

**А.Г. ГУРИН**, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков  
**С.П. МОСТОВОЙ**, канд. физ.-мат. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков  
**В.В. ПИДАШОВ**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ", Харьков  
**Н.С. ЯРМАК**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ", Харьков

## **СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ НЕФТИ И ИНТЕНСИ- ФИКАЦИИ ЕЕ ДОБЫЧИ ИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН**

В статті розглянуто сейсмоакустичний комплекс для підвищення дебіту діючих свердловин шляхом одночасної дії на продуктивний пласт поверхневими та свердловинними випромінювачами електродинамічного та електрогідрравлічного типів. Запропоновано перед цим визначати запаси нафти у районі колектора свердловини сейсмоакустичним методом, шляхом сканування засвердловинного простору направленим випромінюванням.

В статье рассмотрен сейсмоакустический комплекс для повышения дебита действующих скважин путем одновременного действия на продуктивный пласт поверхностными и скважинными излучателями электродинамического и электрогидравлического типов. Предложено перед этим определять запасы нефти в районе коллектора скважины сейсмоакустическим методом, путем сканирования заскваженного объема направленным излучением.

**Введение.** В настоящее время все больше внимания уделяется интенсификации добычи нефти из действующих скважин путем акустического воздействия на продуктивный пласт электрогидравлическими, электродинамическими, взрывными методами [1-4] как с поверхности земли, так и со скважин. Это позволяет увеличить приток нефти в зону коллектора. Однако, при этом не проводится контроль остаточных запасов в околоскважинном пространстве, отсутствует предварительное изучение согласования спектра излучаемых ударных импульсов в затрубное пространство зоны коллектора. В статье предлагается для этих целей использовать сейсмоакустический комплекс, включающий поверхностные электродинамические излучатели направленного действия в сочетании с электрогидравлическими излучателями направленного действия, расположенными в обсадной колонне. Это позволяет, кроме перечисленных работ при обслуживании скважины, проводить доразведку запасов нефти, выбирать необходимый режим акустической обработки скважины. Преимущество данного способа акустической обработки нефтяного пласта заключается в том,

что наряду с использованием поверхностных излучателей сейсмических колебаний направленного действия, в скважине располагаются излучатели на глубине исследуемого пласта. Возможность разместить в скважине излучатели позволяет усилить отраженный импульс, т.е. значительно повысить разрешенность полученных сейсмограмм, а их расшифровка позволяет установить амплитуду и спектр акустического сигнала, воздействующего на пласт. Это даст возможность усилить отраженный сигнал от нефтеносного пласта и при расшифровке сейсмограмм получить уточненные сведения о наличии запасов нефти в районе расположения скважины, после чего проводить процесс ее обработки акустическим сигналом, согласованным с механическими параметрами скважины.

Существующие методы интенсификации добычи нефти с помощью электрофизических установок основаны на создании условий акустического воздействия на продуктивный пласт с поверхности земли или с действующих нефтяных скважин.

Применение поверхностных излучателей связано с разработками в 1980-1990 годы мощных электродинамических устройств для сейсмического просвечивания Земли, поиска нефтяных месторождений на больших глубинах [5-8]. Работы ИФЗ АН РФ и Сибирского отделения ВЦ АН РФ показали возможность интенсифицировать приток нефти в действующие скважины при слабых воздействиях на продуктивный пласт. Сильное затухание акустического сигнала в верхних слоях земного полупространства вызывает необходимость увеличивать мощность поверхностных излучателей или создавать излучающие устройства, работающие в скважинах на глубине расположения коллектора.

Большой объем исследований по использованию электрогидравлического эффекта выполнен в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины, где проведены научно-исследовательские работы по изучению стабильности разряда в глубоких скважинах, разработаны методики экспериментальной оценки эффективности излучающих устройств по амплитуде импульса давления, сообщаемого стенкам разрядной камеры. На экспериментальном производстве института изготовлены электроразрядные погружные установки "Скиф-4М", "Скиф-100", "Скиф-140", с помощью которых проведена обработка нефтяных скважин на месторождениях Татарстана и Западной Сибири с целью повышения их дебита. Дальнейшее развитие устройства с электрогидравлическими и взрывными излучателями акустических импульсов получили в трудах А.А. Щербы и К.В. Дубовенко [1].

Недостатком проведенных работ является направленность их воздействия на стенки трубы в зоне коллектора с целью ее очистки от закупоривания илстыми веществами и продуктами бурения.

