

Ш. Р. Галлямов

**ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТОИСПЫТАТЕЛЯ**

Представлена гидравлическая схема узла фиксации и расфиксации пластоиспытателя, результаты имитационного моделирования работы узла фиксации и расфиксации, результаты экспериментальных исследований узла фиксации и расфиксации. *Пластоиспытатель, модуль фиксации и расфиксации, математическая модель*

**ВВЕДЕНИЕ**

На современном рынке геофизических исследований существует достаточно большое количество зарубежных дорогостоящих приборов, которые позволяют выполнять комплексное исследование скважин во время разведочных работ. Большинство зарубежных приборов не продаются на рынке, разработчикам выгодно проводить сервисные услуги, так как они приносят более высокую прибыль.

Заказ исследования нефте- и газоносных пластов месторождений Российской Федерации зарубежным компаниям невыгоден. Использование отечественной аппаратуры сдерживается отсутствием на рынке приборов, не уступающих по своим функциональным возможностям зарубежной аппаратуре. В связи с этим в настоящее время актуальна задача разработки, испытания и внедрения в производство отечественного комплекса оборудования на кабеле, обеспечивающего точечное опробование пласта.

В условиях огромных нефтяных и газовых месторождений России с различными геологическими, пластовыми и скважинными условиями и состоянием стволов скважин и флюидов, широко применяются испытатели пластов на кабеле, которые дают возможность проводить измерения для построения профиля пластового давления, профиля подвижности пластового флюида, производить оценку характера насыщения, проводить глубинный анализ пластового флюида [1].

Понимание природы пластовых флюидов весьма важно для оптимизации заканчивания разработки месторождений. Давление насыщения и вязкость находятся среди тех параметров флюида, которые определяют экономическую целесообразность разработки месторождения. Глубинный анализ пластового флюида представляет собой эффективный инструмент для помощи в определении изменений композиционного состава и часто упускаемой расчленён-

ности разрабатываемых коллекторов. Отбор проб пластового флюида на раннем этапе разработки скважины предоставляет уверенность в наличии всех необходимых данных для планирования заканчивания и принятия решений. Это особенно важно для пластов с тяжёлыми составами нефти, где уверенность в стабильности притока является главной проблемой [2].

Учитывая вышесказанное, необходимо разработать аппаратуру модульной конструкции, позволяющую осуществлять с минимальными временными и материальными затратами перенастройку аппаратуры для работы на скважинах разных диаметров и глубин. В состав аппаратуры должна входить современная система измерений с блоком телеметрии для возможности получения информации в режиме реального времени, электрогидравлическая система фиксации и расфиксации аппаратуры в стволе скважины, блок капсул для хранения двух и более представительских проб флюида. Технология работы аппаратуры должна предусматривать возможность сброса некачественных по результатам экспресс-анализа проб пластовой жидкости обратно в ствол скважины. Конструктивное исполнение аппаратуры должно обеспечивать нормальную работу при давлениях до 80 МПа и температурах до 125°C.

При проектировании новой аппаратуры необходимо максимально приблизить результаты теоретических исследований к требуемым результатам при работе объекта в реальных условиях, т. е. необходимо установить соответствие математических моделей реальному объекту. Результаты расчетов, полученные с помощью адекватной математической модели, позволяют сократить время при доводке опытного образца аппаратуры в период внедрения в опытное производство. Зачастую в состав гидравлической системы любого прибора входят комплектующие разных производителей, в результате чего нет уверенности у разработчика о выполнении таких требований при испытании опытного образца как в обеспечении надежности и долго-

вечности работы.

Проверить адекватность математических моделей пластоиспытателя реальному объекту можно с помощью проведения стендовых исследований. В дальнейшем с помощью анализа полученных экспериментальных данных можно не только сравнить результаты теоретических и эмпирических исследований, но и выявить погрешность расчетов и внести изменения в математическую модель узла фиксации и расфиксации пластоиспытателя.

### ОПИСАНИЕ ПЛАСТОИСПЫТАТЕЛЯ

При разработке принципиальной схемы пластоиспытателя были поставлены следующие задачи [1].

