

*Ширин Л.Н., д.т.н., проф., НГУ, г. Днепропетровск,
Зензеров В.И., к.т.н., доц., ДонНТУ, г. Донецк,
Рябичев В.Д., к.т.н., ВНУ им. В.Даля, г. Антрацит,
Гродзинский П.Я., к.т.н., доц., ВНУ им. В.Даля, г. Антрацит*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПЭВМ РАБОТЫ ГИДРОСИСТЕМЫ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАКЛОННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

В статье предлагается программный комплекс для ПЭВМ, позволяющий решать задачи исследования и расчета параметров гидросистем механизированных крепей при отработке наклонных угольных пластов.

У статті пропонується програмний комплекс для ПЕВМ, що дозволяє вирішувати завдання дослідження і розрахунку параметрів гідросистем механізованих кріплень при відробітку похилих вугільних пластів.

A programmatic complex for computers, allowing to decide the tasks of research and calculation of parameters of hydrosystems of mechanized timbers at working off sloping coal layers, is offered in the article.

Механизированная крепь, как базовая машина очистного комплекса, в значительной мере определяет его производительность, надежность управления и безопасность работы. В свою очередь, работа механизированных крепей во многом определяется параметрами их гидросистемы. Как показывает опыт разработки наклонных пластов, именно за счет совершенствования гидросистем удается повысить устойчивость и направленность передвижения секций механизированной крепи.

В этой связи обоснование и развитие методов расчета параметров при проектировании гидросистем механизированных крепей с характеристиками, обеспечивающими их эффективную эксплуатацию на наклонных пластах, является актуальной научной и практической задачей, имеющей отраслевое значение.

Решение задачи исследования и расчета параметров гидросистем механизированных крепей посвящены работы ряда авторов [1, 2, 5, 7]. Разработаны аналитические методы, проведены экспериментальные исследования. Вместе с тем, на современном этапе полученные результаты не обеспечивают достаточно полное решение задачи математического моделирования гидросистемы, для выбора ее рациональных параметров и обоснованного внесения изменений в конструкцию гидросистемы. В работе предлагается программный комплекс для ПЭВМ, позволяющий решать задачи исследования и расчета параметров гидросистем механизированных крепей при отработке, в том числе, наклонных угольных пластов.

Гидросистема механизированной крепи, схема которой приведена на рис. 1, состоит из N отдельных ветвей, соответствующих работе гидроцилиндров отдельных секций, и общих для всей гидросистемы участков напорной и сливной магистралей.