**Цель и задачи исследования.** В данной работе была поставлена цель, во-первых, изучить остаточный запас нефти в зоне коллектора, получить с помощью геофизических методов наибольший отраженный сигнал от продуктивного пласта путем излучения акустического сигнала, как с поверхности земли, так и со скважины. Затем, воздействовать на пласт акустическими импульсами с частотными параметрами, согласованными с ним. Если вопросы возбуждения направленного акустического излучения с поверхности земли изучены довольно широко, то направленное излучение со скважины требует дополнительного исследования [3]. Для исследования совместной работы поверхностных и скважинных излучателей был разработан сейсморазведочный комплекс, исследование отдельных элементов которого было проведено в лабораторных условиях [9].

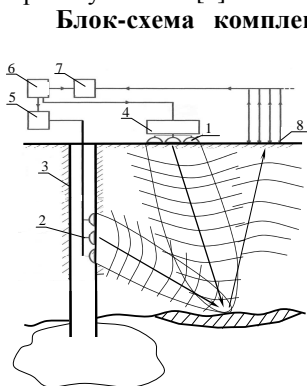


Рис. 1.

Он состоит из группы электродинамических поверхностных излучателей 1, расположенных на поверхности земли возле скважины, и электрогидравлических скважинных излучателей 2, расположенных вдоль внутренней стенки скважины 3 в зоне коллектора. Каждая группа излучателей срабатывает при подаче управляющих импульсов от многоканальных многоэлементные генераторов 4 и 5 импульсов тока, допускающих задержку каждого канала на время  $\Delta t$ . Микропроцессор 6 устанавливает изменение интервала  $\Delta t$  в зависимости от сейсмометрической информации, принятой сейсμοстанцией 7 от сейсμοприемников 8.

Работает комплекс следующим образом. С помощью группы излучателей 1, изменяя  $\Delta t$  их включения и регулируя амплитуду энергии излучения, достигают максимального значения отраженного сигнала от нефтенасыщенного пласта. Затем включают многоэлементный генератор импульсов тока 4, позволяющий подавать импульсы с задержкой  $\Delta t$  включения скважинных излучателей. Сканируя диаграммой направленности скважинных излучателей, добиваются усиления отраженного сигнала от исследуемого пласта. При положительной оценке наличия нефти работу излучателей переводят в стационарный режим сейсмаакустического влияния, что дает дополнительный приток нефти в коллекторную зону скважины.

**Определение параметров акустического импульса одиночного**

**излучателя поверхностного типа и работа группы излучателей в режиме направленного излучения.** Конструкция и схема включения электродинамического излучателя подробно описана [6]. При разряде конденсаторной батареи на электродинамический излучатель, состоящий из двух последовательно встречно включенных плоских катушек, или на электродинамический излучатель магнитоимпульсного типа, в котором одна из катушек заменена мембраной из электропроводного материала, позволяет получить широкий спектр акустических колебаний. На поверхности земли в диапазоне  $20 \div 200$  Гц, в водонефтяной смеси –  $0,1 \div 6,0$  кГц. Возможность изменять параметры разрядной цепи конденсаторной батареи и изменять схемы включения одиночных излучателей позволяют регулировать параметры акустического импульса, изменяя параметры импульса разрядного тока. Так как расчет тока в такой цепи затруднителен из-за большого числа нелинейных элементов, выполнить его можно по упрощенной "свернутой" схеме замещения. Процесс свертывания в данном случае возможен при следующих допущениях: сопротивления и индуктивности катушек излучателя намного превышают собственные индуктивности и сопротивления остальных элементов разрядной цепи и их значением можно пренебречь, длительность процесса разряда батареи намного превышает время пробега электромагнитной волны по кабельной ошиновке и ее можно заменить сосредоточенными параметрами. Тогда уравнение Кирхгофа для разрядной цепи будет иметь вид:

$$\frac{d\varphi}{dt} + R_{\Sigma} \cdot i(t) + \frac{1}{C_{\Sigma}} \int_0^t i(t) dt = 0. \quad (1)$$

Напряжение на конденсаторе уравнивается падением напряжения на активном сопротивлении контура  $R_{\Sigma}i$  и внутренней ЭДС  $\frac{d\varphi}{dt}$ . Величина  $\varphi$  отражает полное потокоцепление системы катушек излучателя. Учитывая, что

$$\varphi = \Phi(x, t) = L_{\Sigma}(x) \cdot i(t) \quad (2)$$

и то, что расстояние между катушками является функцией времени, уравнение примет вид:

$$L_{\Sigma}(x) \frac{di}{dt} + k_{CB} \frac{dx}{dt} i(t) + R_{\Sigma} i(t) + \frac{1}{C_{\Sigma}} \int i(t) dt = 0, \quad (3)$$

где  $k_{CB} = \frac{dL_{\Sigma}(x)}{dx}$ ;  $x$  - изменение расстояния между катушками при

электродинамическом взаимодействии.

