

А.Г. ГУРИН, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";
С.П. МОСТОВОЙ, канд. физ.-мат. наук, НТУ "ХПИ";
В.В. ПИДАШОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ";
О.Н. ЯРМАК, ведущий инженер, НТУ "ХПИ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ГЛУБОКИХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Для увеличения притока нефти в статье рассмотрена возможность формирования направленных сейсмоакустических импульсов электрогидравлическими разрядами в обсадной колонне нефтяной скважины. Для эффективного действия этих импульсов на нефтеносный пласт показана необходимость согласованности частотных характеристик обсадной колонны и акустического импульса.

Для збільшення притоку нафти у статті розглянута можливість формування направлених сейсмоакустичних імпульсів електрогидравлічними розрядами в обсадній колоні нафтової свердловини. Для ефективного дії цих імпульсів на нафтоносний пласт показана необхідність узгодженості частотних характеристик обсадної колонни та акустичного імпульсу.

For improvement in flow of oil in article consider possibility forming direction of seismoacoustic impulses electrohydraulic discharge in plant pipe oil well. For effective use force to influence this impulse on oil bearing strata put on necessity co-ordination frequency plant pipe and acoustic impulse.

Актуальность проблемы. Одним из приоритетных направлений перспективного развития нефтегазового комплекса Украины является внедрение новых технологических процессов интенсификации добычи нефти из действующих скважин. Наряду с традиционными методами (использование пароциклической обработки, поверхностно-активных веществ и др.) [1], все чаще используются воздействия акустических импульсов большой мощности, создаваемых электрогидравлическими устройствами, размещаемыми в зоне коллектора обсадной колонны. Создаваемая при этом волна давления позволяет очищать перфорационные отверстия, влиять на ближайшее затрубное пространство, увеличивая приток нефти.

Применение того или иного способа воздействия на малобежитные скважины связано с необходимостью детального изучения остаточных запасов в зоне работы скважины, установления амплитуды и спектра воздействующего акустического импульса, согласование его параметров с частотными характеристиками зоны "коллектор - окружающая среда" и с последующим длительным воздействием на нефтеносный пласт импульсом с полученными оптимальными характеристиками.

Предварительное изучение геологической структуры нефтеносного

района проводится с поверхности земли традиционными для сейсморазведки методами отраженных волн (МОВ), общей глубинной точки (МОГТ) и др. [2]. С увеличением глубины скважины до 5÷7 км амплитуда отраженного сигнала снижается, ухудшая разрешенность изучения структуры пласта. Усилить отраженный от пласта сигнал можно путем создания направленного излучения со скважины в зоне коллектора. Применение распределенной по высоте коллекторной зоны антенной решетки, состоящей из нескольких электрогидравлических излучателей, позволяет управлять направлением излучения и усиливать отраженный сигнал от нефтеносного слоя.

Особенностью направленного излучения со скважины является наличие перфорированной стальной обсадной колонны, которая оказывает свое влияние на амплитуду и спектр зондирующего акустического импульса.

Постановка задачи. В данной статье рассмотрены вопросы получения направленного акустического излучения со скважины на глубинах 5÷7 км. Для решения этой задачи необходимо было разработать математическую модель колебаний обсадной трубы, определить спектр частотных колебаний с перфорационными отверстиями и без них, зону распространения акустического импульса по металлической трубе при условии исключения влияния на последующие излучатели.

Решение этих задач позволяет определить параметры излучателя и генератора высоковольтных импульсов напряжения в условиях высоких внутрипластовых давлений [3].

Математическая модель колебаний обсадной трубы. Для составления математической модели колебаний обсадной трубы с учетом упругих колебаний ее стенки воспользуемся принципом, изложенным в работах [3-5].

Сделаем ряд допущений: труба представляется упругим объектом; во время подачи ударного импульса ось трубы совершает продольно-угловые колебания, а стенки – упругие колебания; закрепление трубы в грунте консольное.

Так как подаваемый ударный импульс однократного действия, то будем рассматривать затухающие колебания.

Рассмотрим консольно закреплённую трубу, которая под действием внешнего воздействия совершает сложные колебания: продольно - угловые и упругие колебания стенок.

Эти колебания описываются рядом дифференциальных уравнений, при составлении которых необходимо учитывать, что масса трубы и действующее внешнее воздействие распределяются по её длине.

