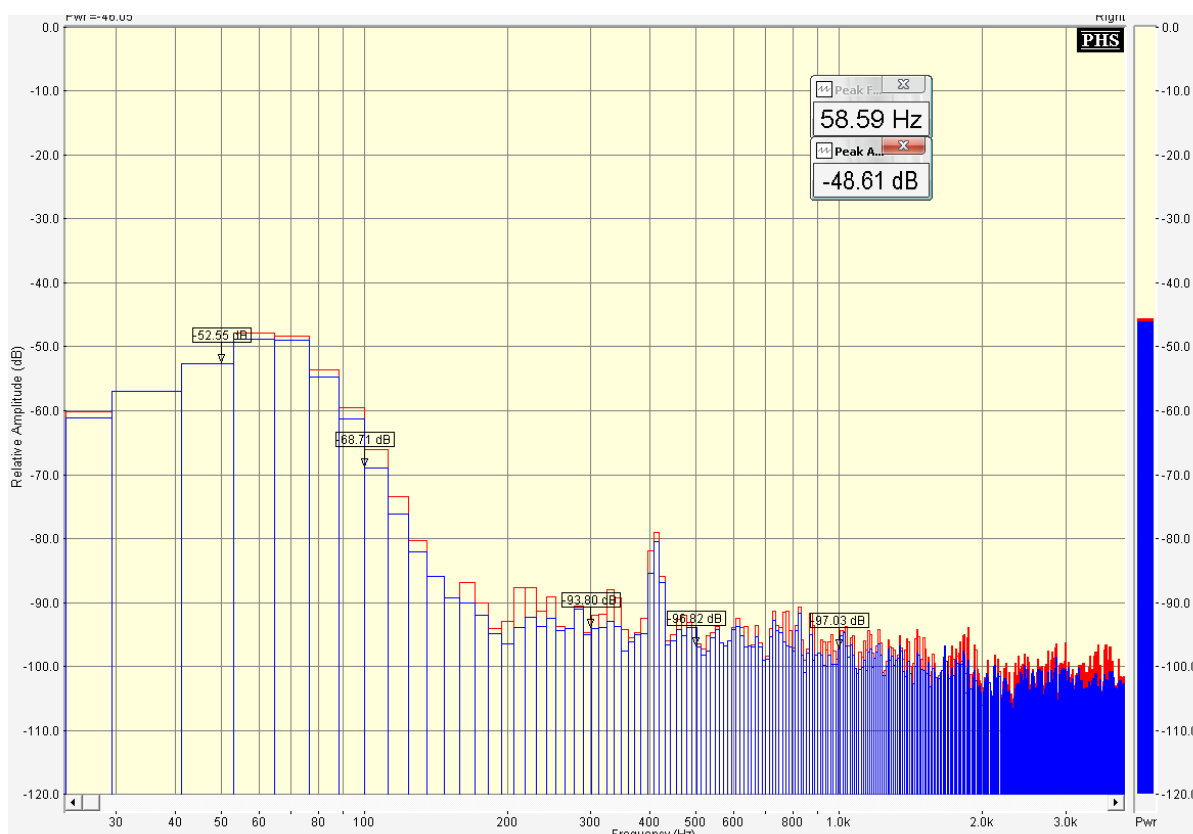


Рис. 2. Спектр волнового пакета упругих колебаний на расстоянии 50 м от точки ударной нагрузки пласта в программе SpectraPLUS

Определим знакопеременный градиент давления, создаваемый в пласте в результате прохождения волновых пакетов упругих колебаний со средним значением интенсивности равным $I_c = 0,01$ Вт/см². Принимаем (рис. 2), что основная энергетическая составляющая волнового пакета сосредоточена в гармонике 50 Гц.

Зная из [20] связь интенсивности и амплитуды переменного давления $I = P^2/2\rho c$, находим градиент давления, который образуется при прохождении упругой волны:

$$\text{grad } P_d = \frac{4P}{\lambda} = 4 \frac{\sqrt{2\rho c I}}{c/f} = f \sqrt{\frac{32\rho I}{c}}, \quad (7)$$

где P – амплитуда переменного звукового давления, Па; $\text{grad } P_d$ – градиент давления, который создается в результате прохождения волновых пакетов упругих колебаний, Па/м; ρ – средняя плотность насыщенной горной породы, кг/м³; c – скорость распространения продольной упругой волны, м/с; λ – длина упругой волны, м; f – частота гармоника, Гц.

