

Ш. Р. ГАЛЛЯМОВ, А. В. МЕСРОПЯН, М. О. МИТЯГИНА

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРА ПЕРФОРАЦИИ СВЕРЛЯЩЕГО ПЕРФОРАТОРА С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ**

Предложена математическая модель привода перфорации сверлящего перфоратора с электрогидравлической системой управления. Приведена принципиальная гидравлическая схема сверлящего перфоратора. *Вторичное вскрытие, кумулятивная перфорация, сверлящая перфорация, сверлящий перфоратор, принципиальная гидравлическая схема, математическая модель, математическая модель контура перфорации*

Основная задача вторичного вскрытия – создание совершенной гидродинамической связи между скважиной и продуктивным пластом без отрицательного воздействия на коллекторские свойства призабойной зоны пласта, без значительных деформаций обсадных колонн и цементной оболочки [1]. В настоящее время наибольший удельный вес при вторичном вскрытии пластов занимает кумулятивная перфорация, на ее долю приходится более 90% вскрытия пластов в России и за рубежом [2]. Несмотря на широкое распространение, кумулятивная перфорация имеет ряд существенных недостатков:

- оказывает разрушающее воздействие на цементное кольцо;
- у кумулятивных перфораторов отсутствует система центрирования, что приводит к некачественным отверстиям;
- имеется вероятность того, что не все кумулятивные заряды сработают;
- в терригенных породах от действия кумулятивной перфорации струи образуется стекло, что вызывает кольматацию пристволовой зоны скважины;
- система отверстий в эксплуатационной колонне неспособна включить в разработку максимальное количество флюидопроводящих каналов и зон дренирования [3].

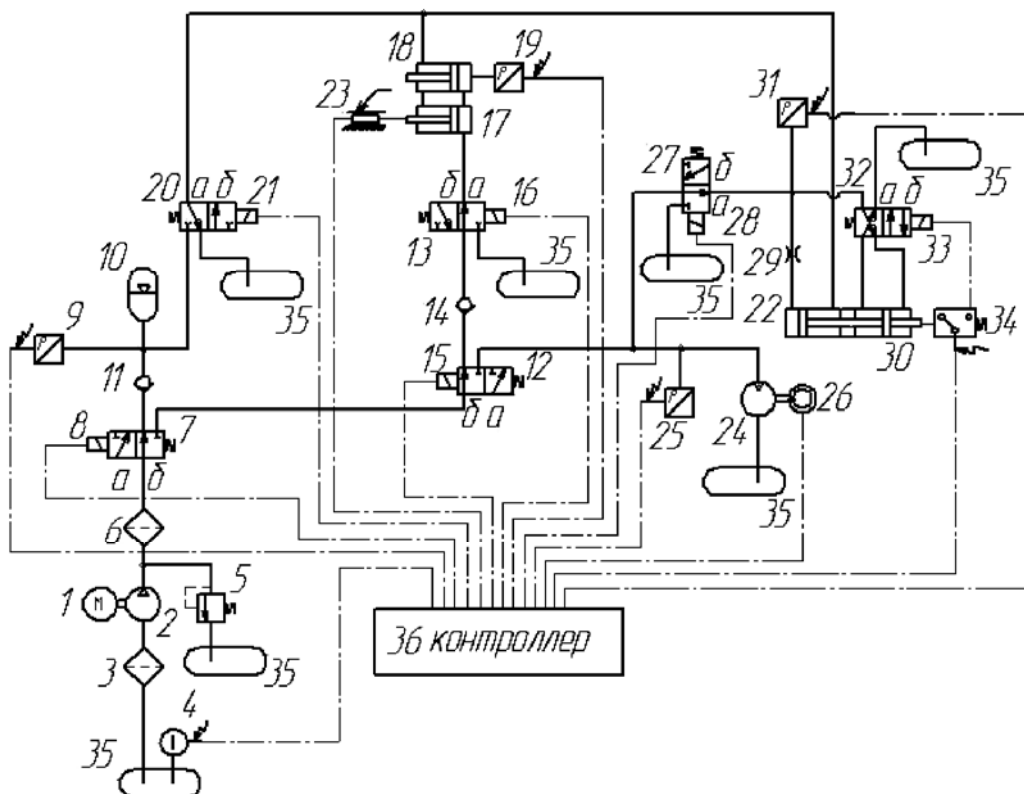
В связи с этим, наиболее перспективно применение сверлящей перфорации, преимущества которой заключаются в следующем:

- сверлящая перфорация производится в щадящем режиме, без разрушающего воздействия, характерного для кумулятивной перфорации, таким образом, сохраняется изолирующая способность цементного кольца, многократно возрастает длитель-

ность межремонтного периода работы скважин;

- более точное позиционирование перфорационных каналов в стволе скважины, их оптимальное пространственное расположение позволяют более точно прогнозировать возможные дебиты, назначать оптимальный режим эксплуатации скважины;
- отсутствие взрывчатых веществ значительно повышает безопасность работ;
- особенно эффективны сверлящие перфораторы при перфорировании продуктивных пластов небольшой толщины (до 15 м) и при близком расположении водоносных и продуктивных горизонтов (от 1,5–3 м до 15–20 м) или при эксплуатации переслаивающихся водонефтяных пластов – в таких условиях резко возрастает срок безводной эксплуатации [4].

Широкое применение сверлящей перфорации при проведении вторичного вскрытия пластов сдерживается в настоящее время отсутствием комплексных теоретических и экспериментальных исследований в этой области [5]. Жесткие требования, предъявляемые к габаритным показателям скважинных перфораторов, обуславливают необходимость использования серийного и оригинального гидрооборудования высокой компактности [6]. В результате влияние масштабного фактора в сочетании с широким диапазоном изменения гидростатического давления и температуры определяет сложный и неоднозначный характер физических и гидродинамических процессов, протекающих в проточной части при функционировании сверлящего перфоратора. Для описания и последующей оптимизации этих процессов разрабатывается математическая модель.



Принципиальная гидравлическая схема сверлящего перфоратора:

- 1 – электродвигатель; 2 – насос; 3, 6 – фильтры; 4 – датчик температуры; 5 – предохранительный клапан;  
 7, 12, 13, 20, 27, 32 – гидрораспределители; 8, 15, 16, 21, 28, 33 – электромагниты;  
 9, 19, 25, 31 – датчики давления; 10 – гидроаккумулятор; 11, 14 – обратные клапаны;  
 17, 18, 22, 30 – гидроцилиндры фиксации (2), подачи бура и перфорации соответственно;  
 23 – датчик перемещения; 24 – гидромотор; 26 – датчик частоты вращения; 29 – дроссель;  
 34 – реле давления; 35 – бак; 36 – контроллер

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРА ПЕРФОРАЦИИ

Принципиальная гидравлическая схема сверлящего перфоратора приведена на рисунке.

Математическое моделирование контура перфорации осуществляется при следующих допущениях:

1) используются гидрораспределители с одинаковыми гидравлическими параметрами и микрогеометрией;

2) давлением слива пренебрегаем ввиду его малой величины;

3) объемные потери в подводящих линиях в гидрораспределители и гидродвигатели малы, и ими пренебрегаем;

4) расчетная температура рабочей жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется:  $T = +50^\circ\text{C} = \text{const}$ ;

5) коэффициент расхода жидкости через гидрораспределители принимаем постоянный:  $\mu = 0,72$ ;

6) рабочая жидкость несжимаема, приведенный модуль упругости жидкости  $E = \text{const}$ ;

7) люфтами в силовой проводке исполнительных механизмов пренебрегаем;

8) зазор между корпусом перфоратора и обсадной колонной в точке перфорации отсутствует.