Продольно - угловые колебания трубы описываются дифференциальным уравнением:

$$I_o \ddot{\varphi}(t) - \int_0^l m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = F(x,t), \quad (1)$$

где $y(x,t)$ – отклонение точек оси канала трубы от недеформируемого состояния; x – координата соответствующей точки отклонения; $\ddot{\varphi}(t)$ – обобщённая координата, характеризующая угловые ускорения трубы; $m(x)$ – погонная масса трубы; I_o – момент инерции трубы относительно места закрепления; l – длина трубы; $F(x,t)$ – распределённое по длине трубы внешнее возмущение.

Функция $y(x,t)$, входящая в уравнение, удовлетворяет уравнению колебаний упругой балки:

$$m(x)\ddot{\varphi}(t) + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \zeta EI(x) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial^4 x \partial t} = F(x,t), \quad (2)$$

где $I(x)$ – изгибная жёсткость трубы; E – модуль продольной упругости 1 рода; ζ – коэффициент внутреннего демпфирования материала трубы.

Функцию $y(x,t)$ можно представить в виде:

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n A_i(t), \quad (3)$$

где n – число учитываемых форм упругих колебаний ствола; $A_i(t)$ – амплитуды упругих колебаний стенок трубы.

Подставим (1), (2) и (3):

$$I_o \ddot{\varphi}(t) - \sum_{i=1}^n \ddot{A}_i(t) \int_0^l m(x) dx = F(x,t); \quad (4)$$

$$m(x)\ddot{\varphi}(t) + m(x) \sum_{i=1}^n (x) \ddot{T}_i(t) + EI(x) \sum_{i=1}^n (x) T_i(t) + \zeta EI(x) \sum_{i=1}^n (x) \dot{A}_i(t) = F(x,t), \quad (5)$$

где $\ddot{T}_i(t)$ – обобщенная координата, характеризующая ускорения стенок трубы; $\dot{A}_i(t)$ – обобщенная координата, характеризующая скорости упругих колебаний стенок.

Обе части (5) проинтегрируем в пределах от 0 до l :

$$\begin{aligned} & \ddot{\varphi}(t) \int_0^l m(x) dx + \sum_{i=1}^n \ddot{A}_i(t) \int_0^l m(x) dx + \\ & + E \sum_{i=1}^n A_i(t) \int_0^l I(x) dx + \zeta E \sum_{i=1}^n \dot{A}_i(t) \int_0^l I(x) dx = \int_0^l F(x,t) dx. \end{aligned} \quad (6)$$

С учётом ортогональности собственных форм упругих колебаний

дифференциальные уравнения продольно-угловых колебаний трубы и упругих колебаний стенок трубы (1) и (2) принимают вид:

$$\begin{aligned} & I_o \ddot{\varphi}(t) - \ddot{A}_j(t) \sum_{i=1}^n \int_0^l m(x) dx = F(x,t); \\ & \ddot{\varphi}(t) \int_0^l m(x) dx + \ddot{A}_j(t) \int_0^l m(x) dx + \zeta \dot{A}_j(t) E \int_0^l I(x) dx + \\ & + A_j(t) E \int_0^l I(x) dx = \int_r^{r+l} F(x,t) dx \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, исходя из постановки задачи, для определения частотных характеристик излучателя из уравнений (7) необходимо знать параметры колебаний трубы $\varphi(t)$ и $A(t)$.

Компьютерное моделирование процесса излучения. Реализация способа возбуждения направленного акустического воздействия на нефтяной пласт на уровне коллектора описан [6] и осуществляется следующим образом. На группу излучателей от многоканального генератора подаются импульсы напряжения с интервалом времени Δt . Это позволяет управлять диаграммой направленности излучения и при одновременном санировании со скважины и с поверхности земли получить максимальную амплитуду отраженного сигнала, регистрируемого сейсмоприемниками. За счет изменения параметров импульса тока изменяют спектр излучаемых колебаний, а регулируя зарядное напряжение емкостного накопителя – их амплитуду.

Проверка возможностей данного способа была реализована с помощью компьютерного моделирования. Полная виртуальная обработка на ЭВМ позволяет уже на раннем этапе выявить возможные проблемы или ошибки при создании установки.