Задача № 1 – испытание пласта. Испытание пласта позволяет получить данные по проницаемости пласта, рассчитать подвижность пластовой жидкости и выполнить предварительный прогноз по составу пластовой жидкости.

Задача № 2 – отбор качественных проб пластовой жидкости. Отбор качественных проб позволяет выполнить в специальной лаборатории анализ по составу пластовой жидкости.

Задача № 3 – фиксация и расфиксация в стволе скважины с обеспечением полной герметизации пробоотборного зонда от среды скважины. Надежная фиксация позволит испытать пласт и отобрать чистую пробу пластовой жидкости, не смешивая ее состав с составом скважинной жидкости. Надежная расфиксация прибора позволит

добиться безаварийной работы.

Задача № 4 – для работы модулей фиксации и расфиксации необходим гидравлический модуль, который включает в себя электромагнитные клапаны, фильтры тонкой и грубой очистки и насосную станцию с электроприводом.

Схематично связь вышеуказанных модулей представляет собой блок схему, представленной на рис. 1.

В состав модуля фиксации и расфиксации входит пробоотборный зонд, с помощью которого в прибор поступает пластовая жидкость. Чтобы проводить измерения температуры пластовой жидкости с наименьшей инерционностью, необходимо конструктивно размещать датчик температуры и датчик пластового давления рядом с пробоотборным зондом, поэтому в состав модуля фиксации и расфиксации также входит блок датчиков. Блок датчиков позволяет в режиме реального времени измерять такие параметры как пластовое давление, скважинное давление, температуру пластовой и скважинной жидкости, удельную проводимость пластовой жидкости и дебит в режиме гидродинамического каротажа.

При анализе существующих компоновок геофизических приборов была выбрана оптимальная конструкция блока датчиков, которая позволяет с минимальными временными затратами выполнять калибровку всех измерительных приборов в одной установке без полной разборки всего модуля и проводить смену пробоотборных модулей, которые необходимо менять при исследовании скважин разных диаметров.

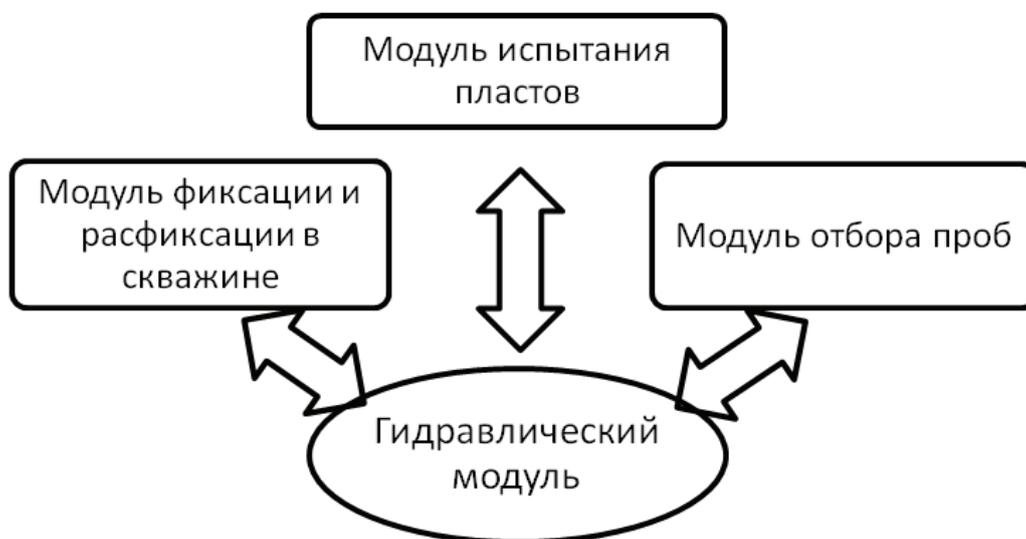
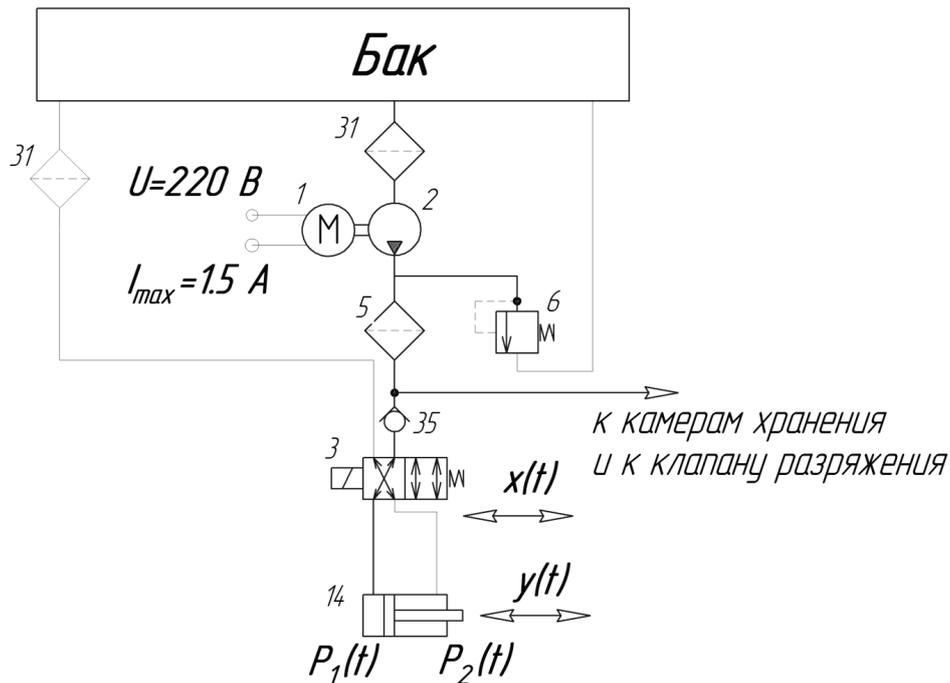