Математическая модель контура перфорации включает в себя:

• уравнение электрической цепи для гидрораспределителя управления гидроцилиндром перфорации:

$$U_{\text{ПЕР}} \cdot \sin(\omega \cdot t) = R_{\text{ПЕР}} \cdot i(t) + L_{\text{ПЕР}} \cdot \frac{di(t)}{dt} + K_{\text{ПЭ}} \cdot \frac{dx(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ПЕР}}$  – напряжение электрической цепи переменного тока, В;  $\sin(\omega \cdot t)$  – закон изменения напряжения электрической цепи переменного тока;  $R_{\text{ПЕР}}$  – активное сопротивление обмотки управления электромагнита, Ом;  $i(t)$  – функция силы тока в электрической цепи, А;  $L_{\text{ПЕР}}$  – индуктивность обмотки управления электромаг-

нита, Гн;  $K_{\text{ПЭ}}$  – коэффициент противоЭДС, В·с/м;  $x(t)$  – перемещение золотника, м;

• уравнение движения золотникового распределителя:

$$m_3 \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = K_{Fi} \cdot i(t) - F_{\text{ПР}} - F_{\text{ТР}_3}, \quad (2)$$

где  $m_3$  – масса золотника, кг;  $K_{Fi}$  – коэффициент силы тока, Н/А;  $F_{\text{ПР}}$  – сила пружины, действующая на золотник, Н;  $F_{\text{ТР}_3}$  – сила трения в паре трения «плунжер – гильза», Н.

Здесь:

$$F_{\text{ПР}} = c_{\text{ПР}} \cdot x(t), \quad (3)$$

где  $c_{\text{ПР}}$  – жесткость пружины распределителя, Н/м.

$$F_{\text{ТР}_3} = b_3 \cdot \frac{dx(t)}{dt}, \quad (4)$$

где  $b_3$  – коэффициент, учитывающий трение в паре трения «плунжер – гильза».

С учетом (3) и (4) получаем:

$$m_3 \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = K_{Fi} \cdot i(t) - c_{\text{ПР}} \cdot x(t) - b_3 \cdot \frac{dx(t)}{dt}; \quad (5)$$

• уравнение баланса расходов (гидроцилиндр перфорации и распределители):

$$\begin{aligned} & \mu \cdot B_z \cdot x(t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{\text{ПИТ}} - p_1(t))}{\rho}} \times \\ & \times \text{signum}(p_{\text{ПИТ}} - p_1(t)) = \\ & = A_{\text{ЭФ}_30} \cdot \frac{dy_{\text{П}}(t)}{dt} + \frac{W_{\text{ГЦ}_30}}{2 \cdot E} \cdot \frac{dp_1(t)}{dt}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \mu \cdot B_z \cdot x(t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_2(t))}{\rho}} \cdot \text{signum}(p_2(t)) = \\ & = A_{\text{ЭФ}_30} \cdot \frac{dy_{\text{П}}(t)}{dt} + \frac{W_{\text{ГЦ}_30}}{2 \cdot E} \cdot \frac{dp_2(t)}{dt}, \quad (7) \end{aligned}$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода жидкости,  $B_z$  – ширина щели золотника в гидрораспределителе 32, м;  $p_{\text{ПИТ}}$  – давление питания рабочей жидкости, подводящейся к распределителю 32, Па;  $p_{\text{СЛ}}$  – давление слива рабочей жидкости, отводящейся от распределителя 20, Па;  $p_1(t)$  – давление рабочей жидкости в правой полости гидроцилиндра перфорации 30 (поступающей от распределителя 32), Па;  $p_2(t)$  – давление рабочей жидкости в левой полости гидроцилиндра перфорации 30 (отводящейся от распределителя 32 на слив), Па;  $\rho$  – плотность

рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $A_{\text{ЭФ}_30}$  – эффективная площадь гидроцилиндра перфорации 30, м<sup>2</sup>;  $y_{\text{П}}(t)$  – перемещение поршня гидроцилиндра перфорации 30, м;  $W_{\text{ГЦ}_30}$  – объём рабочей жидкости в камере гидроцилиндра перфорации 30, м<sup>3</sup>;  $E$  – приведенный модуль упругости рабочей жидкости, Па;