Для компьютерной реализации и визуализации полученных результатов предлагается использовать программу Solid Works 2009 с пакетом инженерного анализа Cosmos Works. В данных программах можно построить 3-х мерные модели необходимых элементов, а также провести все необходимые исследования по сейсмоакустическому воздействию излучателей на нефтеносный пласт.

На первом этапе следует создать модели колонны с перфорационными отверстиями и без них, модель участка пласта, который исследуется, с учётом основных физико-механических свойств их материалов. Обсадная труба – углеродистая сталь, участок грунта – песчаник.

Затем необходимо задать действующие нагрузки, а именно: исследования предлагается проводить на глубинах 3, 5 и 7 км. На этих глубинах действуют пластовые давления 22, 36 и 50 МПа соответственно. Для того чтобы обеспечить ударное воздействие на пласт, нужно превышать указанные величины давлений, т.е. следует обеспечить импульс давления от

излучателя минимум 51 МПа. Величину импульса предлагается задавать до 60 МПа с шагом 1 МПа.

3-х мерные модели трубы и грунта с приложенными нагрузками приведены на рис. 1 и 2.

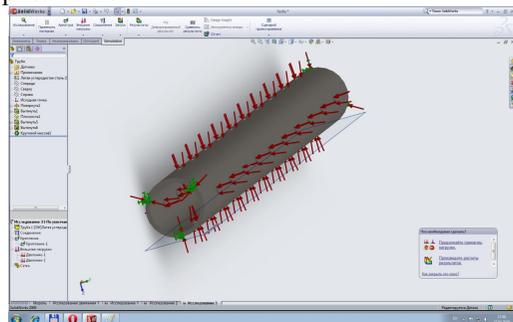


Рис. 1 – Модель обсадной трубы с приложенными внешними и внутренними нагрузками

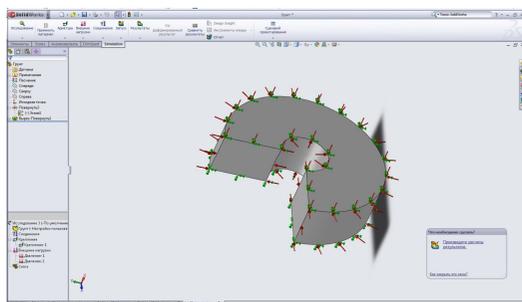


Рис. 2 – Модель исследуемого участка грунта с приложенными внешними и внутренними нагрузками

Для определения частотных характеристик излучателя необходимо учитывать только пластовые давления на указанных глубинах, т.к. определив параметры трубы и грунта без учета источника импульса давления, можно будет подобрать соответствующие частоты излучателя.

В программе Cosmos Works проводится исследование моделей. В первую очередь нас интересуют продольно-угловые колебания трубы и упругие колебания стенки, максимальные длины распространения колебаний грунта под действием импульсов давлений со значениями, предложенными выше, а также частотные параметры трубы и грунта, необходимые для определения характеристик излучателя. Причем, максимальные длины распространения колебаний грунта под воздействием импульсов давлений нас интересуют в 2-х случаях: когда импульс давления создается в цельной трубе, т.е. её стенка является сплошным излучателем, а так-

же, когда давление создается в трубе с перфорационными отверстиями, т.е. каждое отверстие фактически можно рассматривать как самостоятельный поршневой излучатель.

В результате серии опытов получаем зависимости, приведенные на рис. 3 - 5.

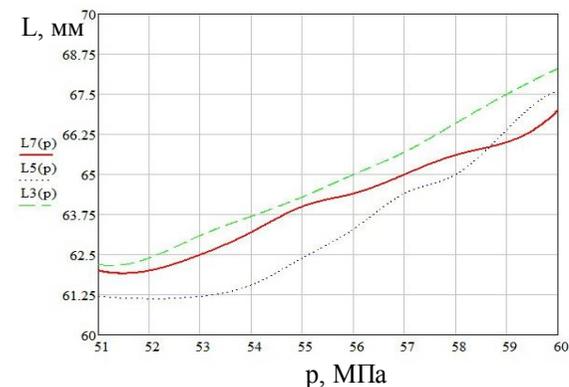
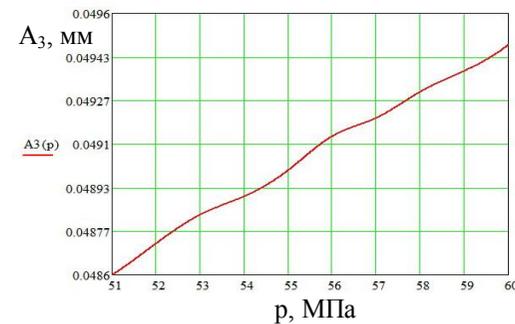