Учитывая, что средняя плотность насыщенной горной породы $\rho = 2450$ кг/м³, а скорость распространения продольной упругой волны в скелете породы $c = 4000$ м/с [2], получим значение знакопеременного $\text{grad } P_d$ для гармоника 50 Гц равным:

$$\text{grad } P_d = 50 \sqrt{\frac{2450 \cdot 0,01 \cdot 10^4}{4000}} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Па/м.}$$

Исследования А.Х. Мирзаджанзаде показали, что при нарушении закона Дарси в нижней границе жидкость проявляет неньютоновские свойства, а предельный градиент давления, который тратится на преодоление динамического напряжения сдвига τ_0 , для ряда нефтяных месторождений находится в пределах 1,2 - 15 кПа/м [21].

Произведем оценку существующего в пласте градиента давления при отсутствии волнового воздействия на пласт. Перепад пластового и забойного давлений примем равным $\Delta P = 5$ МПа, а расстояние от скважины до контура питания $L = 1000$ м.

В таком случае $\text{grad } P_c = \Delta P/L = 5 \cdot 10^6/1000 = 5 \cdot 10^3$ Па/м.

Знакопеременные градиенты давления, как в фазе расширения, так и в фазе сжатия приводят к уменьшению вязкости пластового флюида [14], что равноценно снижению предельного градиента давления, необходимого для преодоления динамической напряжения сдвига τ_0 .

Таким образом, в первом приближении, для оценки суммарного градиента давления, которое создается в пласте при прохождении волнового пакета, можно просуммировать значения знакопеременного градиента давления и существующего в пласте градиента. В нашем случае:

$$\text{grad } P_{\text{сумм}} = \text{grad } P_d + \text{grad } P_c = 7,2 \text{ кПа/м.}$$

Следовательно суммарное действие существующего градиента давления и градиента давления, создаваемого в пласте результате прохождения упругой волны, позволит преодолеть предельный градиент давления и ввести в разработку

значительную часть малоподвижных зон нефти, образующиеся в пластах при падении пластового давления.

Оценим влияние упругих колебаний на водонефтяной контакт для случая использования на месторождении режима ППД и появления в пластах застойных зон нефти омываемых пластовой водой.

Вследствие прохождения волновых пакетов упругих колебаний со средним значением интенсивности I_c в пластовых условиях наблюдаются зоны сжатия и растяжения, переменное давление которое возникает при этом оценивается по известной формуле [20]:

$$P = \sqrt{2 \rho c I_c}, \quad (8)$$

где P – амплитуда переменного давления, Па; I_c – средняя интенсивность упругих колебаний, Вт/м²; c – скорость распространения продольной упругой волны, м/с; ρ – средняя плотность насыщенной горной породы, кг/м³.

Преодоление капиллярных сил образованных на границе фаз нефть-вода возможно при выполнении неравенства $P_k \leq P$.

Оценим значение амплитуды переменного давления:

$$P = \sqrt{2 \rho c I} = \sqrt{2 \cdot 2450 \cdot 4000 \cdot 0.01 \cdot 10^4} = 44,3 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Принимая, что среднее значение радиуса пор составляет $r = 10$ мкм, а поверхностное натяжение на границе раздела нефть-вода составляет $\sigma = 27$ мН/м [21], получим значение капиллярного давления [16]:

$$P_k = \frac{2 \sigma}{r} = \frac{2 \cdot 27 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 5,4 \cdot 10^3 \text{ Па;} \quad (9)$$

где P_k – капиллярное давление, Па; σ – поверхностное натяжение на границе раздела нефть-вода, мН/м; r – среднее значение радиуса пор, м.

Расчеты показывают, что переменное давление, создаваемое при прохождении волновых пакетов, позволит преодолеть капиллярное давление и ввести в разработку омываемые пластовой водой зоны нефти.

Исходя из вышеизложенного наиболее целесообразным для воздействия на МЗП является применение гидравлических генераторов с частотой повторения импульсов давления 1 - 50 Гц, поскольку на расстояниях больших чем 2 м от оси скважины основными частотами упругих колебаний, наименьше поглощающимися пластом, будут колебания в диапазоне частот 1 - 50 Гц. Интенсивность колебаний на входе в пласт должна быть не менее 1,2 Вт/см² для создания в пласте условий изменения процессов фильтрации на расстояниях не менее 100 м от скважинного генератора.

Как показывают расчеты, такая интенсивность может быть достигнута при перепаде давления на гидрогенераторе в 4 МПа и расходе рабочей жидкости 340 л/мин.