Рис. 1. Блок-схема связи модулей пластоиспытателя



**Рис. 2.** Расчетная схема гидравлической системы пластоиспытателя:

31 – фильтр низкого давления, 1 – электродвигатель, 2 – насос, 5 – фильтр высокого давления, 6 – предохранительный клапан, 3 – распределитель, 35 – обратный клапан, 14 – гидравлический цилиндр фиксации и расфиксации

Пластоиспытатель применяется в необсаженном стволе скважины, после проведения работ по бурению. Во время бурения нередко возникают каверны, которые нельзя зачистить или зацементировать. При спускоподъемных операциях прибор должен беспрепятственно проходить через каверны без прихвата и зацепа. Одним из известных способов безопасной работы с таким прибором является установка пружинно-рессорных центраторов, которые конструктивно должны размещаться по краям прибора.

При определении интервала исследования во время испытания пластов или отбора качественных проб пластовой жидкости необходимо выполнить привязку прибора по глубине скважины с помощью кавернограммы и диаграммы гамма-каротажа. Учитывая это требование, необходимо включить в состав пластоиспытателя модуль гаммакаротажа.

Принципиальная схема пластоиспытателя включает следующие модули:

1. Верхний центратор.
2. Модуль гамма-каротажа.
3. Гидравлический модуль.
4. Модуль фиксации и расфиксации.
5. Модуль отбора пластовой жидкости.
6. Модуль испытания пласта.
7. Нижний центратор.

На рис. 2 представлен фрагмент принципиальной гидравлической схемы модуля фиксации и расфиксации пластоиспытателя. В данном случае гидроцилиндр 14 выполняет роль опоры прибора во время фиксации в скважине, причем количество опор может находиться в пределах от 2 шт. до 4 шт. Принцип работы пластоиспытателя заключается в том, что за работу всех модулей отвечает насосная станция, в состав которой входит насос 2, фильтр низкого давления 31, электродвигатель 1, фильтр высокого давления 5, предохранительный клапан 6, распределитель и обратный клапан 35. В отличие от приборов-аналогов, в представленном пластоиспытателе все модули управляются от насосной станции, за счет логической гидравлики и компактного расположения узлов и модулей прибора. Такая компоновочная и конструктивная схема позволили выполнить прибор с габаритным диаметром 126 мм, массой 380 кг (с двумя герметичными камерами хранения) и длиной не более 7,5 м, когда массогабаритные характеристики прибором-конкурентов значительно больше. Так, например, прибор фирмы *Halliburton SFFT-C* достигает в длину до 12,5 м и имеет массу около 1 700 кг.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЗЛА ФИКСАЦИИ И РАСФИКСАЦИИ