Рис. 3 – Максимальные расстояния от центра разряда, на котором затухают продольно-угловые колебания трубы при длительности фронта акустического импульса давления 5 мкс

На рис. 3 сплошная кривая соответствует максимальной длине распространения продольно-угловых колебаний по трубе в [мм] на глубине 7 км при различных значениях импульса давления p [МПа]; кривая из совокупности точек - максимальной длине продольно-угловых колебаний трубы в [мм] на глубине 5 км; пунктирная - максимальным длинам продольно-угловых колебаний трубы в [мм] на глубине 3 км.



а)

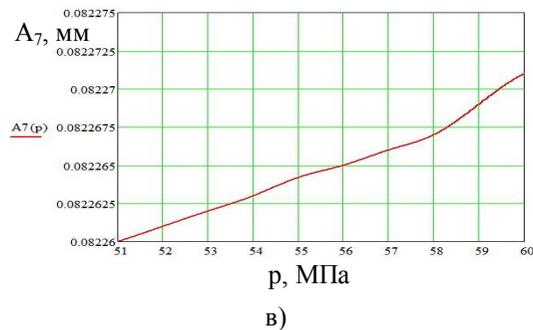
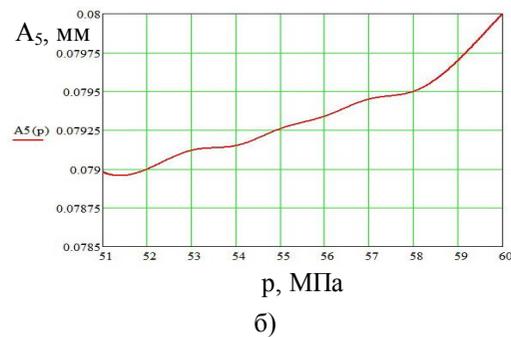


Рис. 4 – Амплитуды упругих колебаний стенки обсадной трубы [мм] при различных импульсах давления: а) – на глубине 3 км; б) - на глубине 5 км; в) - на глубине 7 км

Полученные результаты позволяют определить количество одиночных электрогидравлических излучателей на длине перфорированного коллектора обсадной колонны. При длине коллектора $2 \div 3$ м по расчетным данным можно установить линейную антенную решетку, состоящую из $8 \div 10$ разрядников.

Для определения длительности действия такого излучателя направленного действия были определены амплитуды упругих колебаний стенки обсадной трубы в зоне коллектора на различных глубинах. На рис 4 приведены результаты расчета колебаний на границе раздела сред "стальная колонна – упругая среда" без учета перфорационных отверстий.

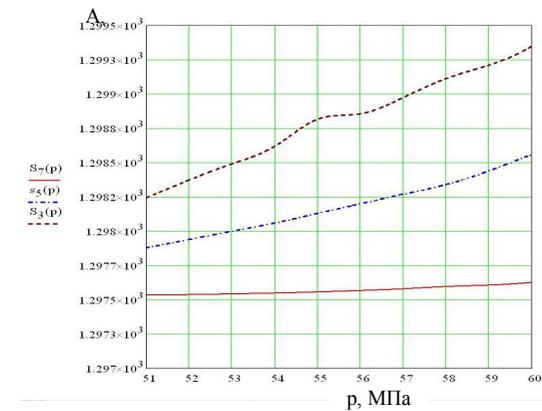


Рис. 5 – Максимальные длины распространения колебаний в грунте при различных импульсах давления

На рис. 5: сплошная кривая - максимальная длина распространения колебаний в грунте в [м] на глубине 7 км при различных значениях импульса давления p [МПа]; точка-пунктир - максимальная длина распространения колебаний в грунте в [м] на глубине 5 км; пунктирная кривая - максимальная длина распространения колебаний в грунте в [м] на глубине 3 км.