Литература

1. Горбачев Ю.И. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений // Каротажник. 2000. Вып. 60. С. 55 - 67.
2. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. С. 37.
3. Кудинов В.И., Сучков Б.М. Методы повышения производительности скважин. Самара, 1996. 414 с.
4. Браммер Ю.А. Пащук И.Н. Импульсная техника. М.: Высшая школа, 1965. С. 8.
5. Бажалук Я.М., Карпаш О.М., Климишин Я.Д., Гутак О.І., Бажалук В.Я. Дослідження акустичних властивостей менілітових відкладів // Нафтогазова енергетика. 2008. №4. С. 53 - 56.
6. Крутин В.Н. Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов // Каротажник. 1998. Вып. 42. С. 46 - 53.
7. Горбачев Ю. И. Физико-химические основы ультразвуковой очистки призабойной зоны нефтяных скважин // Геоинформатика. № 3. 1998. С. 7 - 12.
8. Методы неразрушающих испытаний. Под редакцией Р. Шарпа. М.: Мир, 1972. 470 с.
9. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учебник для вузов. М.: Энергия, 1969. 442 с.
10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: ГИФМЛ, 1959. 608 с.
11. Патент UA 63412 E21B43/25. Спосіб обробки приви́бійної зони пласта / Бажалук Я.М., Чістяков В.І. Опубліковано 25.07.07, Бюл. № 11.
12. Николаевский В.Н., Степанова Г.С, Ненартович Т.Л., Ягодов Г.Н. Ультразвук определяет отбор нефти при вибросейсмическом воздействии на пласт // Нефтяное хозяйство. 2006. №1. С. 48 - 50.
13. Воронова Е.В. Результаты применения виброударных и вибросейсмических технологий повышения нефтеотдачи на месторождениях Урало-Поволжья // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. № 2. 5 с.
URL: http://www.ogbus.ru/authors/Voronova/Voronova_2.pdf
14. Сургучев М. Л., Кузнецов О. Л., Симкин Э. М. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействие на нефтяные пласты. М., Недра, 1975. С. 77.
15. Патент 87872 UA. IPC E 21B43/25. Спосіб розробки нафтового родовища із неоднорідними по проникності пластами/ Бажалук Я.М., Карпаш О.М., Крижанівський Є.І., Бакулін Є.М., Яворський М.М. Опубліковано 25.08.2009, Бюл. № 16, 2009.

16. Бажалук Я.М., Карпаш О.М., Климишин Я.Д., Гутак О.І., Худін М.В., Бажалук В.Я., Михайлюк В.Д. Оцінка ефективності імпульсно-хвильових дій на процеси нафтовитискання у пласті // Нафтогазова енергетика. 2008. №2. С. 5 - 10.
17. Р. Шерифф, Л. Гелдарт Сейсморазведка. М., Мир, 1987. С. 116.
18. Ризниченко Ю.В. Сейсморазведка слоистых сред. Москва, Недра, 1985, С. 162.
19. Х. Экснер, Р. Фрейтаг, Р. Ланг и др. Гидропривод. Основы и компоненты. г. Эрбах, Бош Рексрот АГ, 2003. С. 92.
20. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд. иностранной литературы, 1956. С. 15 - 17, 25.
21. Бойко В.С., Бойко Р.В. Підземна гідрогазомеханіка: Підручник. Львів: Апріорі, 2005. С. 282 - 314.

OIL PRODUCTION INCREASE DUE TO FORMATION STIMULATION WITH THE HELP OF MECHANICAL OSCILLATIONS TRAIN

Bazhaluk Y.M.¹, Karpash O.M., Klymyshyn Y.D., Gutak A.I., Hudin N.V.

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, Ukraine*

e-mail: ¹yaropolkbazhaluk@gmail.com

Abstract. *One of the promising areas of research in improving oil recovery from reservoirs is the study of influence of mechanical oscillations train. Studies of the effect of mechanical oscillations in the tight oil zones for increase of oil recovery rate are at their early stages. Aim of this paper is the theoretical and experimental research of the mechanical wave effect at different frequencies on oil-water mixture filtration in the borehole zone and interwell zone, which results in increase of oil well productivity and oil recovery factor at oil fields.*

