

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН

Павлыш В.Н., докт. техн. наук, проф. (ДонНТУ),
Зензеров В.И., ст. препод. (ДонНТУ)

Рассматривается модифицированная математическая модель для исследования и расчета параметров гидросистемы секций механизированных крепей, обеспечивающих их устойчивую работу при выемке наклонных пластов.

Розглянуто модифікована математична модель для дослідження і розрахунку параметрів гідросистеми секцій механізованих кріплень, що забезпечують їх стійку роботу при виїмці похилих пластів.

The modified mathematical model for researching and calculation of parameters of the hydrosystem for provided of stability of the sections of mechanized supports on inclined coal stratums are considered.

Актуальность задачи. Одной из причин снижения технико-экономических показателей процесса очистной выемки наклонных пластов является потеря устойчивости и направленности передвижения механизированной крепи в системе «угольный пласт – механизированная крепь – комбайн – конвейер» (до 56% общего времени простоев крепи связано с потерей устойчивости и направленности движения секций).

Особенно актуален этот вопрос для шахт, дорабатывающих запасы шахтных полей, где применение высокопроизводительных комплексов нового поколения экономически нецелесообразно, а применение существующих комплексов очистного оборудования требует научного обоснования вводимых конструктивных изменений.

Механизированная крепь, как одна из базовых машин 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 исследования и расчета параметров при проектировании гидросистем механизированных крепей с характеристиками, обеспечивающими их эффективную эксплуатацию на наклонных пластах в условиях повышения нагрузок на очистной забой, является актуальной научной и практической задачей, имеющей отраслевое значение.

Состояние вопроса. Решение задачи исследования и расчета параметров 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 обеспечения устойчивости секций механизированных крепей при работе на наклонных угольных пластах, за счет внесения дополнительных элементов в конструкцию гидросистемы. В статье предлагается усовершенствованная математическая модель гидросистемы, позволяющая решить задачу исследования и расчета параметров гидросистемы секций механизированных крепей.

Цель и задачи работы. Целью работы является обеспечение устойчивости передвижения секций механизированных крепей на наклонных угольных пластах за счет научно обоснованной модернизации гидросистемы.

Для достижения поставленной цели решается задача разработки математической модели гидросистемы секций механизированных крепей и исследования параметров динамических процессов в гидросистеме при выполнении крепью операций технологического цикла в условиях отработки наклонных угольных пластов;

Содержание работы. В работе предлагается математическая модель гидросистемы крепи, суть которой сводится к следующему.

Система передвижения механизированной крепи представляет собой гидромеханическую систему. Так как гидросистема крепи является многосекционной, то работу всей системы можно рассматривать на примере выполнения операций технологического цикла одной секцией крепи. На рис. 1 представлена гидромеханическая схема гидросистемы механизированной крепи.