На приведенных выше зависимостях рассмотрен идеальный случай, когда частотные характеристики грунта, обсадной трубы и излучателя импульса давления совпадают. Для достижения поставленной задачи, т.е. определения частотных характеристик излучателя, импульсом давления следует пренебречь. Необходимо получить частотные характеристики трубы и грунта только с учетом воздействия пластового давления. Зная частотные характеристики, а именно резонансные частоты обсадной трубы и характеристики грунта, можно будет подобрать и частотные характеристики излучателя.

Для этого проводятся исследования, аналогичные описанным, только без учета импульсов давлений 51 – 60 МПа. Получаем резонансные частоты трубы $f_{mp}(h)$ и грунта $f_{sp}(h)$ на разных глубинах h , приведенные на рис. 6-7.

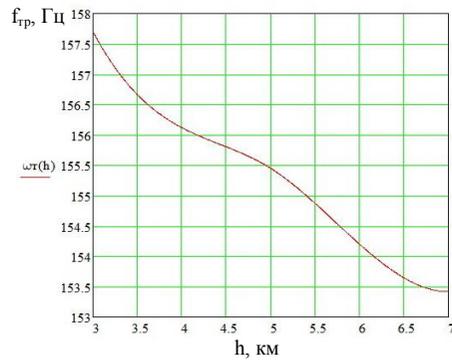


Рис. 6 – Резонансные частоты обсадной трубы на глубинах 3-7 км

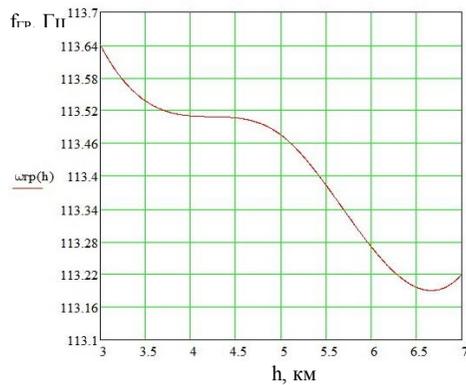


Рис. 7 – Резонансные частоты грунта на глубинах 3-7 км

излучения электрогидравлического разряда с достаточно низкочастотными резонансными частотами колонны и окружающей среды может быть разрешена путем создания специальных акустических преобразователей большой мощности и требует дополнительных исследований.

Список литературы: 1. *Загивный Э.А.* Перспективы использования комплексов для повышения нефтеотдачи пластов с тяжелой высоковязкой нефтью / Э.А. Загивный, А.Е. Козярук, В.И. Маларев, Е.Е. Мельникова // *Электротехника*. – 2010. – №2. – С. 9 – 15. 2. *Федынский В.В.* Разведочная геофизика. Геофизические методы исследования земной коры и разведки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1967 - 269 с. 3. *Гурин А.Г.* Сейсморазведочный комплекс излучателей для мониторинга запасов нефти и интенсификации ее добычи из действующих скважин / А.Г. Гурин, С.П. Мостовой, В.В. Пидашов, О.Н. Ярмак // *Вісник НТУ "ХП"*. Зб. наук. праць. Тем. випуск "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів". - Х.: НТУ "ХП". - 2010. - №55. - С. 23 – 32. 4. *Александров Е.Е.* Колебания в транспортных машинах / Е.Е. Александров и др. – К.: ВИПОЛ, 1996. – 256 с. 5. *Вибрации в технике: Справочник в 6 т.* / Ред. В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1980. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф.М. Диментберга, 1980. – 544 с. 6. Пат. 40339, Україна, МПК Е 21В 43/16. Спосіб інтенсифікації видобутку нафти / А.Г. Гурин, С.П. Мостовой, О.М. Ярмак.- № u2008 08662. Заявлено 01.07.2008. Опубл. 10.04.2009, Бюл. №7.- 3 с.

Поступила в редколлегию 20.01.11

Выводы. 1. Рассмотрена математическая модель формирования направленного излучения группы электрогидравлических излучателей, размещенных внутри обсадной колонны. Получены резонансы частоты колебаний обсадной колонны на глубинах 3÷7 км, которые составляют 153÷157 Гц, и резонансные частоты затрубного пространства - 113÷114 Гц, что позволяет рассчитать параметры разрядника и разрядного контура для максимального согласования и передачи колебаний колонны окружающей среде.

2. Показана возможность создания направленного излучения в зоне коллектора при времени ввода энергии в разрядный промежуток порядка 5 мкс.

3. Противоречивость требований согласования высокочастотного