

**А.Г. ГУРИН**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. НТУ "ХПИ", Харьков  
**Ю.Г. ГОНТАРЬ**, магистр НТУ "ХПИ", Харьков  
**ШЕЙХИ АБУБАКЕР**, канд. техн. наук, ун-тет Эль-Мегреб  
**О.Н. ЯРМАК**, вед. инженер НТУ "ХПИ", Харьков

## **ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ СКВАЖИННЫЙ ВИБРАТОР**

В статті розглянута конструкція електродинамічного вібратора для збудження низькочастотних акустичних коливань у зоні перфорації колектора. Дані рекомендації щодо узгодження частотних характеристик випромінювача з навколишнім середовищем та вибору систем енергоспоживання.

В статье рассмотрена конструкция электродинамического вибратора для возбуждения низкочастотных акустических колебаний в зоне перфорации коллектора. Даны рекомендации по согласованию частотных характеристик излучателя с окружающей средой и выбору системы энергоснабжения.

**Введение.** Для повышения притока нефти в зону коллектора действующей скважины необходимо очистить перфорационные отверстия, создать с помощью акустических излучателей условия для вытока нефти из микротрещин близлежащих пород. Если первая задача успешно решается путем применения электрогидравлического эффекта [1, 2, 3], то вторая – более сложная – необходимо возбуждать поперечные волны в зоне 20 – 50 м от скважины. Излучающей поверхностью в данном случае служит зона перфорированной трубы коллектора, внутри которой располагается сам излучатель. Наиболее управляемым и простым в эксплуатации является электродинамический излучатель с магнитопроводом, получающим импульсы тока от конденсаторной батареи.

**Цель, задачи исследования.** При разработке погружного излучателя, работающего на глубине 5-7 км, необходимо решить несколько задач. Первая – частота излучаемых колебаний должна быть согласована с частотными характеристиками участка скважины в зоне коллектора. Вторая – амплитуда возбуждаемых колебаний должна быть достаточной для компенсации внешнего давления и упругих свойств колонны. Третья – необходимо иметь источник энергии, например, конденсаторную батарею с высокими массогабаритными, энергетически и тепловыми характеристиками.

В данной статье рассмотрено одно из решений рассматриваемой проблемы.

**Электродинамический вибратор.** Конструкция вибратора показана на рис. 1. Он смонтирован на стальной штанге 1 с магнитопроводом 2, в пазах которого расположена первичная силовая обмотка 3 и короткозамкнутые витки 4. Силовая обмотка залита в пазах магнитопровода эпоксидным компаундом и является неподвижной. Короткозамкнутые витки свободно располагаются в пазах и прижимаются к силовой обмотке оболочкой в виде резиновой трубы [4].

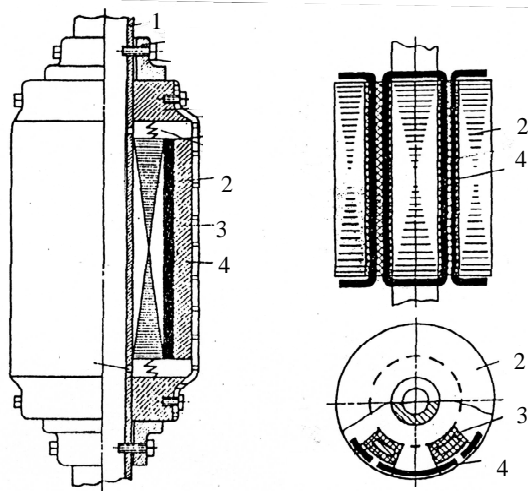


Рис. 1.

Работает вибратор следующим образом. При разряде конденсаторной батареи на силовую обмотку в магнитопроводе возникает магнитный поток, который индуцирует в короткозамкнутых витках вихревые токи. При взаимодействии основного магнитного потока с магнитным полем вихревых токов возникает силовое воздействие между силовой обмоткой и короткозамкнутыми витками. Под действием электродинамических сил короткозамкнутые витки свободно перемещаются в пазах и передают импульс давления через резиновую оболочку в окружающую среду. При расчетах такого излучателя с цилиндрической излучающей гибкой оболочкой, работающего на низких частотах, необходимо учитывать присоединенную к внешней оболочке

массу жидкости, которая играет значительную роль в определении резонансных свойств оболочки.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что для решения данной задачи может быть применен метод, предложенный в [4]. Задача формулируется следующим образом: дана круглая цилиндрическая натянутая (не имеющая изгибной жесткости) тяжелая оболочка, весьма тонкая по сравнению со своей длиной  $L$  и радиусом  $r_0$ . Оболочка располагается между двумя полубесконечными жесткими цилиндрами того же радиуса, составляющими вместе с покоящейся оболочкой бесконечный цилиндр, погруженный в жидкость. Изнутри на оболочку действует давление электродинамических сил и компенсирующее азимутальное стягивание оболочки при воздействии внешнего гидростатического давления, а со стороны жидкости на оболочку, кроме постоянного гидростатического давления, действует переменная составляющая (инерциальная реакция) давления жидкости.