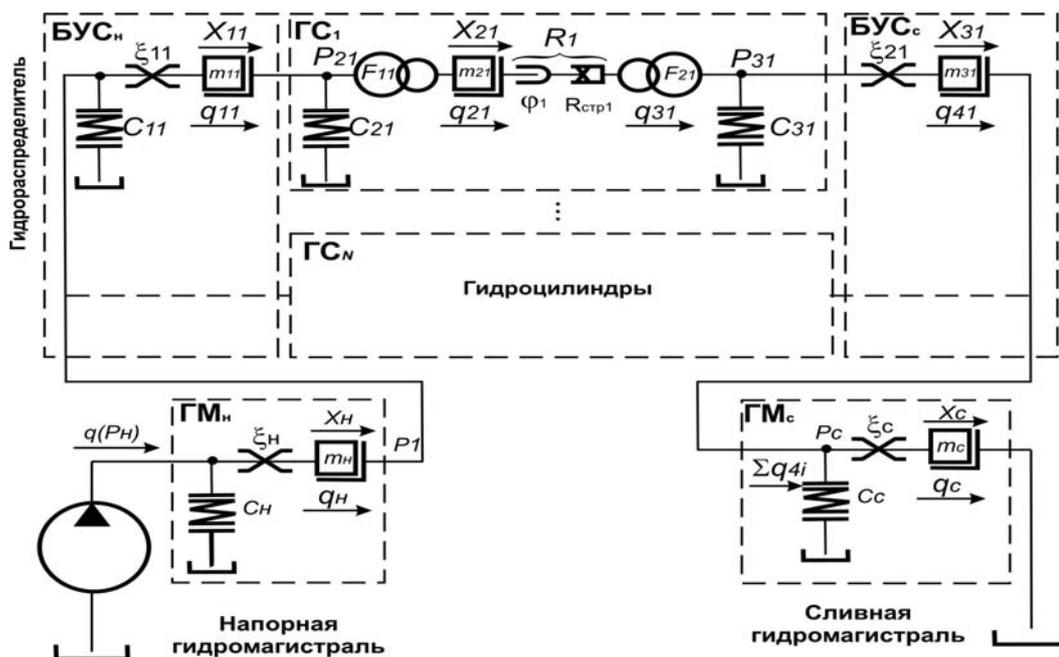


Рис. 1. Гидромеханическая схема гидросистемы механизированной крепи

Движение рабочей жидкости от насоса к гидрораспределителю секции крепи описывается системой трех дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_H \frac{dP_H}{dt} &= q(P_H) - q_H \\ \frac{m_H}{(f_H)^2} \cdot \frac{dq_H}{dt} &= P_H - \xi_H (q_H)^2 - P_1 \\ C_\Sigma \frac{dP_1}{dt} &= q_H - \sum_{i=1}^N q_{1i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Математическая модель работы каждого гидроцилиндра состоит из системы шести дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{m_{1i}}{(f_{ПВДi}^H)^2} \cdot \frac{dq_{1i}}{dt} &= P_1 - \xi_{1i} (q_{1i})^2 - P_{2i} \\ C_{2i} \frac{dP_{2i}}{dt} &= q_{1i} - q_{2i} \\ \frac{m_{2i}}{(F_{1i})^2} \cdot \frac{dq_{2i}}{dt} &= P_{2i} - \beta_i R_i (X_{2i}, \dot{X}_{2i}) - \alpha_i P_{3i} \\ \frac{dX_{2i}}{dt} &= \beta_i q_{2i} \\ C_{3i} \frac{dP_{3i}}{dt} &= \alpha_i q_{2i} - q_{4i} \\ \frac{m_{3i}}{(f_{ПВДi}^C)^2} \cdot \frac{dq_{4i}}{dt} &= P_{3i} - \xi_{2i} (q_{4i})^2 - P_C \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Течение жидкости по сливной гидромагистральной от секции крепи в бак гидронасоса описывается системой двух дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_C \frac{dP_C}{dt} &= \sum_{i=1}^N q_{4i} - q_C \\ \frac{m_C}{(f_C)^2} \cdot \frac{dq_C}{dt} &= P_C - \xi_C (q_C)^2 \end{aligned} \right\} . \quad (3)$$

Системы дифференциальных уравнений (1), (2) и (3) образуют математическую модель гидросистемы механизированной крепи.

В математическую модель входят семь групп параметров:

- давление жидкости в характерных точках гидросистемы - $P_H, P_1, P_{2i}, P_{3i}, P_C$;
- расход жидкости на отдельных участках гидросистемы - $q(P_H), q_H, q_{1i}, q_{2i}, q_{4i}, q_C$;
- коэффициенты упругости элементов гидросистемы - $C_H, C_{mp}, C_{pвд}, C_a, C_{\Sigma}, C_{2i}, C_{3i}, C_C$;
- коэффициенты гидравлических сопротивлений участков гидросистемы - $\xi_H, \xi_{1i}, \xi_{2i}, \xi_{\tilde{N}}$;
- значения массы жидкости, перемещаемой на отдельных участках гидросистемы - $m_H, m_{1i}, m_{3i}, m_{2i}, m_C$;
- площади поперечных сечений элементов гидросистемы - $f_H, f_{PBД_i}^H, f_{PBД_i}^C, f_C$;
- сопротивления перемещению гидроцилиндров - $R_i(X_{2i}, \dot{X}_{2i})$.

Первые две группы параметров образуют вектор начальных значений, а в процессе моделирования - результирующий вектор зависимых переменных.

Выражение для определения сопротивления перемещению гидродомкратов секции крепи получены на основании проведенных исследований [8, 9] и имеет вид:

$$\begin{aligned} R_j &= \frac{1}{n_{\tilde{a}\tilde{a}}} \left\{ \left[G \cos \alpha + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) \eta^* \frac{\sin \beta}{\cos(\beta_{\tilde{o}} - \gamma_A)} \right] f_n + \right. \\ &+ \left[\sum_{i=1}^{n_1} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} [(P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) K_{\tilde{e}\tilde{i}\tilde{i}\tilde{n}_i}] - G_{\tilde{a}\tilde{a}\tilde{o}\tilde{o}} \right] (f_n + f_{KP}) + \\ &+ \left. \left[G_{конс} (\sin \alpha - \cos \alpha f_n) * \frac{l_Q(l_A + l_B)}{l_A^2 + l_B^2} \left(1 + \frac{L_R}{L_b}\right) - 0.5 P_p \frac{l_b}{L_b} + \sum_{i=n_3+1}^N P_{2i} F_{1i} K_{ci} \right] * f_{TP} \right\} + R_{\tilde{o}\tilde{i}\tilde{e}} \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_{конс}$ - коэффициент связи усилия в гидроцилиндре и реакции управляемой консоли на кровлю пласта;