• уравнение движения гидроцилиндра перфорации:

$$\begin{aligned} m_{\text{ГЦ}_30} \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = & A_{\text{ЭФ}_30} \cdot (p_1(t) - p_2(t)) - \\ & - R_{\text{ДИН}_30} - F_{\text{ДЕМП}_30}, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $m_{\text{ГЦ}_30}$  – масса гидроцилиндра перфорации 30, кг;  $A_{\text{ЭФ}_30}$  – площадь гидроцилиндра перфорации 30, м<sup>2</sup>;  $R_{\text{ДИН}_30}$  – динамическая нагрузка на гидроцилиндр перфорации 30, Н;  $F_{\text{ДЕМП}_30}$  – сила вязкого демпфирования в гидроцилиндре перфорации 30, Н.

Здесь

$$F_{\text{ДЕМП}_30} = b_{\text{ГЦ}_30} \cdot \frac{dy_{\text{П}}(t)}{dt}, \quad (9)$$

где  $b_{\text{ГЦ}_30}$  – коэффициент, учитывающий силу вязкого демпфирования в гидроцилиндре перфорации 30.

С учетом (25) получаем:

$$\begin{aligned} m_{\text{ГЦ}_30} \cdot \frac{d^2 y_{\text{П}}(t)}{dt^2} = & A_{\text{ЭФ}_30} \cdot (p_1(t) - p_2(t)) - \\ & - R_{\text{ДИН}_30} - b_{\text{ГЦ}_30} \cdot \frac{dy_{\text{П}}(t)}{dt}. \quad (10) \end{aligned}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные уравнения математической модели контура перфорации сверлящего перфоратора с электрогидравлической системой управления позволят рассчитать динамические характеристики перфоратора и оптимизировать в процессе отладки модели ряд конструктивных и технических параметров элементов и систем перфоратора.

Следует отметить, что математическое моделирование сверлящего перфоратора при расчете статических и динамических характеристик позволяет снизить сроки проектирования и объемы доводочных работ, рассчитать степень влияния эксплуатационных факторов на функционирование отдельных узлов и объекта в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологические основы освоения и глушения нефтяных и газовых скважин: учеб. для вузов / Ю. М. Басарыгини др. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 249 с.
2. Интенсифицирующая технология вторичного вскрытия пласта: НТВ Каротажник / С. П. Антанайтис и др. Тверь: АИС, 2007. Вып. 158.
3. Сравнение основных параметров щелевой и кумулятивной перфорации [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.perfokom.com/sravnenie-ru.html>.
4. ООО ПСКОВГЕОКАБЕЛЬ. Сверлящая перфорация [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.pskovgeokabel.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=53&Itemid=110](http://www.pskovgeokabel.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=110).
5. **Яруллин Р. К., Филиди Г. Н.** Об эффективности вскрытия пласта перфорацией: НТВ Каротажник Тверь: АИС, 1998. Вып. 49. С. 81–84.
6. **Овнатов Г. Т.** Вскрытие и обработка пласта М.: Недра, 1970. 310 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Галлямов Шамиль Рашитович**, ст. преп. каф. прикладной гидромеханики. Дипл. магистра по спец. «Энергомашиностроение» (УГАТУ, 2006), канд. техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. пневмогидросистем, разработки перспективной малогабаритной техники.

**Месропян Арсен Владимирович**, проф. той же каф. Дипл. инж.-механика (УГАТУ, 1996). Д-р техн. наук по гидромашинам и гидропневмоагрегатам (УГАТУ, 2010). Исследования в области гидроприводов систем управления ЛА и гидрофицированных систем испытаний и вскрытия нефтеносных пластов.

**Митягина Мария Олеговна**, магистрант той же каф. Дипл. бакалавра по гидравлической, вакуумной и компрессорной технике (УГАТУ, 2010). Готовит магистер. дис. в обл. проектирования гидроперфораторов с электрогидравлической системой для вторичного вскрытия пластов.