Решение уравнения (3) сводится к решению нелинейного интегро-дифференциального уравнения при начальных условиях:

$$i(0) = 0; v_0(0) = v_c.$$

Так как частота разрядного тока намного выше частоты собственных колебаний механической системы, то изменением  $x$  при определении тока можно пренебречь. Тогда уравнение примет вид:

$$L_{\text{Э}}(x) \frac{di}{dt} + R_{\text{Э}} i(t) + \frac{1}{C_{\text{Э}}} \int_0^t i(t) dt = v_0. \quad (4)$$

Решение такого уравнения для случая  $R_{\text{Э}} < 2\sqrt{L_{\text{Э}}/C_{\text{Э}}}$  известно и имеет вид:

$$i(t) = \frac{v_0}{wL_{\text{Э}}(x)} e^{-\delta t} \sin wt, \quad (5)$$

где  $w = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{Э}}(x)C_{\text{Э}}} - \frac{R_{\text{Э}}^2}{4L_{\text{Э}}^2(x)}}; \delta = \frac{R_{\text{Э}}}{2L_{\text{Э}}(x)}.$

Значения параметрам уравнения (5) определим следующим образом. Так как одиночный излучатель представляет собой систему двух плоских (дисковых) катушек, индуктивность определяется как

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} w^2 \cdot d \cdot k_1, \quad (6)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $w$  - число витков катушки;  $d$  - средний диаметр витка;  $k_1$  - коэффициент, зависящий от отношения  $\rho/d$ ;  $\rho$  - ширина намотки катушки, мм;  $\rho = r/d$ .

Взаимоиндуктивность соосных одинаковых плоских катушек определяется как

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} w^2 \cdot d \cdot k_2, \quad (7)$$

где  $k_2$  - коэффициент, зависящий от соотношений  $\rho = r/d$  и  $\xi = x/d$ .

Значения коэффициентов для конкретных размеров катушек можно определить по методике, приведенной в [7].

Эквивалентное сопротивление в случае двух плоских катушек  $R_{\text{Э}} = R_1 + R_2 = 2R_1$  и  $R_1 = R_2$  при длительности импульса тока  $10 \div 20$  мс для прямоугольного провода можно определить без учета скин-эффекта как

$$R_1 = \rho l / S, \quad (8)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление меди, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  - длина провода намотки, м;  $S$  - сечение шины, мм<sup>2</sup>.

Протекание тока по двум последовательно встречно включенным катушкам вызывает импульс силы

$$F = i^2(t) \frac{dL_{\Sigma}}{dx}. \quad (9)$$

Если принять, что инертная масса, прижимающая катушки к грунту, намного больше массы подвижной катушки  $m$ , то уравнение движения этой массы в функции времени

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + kx(t) = \frac{b\nu_0^2}{L_{\Sigma}^2(x_0)\omega^2} e^{-\delta t} - \frac{b\nu_0^2}{L_{\Sigma}(x)\omega^2} e^{-\delta t} \cos \omega t, \quad (10)$$

где  $m$  - масса подвижной катушки с учетом присоединенной массы грунта;  $\eta$  - коэффициент, учитывающий рассеивание излучаемой энергии в виде продольных, поперечных и поверхностных волн сжатия;  $k$  - коэффициент жесткости грунта;  $b$  - коэффициент, учитывающий изменение эквивалентной индуктивности системы "катушка-катушка" при перемещении подвижной катушки относительно условной поверхности грунта,  $b = \frac{dL_{\Sigma}}{dx}$ .

Совместное решение уравнений, учитывающих электрические и механические процессы, получим в виде суммы общих и частных решений уравнений (4) и (10):

$$x(t) = C_1 e^{\alpha t} \cos \beta t + C_2 e^{\alpha t} \sin \beta t + C_3 e^{-\alpha t} + e^{-\alpha_1 t} (C_4 \cos 2\omega t + C_5 \sin \omega t), \quad (11)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  - постоянные коэффициенты, определяемые методом неопределенных коэффициентов.