$R_{упл}$ - сила трения в уплотнениях поршня и штока;

j - номер гидродомкрата передвижки: $j = n_2 + 1 \div n_3$;

$G_{верх}$ - вес верхняка и других перемещаемых в процессе разгрузки элементов конструкции секции крепи.

Сопротивление перемещению гидростоек при их разгрузке равно:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{ynl} - (G_{верх} - R_{KP} - R_n) \frac{1}{n_{2c}}, \quad (5)$$

где $R_{кр} R_n$ – реакции кровли и почвы, действующие до момента отрыва верхняка от кровли.

При распоре гидростоек сопротивление перемещению равно:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{ynl} + G_{верх}. \quad (6)$$

После контакта верхняка с кровлей происходит повышение усилия поддержания кровли до усилия начального распора. Тогда:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{ynl} + G_{верх} + R_{KP} + R_n. \quad (7)$$

Фронтальное выдвижение конвейера включает в себя большое количество одновременно работающих гидродомкратов. Сопротивление перемещению одного гидродомкрата равно:

$$R_{j=n_2+1 \div n_3} = R_{оіө} + G_{өіі} \cdot \cos \alpha f_n. \quad (8)$$

Полученная математическая модель отличается от ранее разработанных тем, что учтены выражения для определения сопротивления перемещению гидроцилиндров при передвижении секций механизированной крепи на наклонных пластах и позволяет решать задачи как прямых гидравлических расчетов, при которых известно потокораспределение в системе и требуется определить рациональные значения конструктивных параметров гидравлических элементов, так и обратных, когда известны конструктивные и технологические параметры механизированной крепи, а необходимо промоделировать динамические процессы в гидросистеме и определить время выполнения различных операций. Исследование статических и динамических характеристик отдельных гидроэлементов и гидросистем в целом позволит выявить факторы, оказывающие решающее влияние на режим работы крепи, и обосновать допущения, которые могут быть приняты в инженерных расчетах. Результатом исследований являются также модели отдельных гидроэлементов механизированной крепи, которые в различных сочетаниях используются для расчета на ПЭВМ вариантов гидросистем проектируемых крепей.

Количество уравнений математической модели зависит от количества одновременно работающих гидроцилиндров N при моделировании различных технологических операций и определяется из выражения:

$$n = 6N + 5. \quad (9)$$

Согласно приведенного математического описания разработаны алгоритм и программа на алгоритмическом языке DELPHI для ПЭВМ. Текст программы приведен на рис. 2. Программа позволяет задавать последовательность моделирования операций технологического цикла работы механизированной крепи, автоматически осуществлять пошаговый контроль перемещения каждого гидроцилиндра и переформировывать систему дифференциальных уравнений при достижении каким-либо гидроцилиндром максимального заданного значения перемещения, продолжая при этом процесс моделирования для оставшихся гидроцилиндров. Для численного решения полученной системы дифференциальных уравнений (1) – (3) на ПЭВМ предлагается использовать метод Рунге-Кутты, с внесением изменений для адаптации разработанного алгоритма к особенностям работы моделируемого гидропривода.

```

unit RK_Method;
interface
type
  TVarsArray = array of Extended; // вектор переменных включая независимую
  TInitArray = array of Extended; // вектор начальных значений
  TFuncArray = array of function(VarsArray: TVarsArray ):Extended;
  // вектор функций
  TResArray = array of array of Extended; // матрица результатов
  TCoefsArray = array of Extended; // вектор коэффициентов метода
function Runge_Kutt( // метод Рунге-Кутта
  FuncArray: TFuncArray; // массив функций
  First: Extended; // начальная точка по независимой координате
  Last: Extended; // конечная точка по независимой координате
  Steps: Integer; // число шагов по независимой координате
  InitArray: TInitArray; // вектор начальных значений
  var Res: TResArray // матрица результатов включая независ. переменную
):Word;
  // возвращаемое значение - код ошибки
implementation
Function Runge_Kutt( // метод Рунге-Кутта
  FuncArray: TFuncArray; // массив функций
  First: Extended; // начальная точка по независимой координате
  Last: Extended; // конечная точка по независимой координате
  Steps: Integer; // число шагов по независимой координате
  InitArray: TInitArray; // вектор начальных значений
  var Res: TResArray // матрица результатов включая независ. переменную
):Word; // возвращаемое значение - код ошибки
var
  Num: Word; // число уравнений
  NumInit: Word; // число начальных условий
  Delt: Extended; // шаг разбиения
  Vars: TVarsArray; // вектор переменных включая независимую
  Vars2,Vars3,Vars4: TVarsArray; // значения перем. для 2-4 коэф.
  Coefs1: TCoefsArray; // вектор 1-ых коэффициентов в методе
  Coefs2: TCoefsArray; // вектор 2 коэффициентов в методе
  Coefs3: TCoefsArray; // вектор 3 коэффициентов в методе
  Coefs4: TCoefsArray; // вектор 4 коэффициентов в методе
  I: Integer; // счетчик цикла по итерациям
  J: Word; // индекс коэф.-тов метода
  K: Integer; // счетчик прочих циклов
begin
  Num:=Length(FuncArray); // узнаем число уравнений
  NumInit:=Length(InitArray); // узнаем число начальных условий
  If NumInit<>Num then
    begin
      Result:=100; // код ошибки 100: число уравнений не равно числу нач. усл.
      Exit;
    end;
  Delt:=(Last-First)/Steps; // находим величину шага разбиений
  SetLength(Res,Num+1,Steps+1); // задаем размер матрицы ответов с незав. перем.
  SetLength(Vars,Num+1); // число переменных включая независимую
  SetLength(Vars2,Num+1); // число переменных для 2-го коэф. включая независимую

```

```

SetLength(Vars3,Num+1); // число переменных для 3-го коэф. включая независимую
SetLength(Vars4,Num+1); // число переменных для 4-го коэф. включая независимую
SetLength(Coefs1,Num); // число 1-ых коэф. метода по числу уравнений
SetLength(Coefs2,Num); // число 2-ых коэф. метода по числу уравнений
SetLength(Coefs3,Num); // число 3-их коэф. метода по числу уравнений
SetLength(Coefs4,Num); // число 4-ых коэф. метода по числу уравнений
// Начальные значения переменных:
Vars[0]:=First;
For K:=0 to NumInit-1 do Vars[K+1]:=InitArray[K];
For J:=0 to Num do Res[J,0]:=Vars[J]; // первая точка результата
For I:=0 to Steps-1 do // начало цикла итераций
begin
  For J:=0 to Num-1 do Coefs1[J]:=FunArray[J](Vars)*delt; // 1-й коэфф.
  // Находим значения переменных для второго коэф.:
  Vars2[0]:=Vars[0]+delt/2;
  For K:=1 to Num do Vars2[K]:=Vars[K]+Coefs1[K-1]/2;
  For J:=0 to Num-1 do Coefs2[J]:=FunArray[J](Vars2)*delt; // 2-й коэф.
  // Находим значения переменных для третьего коэф.:
  Vars3[0]:=Vars[0]+delt/2;
  For K:=1 to Num do Vars3[K]:=Vars[K]+Coefs2[K-1]/2;
  For J:=0 to Num-1 do Coefs3[J]:=FunArray[J](Vars3)*delt; // 3 коэфф.
  // Находим значения переменных для 4 коэф.:
  Vars4[0]:=Vars[0]+delt;
  For K:=1 to Num do Vars4[K]:=Vars[K]+Coefs3[K-1];
  For J:=0 to Num-1 do Coefs4[J]:=FunArray[J](Vars4)*delt; // 4 коэфф.
  // Находим новые значения переменных включая независимую
  Vars[0]:=Vars[0]+delt;
  For K:=1 to Num do
    Vars[K]:=Vars[K]+(1/6)*(Coefs1[K-1]+2*(Coefs2[K-1]+Coefs3[K-1])+Coefs4[K-1]);
  // Результат итерации:
  For J:=0 to Num do Res[J,I+1]:=Vars[J];
end;
// конец итераций
Result:=0; // код ошибки 0 - нет ошибок
end;
// Функции (правые части уравнений)
function f0(VarArray:TVarsArray):extended;
begin
  Result:=4*VarArray[0]*VarArray[0]*VarArray[0];
end;
function f1(VarArray:TVarsArray):extended;
begin
  Result:=1;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
  I: Integer;
  FunArray: TFunArray; // массив функций
  First: Extended; // начальная точка по независимой координате
  Last: Extended; // конечная точка по независимой координате
  Steps: Integer; // число шагов по независимой координате
  InitArray: TInitArray; // вектор начальных значений