Из проведенных экспериментальных исследований были выявлены разные показания времени фиксации и расфиксации пластоиспытателя при возвратно-поступательном перемещении штока гидравлического цилиндра. Также следует учесть тот факт, что при изменении эксплуатационных факторов, таких как температура рабочей жидкости гидравлической системы, диаметр штока гидравлического цилиндра, может измениться такой показатель как быстродействие системы.

Разброс времени можно объяснить тем, что гидравлический распределитель 3, с помощью которого управляется система фиксации и расфиксации, управляется за счет электромеханического преобразователя (ЭМП), управляющая характеристика которого является неоднородной. Кроме того, влияние температуры и разработка различных модификаций ЭМП могут приводить к разным значениям сопротивления обмотки якоря ЭМП и индуктивности.

В ЭМП золотникового распределителя происходит преобразование электрической энергии в механическую энергию при воздействии на систему вибрационных, реактивных сил струй рабочей жидкости, а также сил вязкого демпфирования рабочей жидкости и сил сухого трения. Экспериментальные и теоретические исследования свидетельствуют о наличии зоны нечувствительности смещения золотника от нейтрального положения, вследствие чего ухудшаются характеристики по быстродействию системы.

Для учета неоднородности управляющей характеристики ЭМП можно воспользоваться математической моделью управляющей характеристики гидравлического распределителя, представленной в [3]. На сегодняшний день, используя экспериментальные данные и модель гистерезиса Bouc-Wen, можно получить эмпирическую нелинейную зависимость итогового усилия сдвига золотника от сигнала управления  $i(t)$  и перемещения золотника  $x(t)$ .

Математическая модель, которая соответствует расчетной схеме, представленной на рис. 2, для расчета переходных процессов представлена ниже.

## Уравнение электрической цепи

$$R_{\text{ЭМП}} \cdot I(t) + L \cdot \frac{d}{dt} I(t) + K_{\text{ПЭ}} \frac{d}{dt} x(t) = U, \quad (1)$$

где  $R_{\text{ЭМП}}$  – активное сопротивление катушки ЭМП (Ом),  $L$  – индуктивность обмотки ЭМП (Гн),  $K_{\text{ПЭ}}$  – коэффициент противо-ЭДС, напряжение электрической цепи  $U$  изменяется с течением времени, так как исследование должно проводиться при возвратно-поступательном перемещении штока гидравлического цилиндра:

$$U = \begin{cases} 220 & t < 4.5 \\ -220 & 4.5 < t < 9 \\ 220 & 9 < t < 13.5 \end{cases} \quad (2)$$

Условие (1.2) получено из экспериментальных данных.

## Уравнение движения золотника

$$m_3 \frac{d^2}{dt^2} x(t) = K_{\text{FI}} \cdot I(t) - c_{\text{пр}} \cdot x(t) - b_s \cdot \frac{d}{dt} x(t) - \beta \cdot i(t) \cdot x(t)^n, \quad (3)$$

где  $m_3$  – рассчитывается из уравнения расходно-перепадной характеристики (зная расчетную точку характеристики, можно рассчитать диаметр и ширину окна золотника, соответственно его объем и массу) (кг),  $K_{\text{FI}}$  – коэффициент управляющей характеристики ЭМП (Н/А),  $c_{\text{пр}}$  – пружина золотникового распределителя (Н/м),  $n$  – эмпирический коэффициент, который определяет кривизну гистерезисной петли. Если коэффициент  $n$  будет больше 1, то характеристика управления становится нелинейной,  $\beta$  – составляющая магнитной индукции.