**Получение направленного излучения группы излучателей.** С целью определения возможности создания направленного излучения были исследованы групповые источники (от 1 до 4) одиночных излучателей. Существующие теории допускают линейную суперпозицию отдельных волновых полей, когда излучаемая энергия эквивалентна сумме независимых излучателей [3, 8]. Коэффициент направленности излучения группового источника определяется как отношение плотности энергии на градус излучения в главном направлении к среднему значению плотности излучаемой энергии:

$$D(\theta, \varphi, f) = \frac{E(\theta, \varphi, f)}{E(f)/4\pi}. \quad (12)$$

Для наиболее простого случая двух идентичных излучателей с частотным спектром акустического импульса  $A(f)$ , находящихся на расстоянии  $d$ , плотность излучаемой энергии определяется как

$$E(f) = \frac{16\pi}{\rho c} \left[ \int_0^{+\infty} |A(f)|^2 df + \int_0^{\infty} |A(f)|^2 \frac{\sin(2\pi f d/c)}{2\pi f d/c} df \right], \quad (13)$$

где  $E(\theta, \varphi, f)$ ,  $E(f)$  - плотность энергии излучения и ее среднее значение в направлении излучения;  $A(f)$  - частотный спектр акустического сигнала электродинамического источника;  $d$  - расстояние между излучателями, м;  $c$  - скорость распространения акустической продольной волны в среде.

Если излучение колебаний одиночного источника в группе осуществляется с некоторым временным запаздыванием, то в пространстве формируется коническая волна, ограниченная двумя полусферами. В этом случае прожекторная зона акустической волны давления наклонена под углом, равным наклону фронта волны. Строго определенная ориентация сейсмических лучей в пространстве за пределами прожекторной зоны волны предопределяет свойства группового источника по выделению волн с учетом направления их распространения. Благодаря этому свойству можно направлять возбуждаемые колебания в тех направлениях, откуда предусматривается регистрация полезных волн. Экспериментально определено, что при размещении излучателей на дневной поверхности полупространства наиболее эффективные расстояния 10÷15 м, при которых четкость записи и подавление поверхностных волн максимально.

Для получения направленного излучения со скважины необходимо исключить влияние ударного импульса каждого излучателя на срабатывание последующего, т.е. установить расстояние между излучателями по глубине.

#### **Формирование направленного излучения в зоне коллектора.**

Для составления дифференциальных уравнений колебаний трубы необходимо сделать 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 закрепленную трубу, которая под дейст-

вием внешнего воздействия совершает сложные колебания: продольно - угловые и упругие колебания стенок.

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

Продольно-угловые колебания трубы описываются дифференциальным уравнением:

$$I_o \ddot{\phi}(t) - \int_0^l m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = F(x,t), \quad (14)$$

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

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

$$m(x)\ddot{\phi}(t) + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \zeta EI(x) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial^4 x \partial t} = F(x,t), \quad (15)$$

где  $I(x)$  – изгибная жесткость трубы;  $E$  – модуль продольной упругости 1 рода;  $\zeta$  – коэффициент внутреннего демпфирования материала трубы;

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

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n T_i(t), \quad (16)$$

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

Подставим (1), (2) и (3):

$$I_o \ddot{\phi}(t) - \sum_{i=1}^n \ddot{T}_i(t) \int_0^l m(x) dx = F(x,t); \quad (17)$$

$$m(x)\ddot{\phi}(t) + m(x) \sum_{i=1}^n (x) \ddot{T}_i(t) + EI(x) \sum_{i=1}^n (x) T_i(t) + \zeta EI(x) \sum_{i=1}^n (x) \dot{T}_i(t) = F(x,t), \quad (18)$$



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

Обе части (18) проинтегрируем в пределах от 0 до  $l$ :

$$\begin{aligned} & \ddot{\phi}(t) \int_0^l m(x) dx + \sum_{i=1}^n \ddot{T}_i(t) \int_0^l m(x) dx + \\ & + E \sum_{i=1}^n T_i(t) \int_0^l I(x) dx + \zeta E \sum_{i=1}^n \dot{T}_i(t) \int_0^l I(x) dx = \int_0^l F(x, t) dx. \end{aligned} \quad (19)$$