```

```

Res: TResArray; // матрица результатов включая независ. переменную
begin
  // Создаем вектор функций:
  SetLength(FunArray,2);
  FunArray[0]:=f0;
  FunArray[1]:=f1;
  // Задаем интервал и число шагов
  First:=0;
  Last:=10;
  Steps:=10;
  // Задаем начальные условия
  SetLength(InitArray,2);
  InitArray[0]:=0;
  InitArray[1]:=0;
  Memo1.Lines.Clear;
  I:=Runge_Kutt(FunArray, First, Last, Steps, InitArray, Res); // Вызов метода Рунге-Кутты
  ShowMessage('Код ошибки = '+IntToStr(I));
  For I:=0 to Steps do
    Memo1.Lines.Add(floattostr(Res[0,I])+' '+floattostr(Res[1,I])+' '+floattostr(Res[2,I]));
end;
end.

```

Рис. 2. Текст программы на алгоритмическом языке DELPHI

После запуска процесса моделирования на экране с заданным временным интервалом выводятся данные о величине перемещения каждого гидроцилиндра и значения давлений и расходов жидкости в напорной и сливной гидромагистралях и полостях гидроцилиндров.

В качестве контрольного примера был выполнен процесс моделирования операции перемещения на пласте с углом падения 35^0 секции крепи 1М88Н с одновременной разгрузкой гидростоек (параллельная работа трех гидроцилиндров), что соответствовало решению системы 23 дифференциальных уравнений.

Исходные данные:

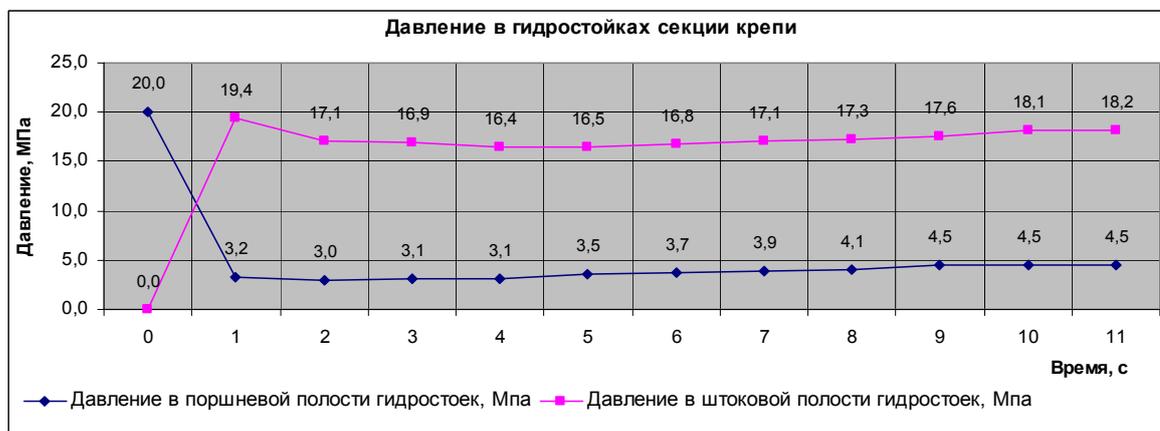
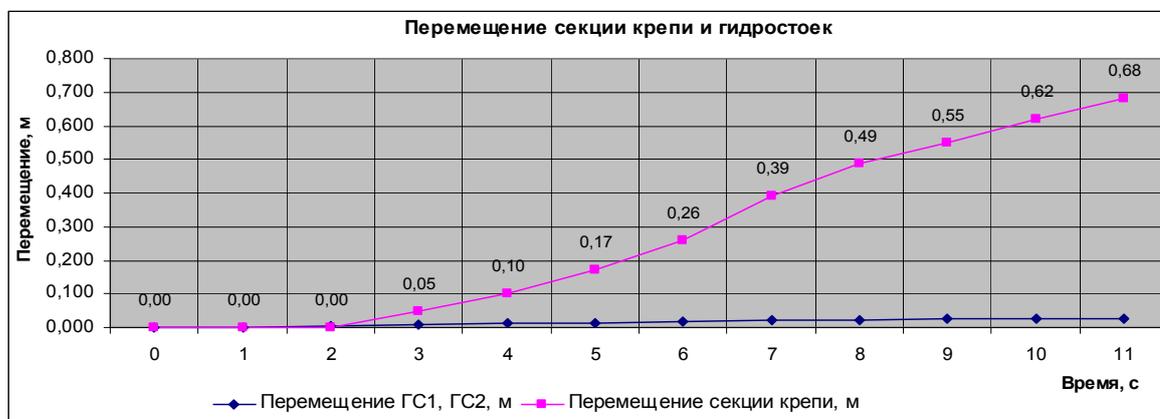
- количество гидроцилиндров – 3
- давление жидкости в напорной гидромагистрали – 20 МПа
- величина перемещения секции крепи – 0,68 м
- максимальный расход рабочей жидкости – $1,32 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$
- максимальный угол падения пласта – 35^0
- площади напорной и сливной полостей гидроцилиндров:
 - гидростойки:
 - напорная – $0,13 \text{ м}^2$;
 - сливная – $0,05 \text{ м}^2$;
 - гидродомкрат:
 - напорная – $0,08 \text{ м}^2$;
 - сливная – $0,03 \text{ м}^2$;