## Уравнения баланса расходов

В уравнении баланса расходов необходимо в первую очередь учесть расход рабочей жидкости, он не должен превышать номинального расхода насосной станции 2 (см. рис. 2) 550 см<sup>3</sup>/мин. Также необходимо учесть, что перепад давления в полостях может находиться в пределах 1 МПа – 20 МПа, так как рассматривается возвратно-поступательное перемещение поршня гидравлического цилиндра, что в свою очередь приведет к снижению приведенного модуля объемной упругости рабочей жидкости Е. При этом сила тока в системе согласно данным производителя гидравлического распределителя не должна превышать 0.09 А.

$$K_1 \mu B x(t) \sqrt{\frac{P_H - P_1(t)}{\rho}} = S_1 \frac{dy(t)}{dt} + \frac{W}{E} \frac{dP_1(t)}{dt}, \quad (4)$$

где  $B$  – ширина окна золотникового распределителя (м),  $P_H$  – номинальное давление насоса 2 (Па),  $V$  – объем гидравлического цилиндра (м<sup>3</sup>),  $W$  – коэффициент расхода,  $\mu$  – плотность рабочей жидкости.

$$K_1 \mu B x(t) \sqrt{\frac{P_{2n}(t) - P}{\rho}} = S_2 \frac{dy(t)}{dt} - \frac{W}{E} \frac{dP_2(t)}{dt}, \quad (5)$$

где  $P_{2n}$  – давление в сливной магистрали (Па),  $K_1$  – коэффициент расходной характеристики золотника,  $S_1$  – эффективная площадь поршневой полости гидравлического цилиндра,  $S_2$  – эффективная площадь поршня в штоковой полости гидравлического цилиндра.

**Уравнение движения поршня гидроцилиндра**

$$m_{\Pi} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \begin{cases} S_1 (P_1(t) - P_2(t)) \frac{dy(t)}{dt} > 0 \\ S_2 (P_1(t) - P_2(t)) \frac{dy(t)}{dt} < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$-R - b_{\Pi} \frac{d}{dt} y(t),$$

где  $m_{\Pi}$  – масса поршня гидроцилиндра (конструктивный параметр) (кг),  $R$  – статическая нагрузка на шток гидроцилиндра (Н),  $b_{\Pi}$  – коэффициент вязкого трения.

При решении системы уравнений (1) – (6) необходимо задать начальные условия и выбрать метод решения системы дифференциальных уравнений.

Для использования математического пакета при расчете переходных процессов пластоиспытателя в этом случае будет применяться метод решения частных дифференциальных уравнений – метод Рунге-Кутты.

Начальные условия и граничные условия представлены ниже:

$$\begin{cases} I(0) = 0 \\ x(0) = 0 \\ \Delta P(0) = P_1(0) - P_2(0) = 0 \\ y(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{\max} = 19 \times 10^6 \text{ МПа,} \\ x_{\max} = 5 \times 10^{-3} \text{ м,} \\ Q_{\max} = 540 \text{ см}^3/\text{мин,} \\ y_{\max} = 66 \times 10^{-3} \text{ м,} \\ I_{\max} = 0.09 \text{ А.} \end{cases} \quad (8)$$

В качестве допущений, которые были приняты для математической модели, можно выделить следующие:

1. Значение приведенного модуля объемной упругости рабочей жидкости постоянно (в гидравлическом цилиндре  $E = 20 \cdot 10^8$  Па), а в золотнике распределителя  $3 E = 6 \cdot 10^8$  Па).

2. Значение коэффициента расхода золотникового распределителя  $3 \mu = 0.86$  постоянно (значение коэффициента расхода было получено опытным путем, после проведения ряда экспериментов).

3. Плотность рабочей жидкости постоянна  $\rho = 850$  кг/м<sup>3</sup> (плотность рабочей жидкости при температуре  $T = 20 \dots 40$  С для *Mobil DTE 10 Excel 32*).

4. Коэффициенты относительного демпфирования золотника  $b_z = 1 \cdot 10^{-2}$  Нс и поршня гидравлического цилиндра  $b_{\Pi} = 0,1$  Нс выбираются на основе экспериментальных данных.

5. Физические процессы, протекающие в электромеханическом преобразователе (ЭМП), имеют линейный характер.

6. Потери на трение в трубопроводах равны нулю.

На рис. 3–6 представлены переходные процессы перемещения золотника распределителя 3, поршня гидроцилиндра 14, силы тока ЭМП и перепада давлений в полостях гидроцилиндра 14.