При действии перечисленных сил на оболочку

$$h\tau \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0^2} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) - \mu h \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} + P_2(\varphi_1 z) - P_1(\varphi_1 z) = 0, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина оболочки;  $\tau$  – напряжение растяжений оболочки;  $\varepsilon$  – радиальное отклонение точек оболочки;  $\mu$  – плотность материала оболочки;  $z, r, \varphi$  – координаты оболочки;  $P_1(\varphi_1 z)$  – суммарное давление внутри оболочки;  $P_2(\varphi_1 z)$  – суммарное давление на оболочку со стороны жидкости, возникают ее колебания с собственной частотой:

$$\omega = C_0 \sqrt{\pi^2 l^2 - S^2 \frac{D^2}{r_0^2}} / L \sqrt{1 + \frac{8}{\pi^3} \frac{\rho}{\mu} \frac{t}{h} \lambda_i}, \quad (2)$$

где  $C_0 = \sqrt{\tau/\mu}$  – скорость поперечных волн на оболочке;  $L$  – длина

оболочки;  $D$  – диаметр трубы, м;  $l, S$  – нечетные числа;  $\lambda_i \cong \pi r_0 / L \sim 1$ .

При  $r_0 = 0,140$  м,  $L \sim 1,0$  м,  $\omega = 1200 \div 1400$  1/с.

**Система электроснабжения вибратора.** В качестве накопителя энергии для питания вибратора применена конденсаторная батарея с общей запасаемой энергией 200 Дж, которая располагается в скважине непосредственно с излучателем и тиристорным коммутатором. Заряд емкости происходит путем подачи на грузонесущий кабель марки КГ7-75-180 однополярных импульсов напряжения, что позволяет

отказаться от применения выпрямительной схемы внутри скважины. Основные параметры геофизического кабеля приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры геофизического кабеля.

Параметры кабеля	Основные соотношения	Расчетное значение на 1 жилу
1	2	3
Сопrotивление ТПЖ, $R_{ж}$ , Ом/км	$K_{20} = \frac{\rho \cdot L(1+l)}{F}$ <p><math>\rho</math> - удельное сопротивление меди при 20°C  (<math>\rho = 0,01724 \cdot 10^{-6}</math> Ом·м);  <math>F</math> - площадь поперечного сечения жилы;  <math>L</math> - длина кабеля, равная 1,0 км;  <math>l</math> - поправочный коэффициент на укрутку.</p>	23,45
Сопrotивление изоляции, $R_{из.}$ , ГОм/км	$R_{из.} = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$ <p><math>\rho</math> - удельное сопротивление материала изоляции;  <math>d</math> - диаметр неизолированной жилы;  <math>D</math> - диаметр изолированной жилы;  <math>l</math> - длина кабеля.</p>	18,67
Емкость ТПЖ. $C$ , Ф/км	$C = \frac{\varepsilon \cdot k_3}{18 \ln\left(\frac{D}{d_3}\right)}$ <p><math>\varepsilon</math> - диэлектрическая проницаемость изоляции;  <math>k_3</math> - коэффициент, учитывающий наличие воздушных промежутков (<math>k_3 = 0,8</math>);  <math>D</math> - диаметр по скрутке изолированных жил;  <math>d_3</math> - эквивалентный диаметр.</p>	$0,03 \cdot 10^{-6}$
Индуктивность жил кабеля, Гн/км	$L = \frac{\mu_0}{4\pi \cdot \ln\left(\frac{2q}{2R + \rho}\right)}$ <p><math>q</math> - радиус по скрутке изолированных жил;  <math>R</math> - радиус окружности, на которой расположены центры сечений жил;  <math>\rho</math> - радиус изолированной жилы</p>	$834 \cdot 10^{-6}$

Продолжение табл. 1.