Для визуального отображения процесса моделирования и ввода исходных данных разработана форма, представленная на рис. 3. Нажатие кнопки «Решение системы» (Button1) приведет к расчету точек системы, которые будут выведены в текстовую область (Memo1), и построению графиков.



Рис. 3. Вид экранной формы процесса моделирования

Результаты моделирования приведены на рис. 4.



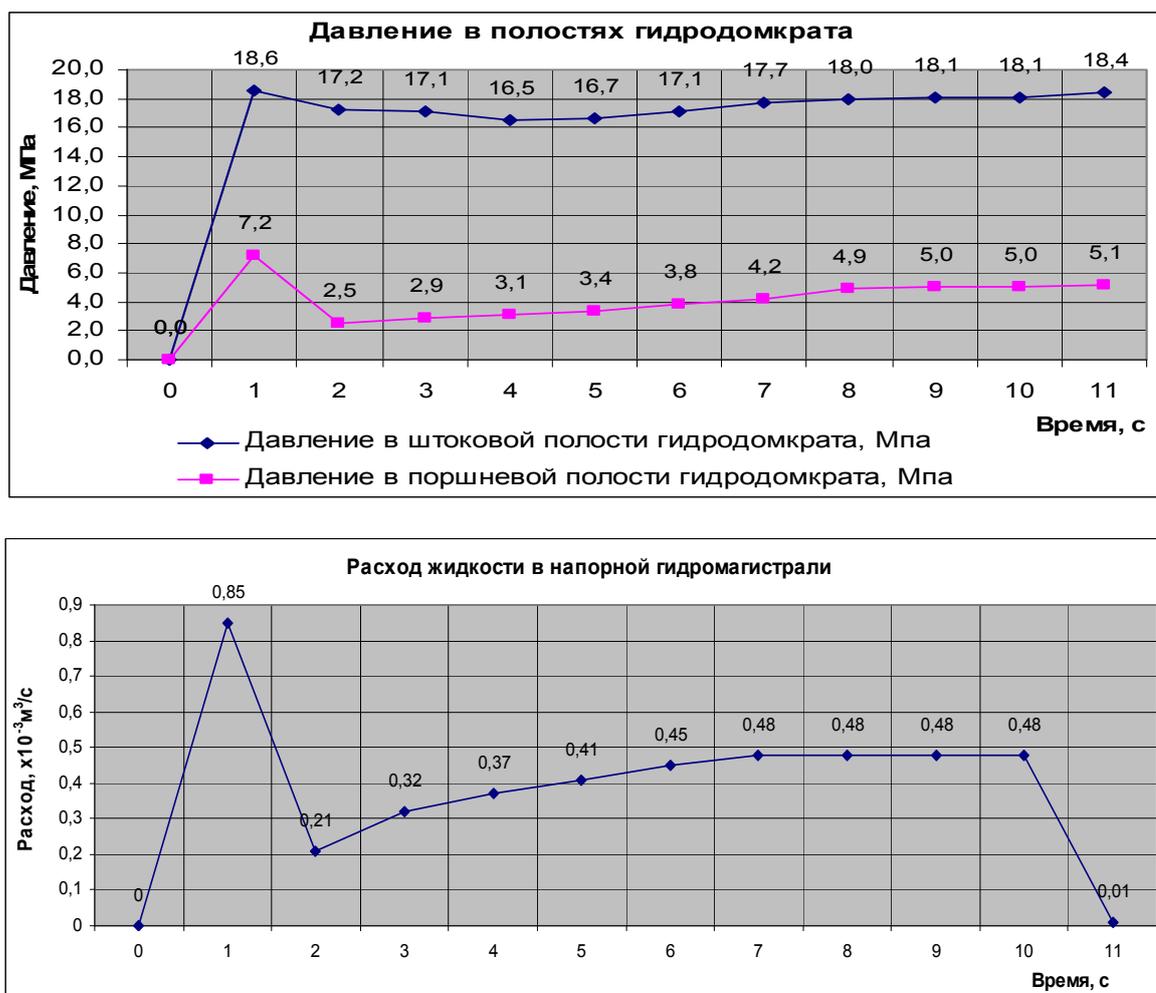


Рис. 4. Результаты моделирования перемещения секции крепи 1М88Н

В результате проведенных исследований разработана математическая модель гидросистемы механизированной крепи, учитывающая особенности перемещения секций на наклонных пластах. Для численного решения полученной системы дифференциальных уравнений на ПЭВМ предложен метод Рунге-Кутты, с внесением изменений для адаптации разработанного алгоритма и программы к особенностям работы моделируемого гидропривода.

Приведен текст разработанной программы на алгоритмическом языке DELPHI и форма для визуального отображения процесса моделирования и ввода исходных данных.

В качестве примера выполнен процесс моделирования операции перемещения на пласте с углом падения 35^0 секции крепи 1М88Н с одновременной разгрузкой гидростоек (параллельная работа трех гидроцилиндров), что соответствовало решению системы 23 дифференциальных уравнений.

Экспериментальными исследованиями подтверждена достоверность теоретических результатов и предложенных математических моделей. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными с учетом погрешности измерения параметров не превышает 7-15 %.