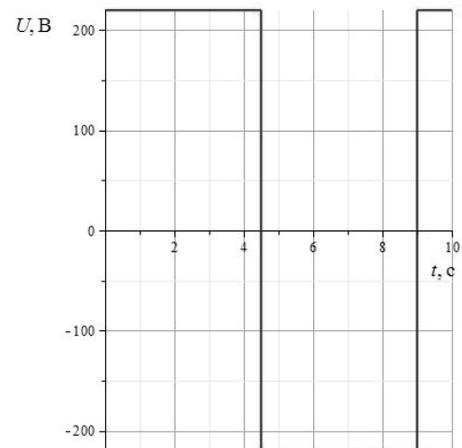


Рис. 3. Изменение напряжения на ЭМП распределителя 3

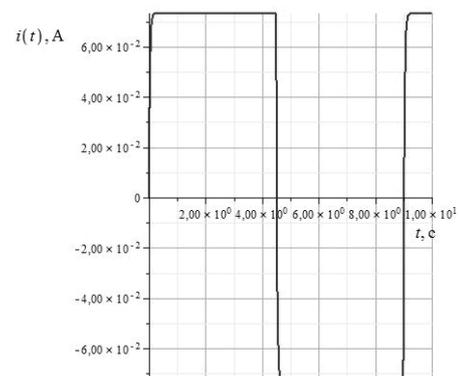


Рис. 4. Изменение силы тока ЭМП распределителя 3

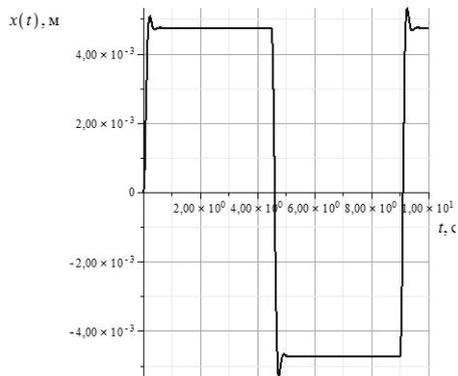


Рис. 5. Изменение перемещения золотника распределителя 3

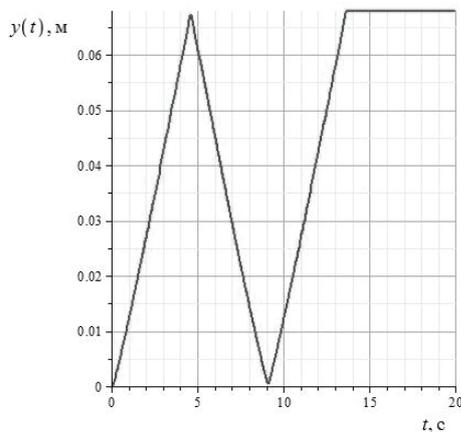


Рис. 6. Изменение перемещения поршня гидроцилиндра 14

При изменении индуктивности  $L$  в уравнении (3) характер кривой гистерезиса изменяется, влияя при этом на управление системой фиксации и расфиксации. При увеличении индуктивности на порядок со значения 100 Гн до значения 2000 Гн, происходит смещение графика перемещения поршня гидравлического цилиндра (рис. 7–8).