С учетом ортогональности собственных форм упругих колебаний уравнения продольно-угловых и упругих колебаний трубы (14) и (15) принимают вид:

$$\begin{aligned} & I_o \ddot{\phi}(t) - \ddot{T}_j(t) \sum_{i=1}^n \int_0^l m(x) dx = F(x, t); \\ & \ddot{\phi}(t) \int_0^l m(x) dx + \ddot{T}_j(t) \int_0^l m(x) dx + \zeta \dot{T}_j(t) E \int_0^l I(x) dx + \\ & + T_j(t) E \int_0^l I(x) dx = \int_r^{r+l} F(x, t) dx \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (20)$$

Решение этого уравнения позволило определить длину участка

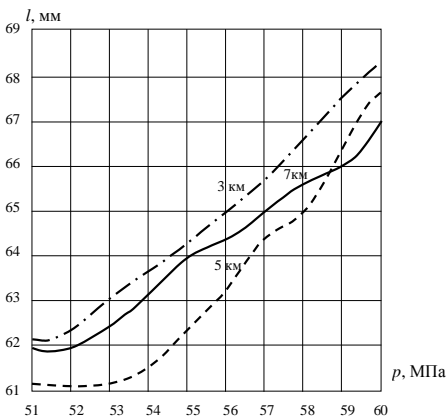


Рис. 2.

трубы, на котором происходит затухание колебаний от воздействия одиночного электрогидравлического разряда. При амплитуде ударного импульса близкого к пластовому давлению и длительностью фронта порядка 5 мкс длина колеблющегося участка составляет не более 7 см от центра удара (рис. 2).

При временах задержки  $\Delta t$  между одиночными разрядами от  $10^2$  до  $10^3$  мкс

этого расстояния достаточно, чтобы исключить влияние разрядов в распределенной по длине коллектора группе излучателей при формировании направленного воздействия на пласт.

**Выводы.** 1. Рассмотрена возможность создания сейсмоакустического комплекса направленного действия для воздействия на нефтеносный пласт как с поверхности земли, так и со скважины с целью повышения притока нефти в зону коллектора.

2. С целью повышения эффективности акустического воздействия предложено первоначально определить с помощью комплекса остаточные запасы нефти известными методами сейсморазведки, а затем воздействовать на пласт направленным излучением со спектром частот, при котором получен максимальный отраженный сигнал.

3. Показано, что для создания направленного излучения со скважины при длине коллектора 2÷3 м длительность ударного импульса при электрогидравлическом разряде должна быть порядка 7÷10 мкс.

**Список литературы:** 1. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швец И.С., Онищенко Л.И. Разрядно-импульсное оборудование для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Тем. вып. "Электроэнергетика и преобразовательная техника". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2002. - №7. - Т. 1. - С. 96-103. 2. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С. Электроразрядная обработка скважин и пути повышения ее эффективности // Изв. Вузов. Сер. "Нефть и газ". - 2002. - №4. - С. 4-12. 3. Колосов В.М. Применение приповерхностных источников возбуждения при остронаправленном излучении сейсмической энергии в нижнее полупространство // Использование приповерхностных источников в сейсморазведке. - Саратов, 1987. - С. 32-38. 4. Гурин А.Г. Автоматизированные системы формирования мощных сейсмических сигналов на базе электродинамических источников // Тр. МНТК "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье", 12-14 мая 1997 г. - Харьков-Мишкольц, 1997. - Ч. 5. - С. 251-253. 5. Гурин А.Г. Мостовой С.П., Ярмак О.Н. и др. Особенности формирования импульса давления в зоне коллектора обсадной колонны нефтяной скважины при действии электрогидравлического разряда // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2009. - № 27. - С. 47-54. 6. Видря А.В., Гонтар Ю.Г., Гурин А.Г., Ярмак О.М. Застосування методу електромеханічних аналогій для розрахунку параметрів імпульсу тиску електродинамічного поверхневого випромінювача сейсмічних коливаль // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2009. - №44. - С. 25-42. 7. Мостовой С.П., Бяков Ю.А., Гурин А.Г. О выборе элементов электродинамических фазированных антенных решеток // Труды НТК "Комплексные геолого-геофизические исследования мирового океана", 1988. - С. 67-68. 8. Хораз И.И. Групповые управляемые источники упругих волн в сейсморазведке. - Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1984. - 272 с. 9. Пат. 40339, Україна, МПК Е 21В 43/16. Спосіб інтенсифікації видобутку нафти / А.Г. Гурин, С.П. Мостовий, О.М. Ярмак. - № u2008 08662. Заявлено 01.07.2008. Опубл. 10.04.2009. – Бюл. №7. - 3 с.

*Поступила в редколлегию 24.09.10*