Разработанная математическая модель, алгоритм и программный комплекс включения в состав математического обеспечения системы автоматизированного проектирования гидропривода механизированных крепей (САПГМК).

Литература

1. Пономаренко Ю.Ф., Баландин А.А. Инженерная методика проектного расчета параметров гидросистемы механизированных крепей. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1981. – 22 с.
2. Расчет и конструирование гидроприводов механизированных крепей / Ю.Ф. Пономаренко, А.А. Баландин, И.Т. Богатырев и др. // Под общ. ред. Ю.Ф. Пономаренко. – М.: Машиностроение, 1961. – 327 с.
3. Хандрос А.Х., Молчановский Е.Г. Динамика и моделирование гидроприводов станков. – М.: Машиностроение, 1969. – 156 с.
4. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. – 368 с.
5. Тесленко А.И. Основы гидравлических расчетов механизированных крепей. – М.: Недра, 1974. – 216 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
7. РД 42.027-84 Крепи механизированные. Расчет устойчивости. – М.: Гипроуглемаш, 1964. – 56 с.
8. Математическое моделирование и расчет параметров систем угольных шахт и забойного оборудования: Монография / С.С. Гребенкин, В.Н. Павлыш, А.В. Агафонов, В.В. Косарев, В.В. Радченко, В.Д. Рябичев, В.П. Глебов, В.И. Зензеров, А.И. Егурнов. – Донецк: ВИК, 2007. – 263 с.
9. Основы создания и эффективной эксплуатации систем жизнеобеспечения очистного оборудования для угольных шахт: [моногр.] / [С.С. Гребёнкин, В.В. Косарев, С.Е. Топчий, Н.И. Стадник, В.И. Зензеров, В.В. Стеблин, Б.А. Перепелица, В.Н. Поповский]; под общей редакцией Гребенкина С.С. и Косарева В.В. – Донецк: «ВИК», 2009. – 375с.