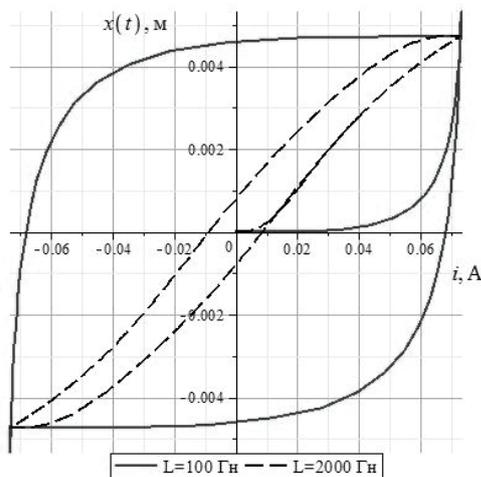


Рис. 7. Гистерезис в характеристике управления распределителя 3

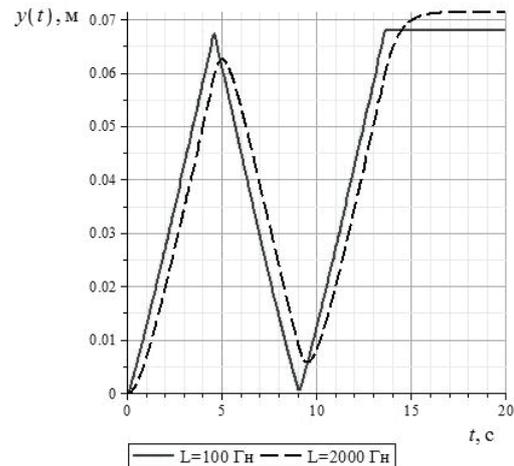


Рис. 8. Смещение графика перемещения поршня гидравлического цилиндра 14

При выдвигении штока гидроцилиндра фиксации на него действует нагрузка, переменная по своей величине, что связано с различным гидростатическим давлением, зависящим от глубины, на которой находится прибор в скважине. Поэтому возникает необходимость оценки степени влияния нагрузки  $R_H$ , действующей на шток гидроцилиндра фиксации.

Анализ результатов моделирования переходных процессов перемещения поршня гидроцилиндра фиксации показал (см. рис. 9), что на время фиксации пластоиспытателя в стволе скважины существенно влияет нагрузка на выходе. Фиксация прибора в скважине осуществляется:

- за 4,5 с при статической нагрузке, равной 0 Н,
- за 5,3 с при статической нагрузке, равной 5000 Н,
- за 7 с при статической нагрузке, равной 10000 Н,
- за 14,5 с при статической нагрузке, равной 15000 Н.

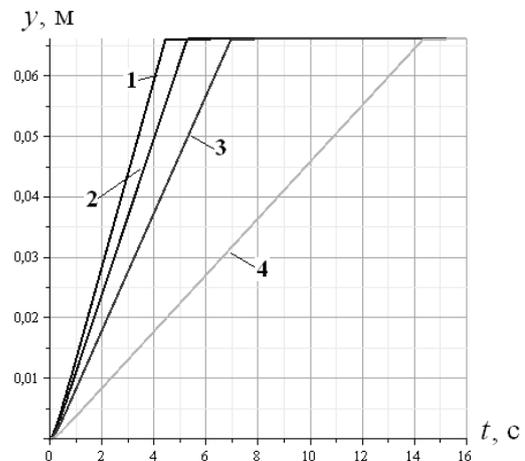


Рис. 9. Переходный процесс перемещения поршня гидроцилиндра фиксации при различной нагрузке:  
 1 –  $R_H = 0$  Н, 2 –  $R_H = 5000$  Н,  
 3 –  $R_H = 10000$  Н, 4 –  $R_H = 15000$  Н

## ИСПЫТАНИЯ ПРИБОРА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Рассмотренный пластоиспытатель испытывался на следующих месторождениях:

1. Талаканское месторождение, республика Саха Якутия, сентябрь – ноябрь 2011 г. Разработчик месторождения ОАО «Сургутнефтегаз».

2. Месторождение пермской области, п. Чернушки, ноябрь – декабрь 2011 г. Разработчик месторождения ОАО «Лукойл – Пермь».

3. Талаканское месторождение, республика Саха Якутия, сентябрь – ноябрь 2012 г. Разработчик месторождения ОАО «Сургутнефтегаз».

В результате проведенных испытаний было исследовано около 20 скважин, которые были пробурены во время разведочных работ.

В большинстве из исследуемых скважин углеводород не был зарегистрирован. Благодаря малогабаритной компоновки прибора на геофизическом кабеле исследование около 35 точек в заданном интервале составляло по времени примерно 5–6 ч с учетом спуско-подъемных операций и с учетом времени привязки по глубине. Если сравнивать с существующими методами исследования, которые подразумевают использование приборов на буровом инструменте, то время исследования с помощью таких методов в тех же интервалах занимает 16–20 ч. Основная проблема проведения исследований на разведочных скважинах – недостаток времени, которое отводится партии геофизиков для работы. Один час простоя буровой бригады во время исследования колеблется в диапазоне 70 тыс.–350 тыс. рублей в зависимости от территориального расположения месторождения.