1	2	3
<p>Масса кабеля, <math>M</math>, кг/км</p>	$M = M_{\text{ж}} + M_{\text{из}} + M_{\text{бр}};$ <p><math>M_{\text{ж}}</math> – масса медной проволоки токопроводящей жилы, <math>M_{\text{ж}} = F_{\text{ж}} \cdot \gamma_{\text{ж}} \cdot k_{\text{ск}} \cdot k_{\text{у}};</math></p> <p><math>F_{\text{ж}}</math> – площадь поперечного сечения жилы;</p> <p><math>\gamma_{\text{ж}}</math> – плотность меди (<math>\gamma_{\text{ж}} = 8,89 \text{ г/см}^3</math>);</p> <p><math>k_{\text{ск}}</math> – коэффициент укрутки жил (<math>k_{\text{ск}} = 1,007</math>);</p> <p><math>k_{\text{у}} = 1,03</math> – коэффициент укрутки проволок в жиле;</p> <p><math>M_{\text{из}}</math> – масса фторопласта на изоляцию,</p> $M_{\text{из}} = \pi(d + \delta) \cdot \delta \cdot \gamma_{\text{из}} \cdot k_{\text{ск}} \cdot k_{\text{ф}};$ <p><math>d</math> – внутренний диаметр по изоляции;</p> <p><math>\delta</math> – толщина изоляции, равная 1,1 мм;</p> <p><math>\gamma_{\text{из}}</math> – плотность фторопласта, равная 2,2 г/см<sup>3</sup>;</p> <p><math>k_{\text{ск}} = 1,007</math> – коэффициент укрутки жил в кабель;</p> <p><math>k_{\text{ф}}</math> – коэффициент, учитывающий увеличение массы из-за технологических и конструктивных факторов (<math>k_{\text{ф}} = 1,13</math>);</p> $M_{\text{бр}} = \sum M_{\text{бр}i} - \text{масса стальных проволок}$ $M_{\text{ад}i} = \left( \pi \cdot d_i^2 / 4 \right) \cdot n_i \cdot \gamma_{\text{ад}} \cdot k_{\text{ад}i};$ <p><math>d_i</math> – диаметр проволок <math>i</math>-повива брони;</p> <p><math>n_i</math> – количество проволок в <math>i</math>-повиве брони;</p> <p><math>\gamma_{\text{бр}} = 7,8 \text{ г/см}^3</math> – плотность материала брони;</p> <p><math>k_{\text{бр}i}</math> – коэффициент, учитывающий укрутку бронепроволок.</p>	459
<p>Удлинение кабеля, <math>\epsilon_{\text{к}}</math>, м/км</p>	$\epsilon_{\text{к}} = - \left( \frac{\pi d_0}{L} \right)^2 \cdot \frac{\Delta d_0}{d_0};$ <p><math>d_0</math> – средний диаметр повива брони кабеля;</p> <p><math>\frac{\Delta d_0}{d_0}</math> – относительное изменение диаметра;</p> <p><math>L</math> – длина кабеля.</p>	0,29

Наиболее благоприятным является режим частичного разряда конденсаторной батареи на силовую обмотку вибратора. Энергетически целесообразно применять режим работы, при котором длительность паузы между импульсами велика по сравнению с длительностью постоянной времени зарядной цепи. При  $\tau_{\text{п}} = \frac{T_{\text{п}}}{T_3} \geq 3$ , где  $T_{\text{п}}$  - длительность паузы;  $T_3$  - длительность време-

ни заряда, коэффициент полезного действия зарядного устройства может достигать до 48%. Данный метод заряда накопителя не является оптимальным, но позволяет значительно упростить зарядный блок конденсаторной батареи.

Особенностью данной конструкции является значительный вес вибратора, что приводит к дополнительному износу наружной поверхности кабеля. В [5] предложено учитывать этот износ через введение понятия эквивалентного диаметра проволок верхнего слоя кабеля при его спуске-подъеме и вибрации в процессе эксплуатации. Главным свойством эквивалентного слоя является идентичность его деформаций деформациям верхнего слоя проволоки.

### **Выводы.**

1. Для интенсификации притока нефти необходимо воздействовать на пласт акустическими импульсами с широким спектром частот. Наряду с высокочастотными составляющими, необходимо воздействовать и низкочастотными импульсами, которые могут распространяться в виде поперечных волн на значительные расстояния. Интенсивные высокочастотные воздействия обеспечивают очистку перфорационных отверстий, а низкочастотные – более энергоемкие, работая в резонансе с собственными колебаниями зоны коллектора и затрубного пространства, интенсифицируют приток нефти

2. Предложена конструкция низкочастотного вибратора, позволяющая создавать низкочастотные колебания в зоне коллектора нефтяных скважин в диапазоне 200÷300 Гц, что близко к резонансной частоте коллекторной зоны скважины. Конструкция вибратора позволяет равномерно распределить давление по всей длине зоны перфорации и обеспечить работу с необходимой частотой, незави-

симо от физико-химических параметров среды.

3. Применение в качестве источника акустических импульсов электродинамического преобразователя низкой частоты позволяет применить низковольтный накопитель энергии. Простая энергетическая схема зарядки накопителя энергии униполярными трапециидальными импульсами позволяет уменьшить массогабаритные показатели погружного оборудования, повысить его надежность

**Список источников информации:** 1. 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. 2. *Щерба А.А., Дубовенко К.В.* Высоковольтные электроразрядные компактные системы.- К: Наукова думка, 2008. - 269 с. 3. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. Под ред. Д.А. Бута. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 400 с. 4. *Рехтман В.И., Римский-Корсаков А.В.* Колебания натянутой цилиндрической оболочки // В. кн.: Колебания, излучение и демпфирование упругих структур. - М.: Изд-во "Наука", 1973. 5. *Деражне А.М., Кротов В.П.* Исследование показателей качества брони геофизических кабелей при определении степени износа их наружной поверхности // Электрическая промышленность. Сер. "Кабельная техника". - 1980. - Вып. 10 (108). - С. 5-6.

*Поступила в редколлегию 30.09.2009*