Keywords: *mechanical oscillations, filtration, oil, frequency, intensity*

References

1. Gorbachev Yu.I. Akusticheskoe vozdeistvie i povyshenie rentabel'nosti razrabotki neftyanykh mestorozhdenii (Acoustic impact and improving profitability of oil field development), *Karotazhnik*, 2000, Issue 60, pp. 55 - 67.
2. Kuznetsov O.L., Efimova S.A. Primenenie ul'trazvuka v neftyanoi promyshlennosti (Application of ultrasound in oil industry). Moscow, Nedra, 1983. P. 37.
3. Kudinov V.I., Suchkov B.M. Metody povysheniya proizvoditel'nosti skvazhin (Methods to improve well productivity), 1996. 414 p.
4. Brammer Yu.A. Pashchuk I.N. Impul'snaya tekhnika (Pulse engineering). Moscow, Vysshaya shkola, 1965. P. 8.
5. Bazhaluk Ya.M., Karpash O.M., Klimishin Ya.D., Gutak O.I., Bazhaluk V.Ya. Doslidzhennya akustichnikh vlastivostei menilitovikh vidkladiv (Investigation of acoustic properties of menilite deposits), *Naftogazova energetyka*, 2008, Issue 4, pp. 53 - 56.
6. Krutin V.N. Mekhanizm akusticheskoi intensifikatsii pritokov nefiti iz produktivnykh plastov (The mechanism of acoustic stimulation of oil influx from the producing formation), *Karotazhnik*, 1998. Вып. 42. С. 46 - 53.
7. Gorbachev Yu.I. Fiziko-khimicheskie osnovy ul'trazvukovoi ochistki prizaboinoi zony neftyanykh skvazhin (Physico-chemical basis of ultrasonic cleaning bottom-hole zone of oil wells), *Geoinformatika*, Issue 3, 1998, pp. 7 - 12.
8. Metody nerazrushayushchikh ispytaniy (Methods of nondestructive testing). Ed.: R. Sharp. Moscow, Mir, 1972. 470 p.
9. Atabekov G.I. Osnovy teorii tsepei. Uchebnik dlya vuzov (Fundamentals of the circuit theory: the textbook for high schools). Moscow, Energiya, 1969. 442 p.

10. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike (Handbook of mathematics). Moscow, GIFML, 1959. 608 p.
11. Patent 63412 UA. IPC E21B43/25. Sposib obrobky pryvybijnoi' zony plasta (Method of processing near-wellbore formation zone) / Bazhaluk Ja.M., Chistjakov V.I. Publ. 25.07.07.
12. Nikolaevskiy V.N., Stepanova G.S., Nenartovich T.L., Yagodov G.N. Ul'trazvuk opredelyaet otbor nefti pri vibroseismicheskom vozdeistvii na plast (The ult-rasound determines an oil withdrawal at vibroseis bed stimulation), *Neftyanoe khozyaistvo – Oil Industry*, 2006, Issue 1, pp. 48 - 50.
13. Voronova E.V. Rezul'taty primeneniya vibroudarnykh i vibroseismicheskikh tekhnologii povysheniya nefteotdachi na mestorozhdeniyakh Uralo-Povolzh'ya (Results of vibroimpact and vibroseismic technologies application for petrofeedback increase at deposits of the Ural-Volga region), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business"*, 2006, Issue 2, 5 p.
URL: http://www.ogbus.ru/authors/Voronova/Voronova_2.pdf
14. Surguchev M.L., Kuznetsov O.L., Simkin E.M., Gidrodinamicheskoe, akusticheskoe, teplovoe tsiklichesкое vozdeistvie na neftyanye plasty (Hydrodynamic, acoustic, thermal cycling impacts on oil reservoirs). Moscow: Nedra, 1975. p. 77.
15. Patent 87872 UA. IPC E 21B43/25.Sposib rozrobky naftovogo rodovyshha iz neodnorodnykh po pronyknosti plastamy (Oil field development method with heterogeneous permeability layers) / Bazhaluk Ja.M., Karpash O.M., Kryzhanivskiy Je.I., Bakulin Je.M., Javors'kiy M.M. Publ. 25.08.2009.
16. Bazhaluk Ja.M., Karpash O.M., Klymyshyn Ja.D., Gutak O.I., Hudin M.V., Bazhaluk V.Ja., Myhajljuk V.D. Ocinka efektyvnosti impul'sno-hvyl'ovykh dij na procesy naftovytyskannja u plasti (Evaluation of pulsed-wave action on the processes of oil displacement in reservoir), *Naftogazova energetyka*, 2008, Issue 2, PP. 5 - 10.
17. R.E. Sheriff, L.P. Geldart. Seismorazvedka. Moscow, Mir, 1987. P. 116. (Transl. from: R.E. Sheriff, L.P. Geldart. Exploration Seismology. Cambridge University Press, 1985.).
18. Riznichenko Yu.V. Seismorazvedka sloistykh sred (Seismic exploration of layered media). Moscow, Nedra, 1985. P. 162.
19. Kh. Eksner, R. Freitag, R. Lang et al. Gidroprivod. Osnovy i komponenty (Hydraulic power drive systems. Fundamentals and components). Bosch Rexroth Bosch Group, 2003. P. 92.
20. Bergman L. Ul'trazvuk i ego primeneniye v nauke i tekhnike (Ultrasound and its application in science and technology). Moscow, Izd. inostrannoi literatury, 1956. PP. 15 - 17, 25.
21. Bojko V.S., Bojko R.V. Pidzemna gidrogazomehanika: Pidruchnyk (Underground hydromechanics. Tutorial). L'viv, Apriori, 2005. PP. 282 - 314.