Применение такого класса приборов позволит сократить время работы при исследовании скважин во время разведки, а также за счет логической гидравлики получать достоверные данные гидродинамического каротажа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрена гидравлическая схема узла фиксации и расфиксации пластоиспытателя, который работает на геофизическом кабеле, проведена оценка степени влияния кон-

структивных параметров и эксплуатационных факторов на характеристики пластоиспытателя. По результатам численного моделирования установлено, следующее: при увеличении нагрузки на шток гидроцилиндра с 0 до 15000 Н время фиксации пластоиспытателя в скважине увеличилось с 4,5 до 14,5 с, что соответствует техническим параметрам и характеристикам пластоиспытателей, используемых при исследовании продуктивных пластов.

Во время использования гидравлического пластоиспытателя на месторождениях Западной Сибири возможно возникнет необходимость в увеличении быстродействия гидравлического привода при работе в более жестких условиях эксплуатации. Для решения такой задачи необходимо увеличить потребляемую мощность привода, а следовательно, увеличить потребляемую электрическую энергию, что соответственно может привести к замене геофизического кабеля. На сегодняшний день на разведочных скважинах используются геофизические кабели КГЗ-0.75, так как они обладают небольшим весом по сравнению с кабелями большего сечения и меньшими габаритными размерами.

Предполагается, что замена геофизического кабеля КГЗ-0.75 на КГЗ-1.5 позволит увеличить потребляемую энергию.

При исследовании скважин терригенного разреза диаметрами 146 мм и 216 мм. Необходимо соблюдение размеров диаметра штока гидравлического цилиндра опор узла фиксации и расфиксации. При осевой нагрузке штока в 17000 Н и диаметре поршня 33 мм, диаметр штока должен быть не менее 15 мм. Увеличение диаметра штока более чем 15 мм приведет к увеличению номинального давления в гидросистеме.

Для корректной работоспособности пластоиспытателя в условиях крайнего севера, где температура окружающего воздуха может достигать –60 С, рекомендуется использовать гидравлическое масло вязкостью класса 10, например *Mobil DTE 10 excel*, а для работы на месторождениях Западной Сибири рекомендуется гидравлическое масло *Mobil DTE 32 excel*, так как температура в скважине может достигать 120° С.

Анализ конструкции покупной единицы – гидравлического распределителя WK08D показал, что может возникнуть заклинивание золотника при превышении давления в гидросистеме более 10 МПа. Заклинивание может возникнуть

по причине отсутствия разгрузочных канавок на диаметре золотника. Рекомендуется разобрать золотниковый распределитель, выполнить разгрузочные канавки глубиной не более 0.1 мм на внешнем диаметре золотника в количестве не менее 3 шт.

Опыт эксплуатации пластоиспытателя ПЛГК-120 показал, что необходимо обеспечить быстрый доступ к предохранительному клапану гидравлической системы, так как существует необходимость в снижении рабочего давления в гидросистеме при исследовании скважин глубиной не более 1,5 км.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2371577. Пробоотборник пластового флюида. Галлямов Ш. Р., Зайтова А. Р., Месропян А. В.
2. Ашуров В. В., Хамитов И. Р., Яценко В. И. Метод измерения анизотропии проницаемости и отбора глубинных  $rvt$  проб на примере месторождения с тяжелой нефтью на севере Западной Сибири / В. В. Ашуров, И. Р. Хамитов, В. И. Яценко // Вестник SPE, выпуск № 3, февраль 2009. С.10–18.
3. Галлямов Ш. Р. Исследование влияния нелинейностей типа «люфт» и «гистерезис» на гидравлический рулевой привод летательного аппарата / Ш. Р. Галлямов, А. В. Месропян, В. А. Целищев // Сборник научных трудов, посв. 75-летию УГАТУ и ФАД «Проблемы и перспективы авиационного двигателестроения», 2007. С. 32–38.

#### ОБ АВТОРЕ

Галлямов Шамиль Рашитович, доц. каф. прикладной гидромеханики. Дипл. магистра (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. пневмогидросистем, разработка перспективной малогабаритной техники.