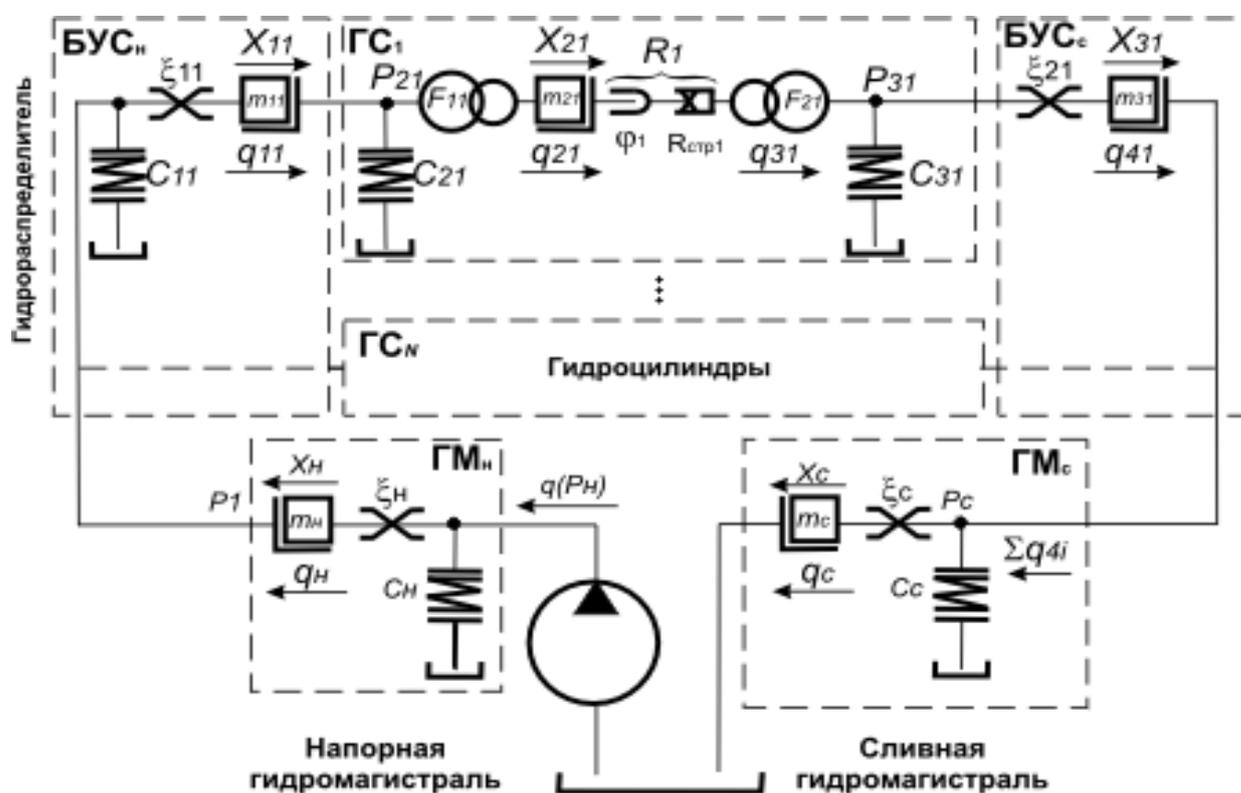


Рис. 1. Гидромеханическая схема гидросистемы механизированной крепи

При составлении схемы использованы исследования и графические обозначения, приведенные в работах [1, 2, 3].

Работа гидропривода описывается двумя типами уравнений:

- дифференциальные уравнения движения элементов системы, составленные по принципу Даламбера;
- уравнения баланса расходов, учитывающие, что жидкость в гидросистеме неразрывна и однородна.

Гидросистема крепи, схема которой приведена на рис. 1, состоит из N отдельных ветвей, моделирующих работу гидроцилиндров, и общих для всех гидроцилиндров участков напорной и сливной магистралей. На основании правила узлов и ветвей [3] составим математическую модель каждого из этих участков.

Движение рабочей жидкости от насоса до гидрораспределителя 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:

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

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. Количество уравнений математической модели зависит от количества одновременно работающих гидроцилиндров N при моделировании различных технологических операций.

В математическую модель гидросистемы механизированной крепи 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 - $C_H, C_{тр}, C_{рвд}, C_a, C_{\Sigma}, C_{2i}, C_{3i}, C_C$;
- 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 - $f_H, f_{рвд_i}^H, f_{рвд_i}^C, f_C$;
- 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. Коэффициенты упругости определяют расход на деформацию элементов гидросистемы и сжимаемость жидкости, заполняющей ее под давлением. Для металлических труб коэффициент упругости рассчитывается по формуле [4]:

$$C_{TP} = \pi \left(\frac{1-x}{8} * \frac{d^3 l_{TP}}{E_{TP} S_{TP}} + \frac{d^2 l_{TP}}{4 E_{жс}} \right), \quad (4)$$

где d, l_{TP}, S_{TP} – соответственно диаметр, длина и толщина стенок трубы;
 $E_{TP}, E_{жс}$ – объемные модули упругости материала трубы и рабочей жидкости;

x – коэффициент Пуассона.

Анализ формулы (4) показывает, что коэффициент упругости зависит от внутреннего объема трубы. Так как гидроцилиндры конструктивно выполнены из труб, то формулой (4) можно пользоваться для определения коэффициентов упругости полостей гидроцилиндров. Однако, при перемещении поршня гидроцилиндра объем напорной и сливной полостей изменяется. Следовательно, в процессе моделирования величины коэффициентов упругости полостей гидроцилиндров будут изменяться в зависимости от величины перемещения поршня X_{2i} и их необходимо рассчитывать по формулам:

- для напорной полости i -го гидроцилиндра:

$$C_{2i} = (H_{oi} + X_{2i}) \left(\frac{1 - \chi}{2} \cdot \frac{F_{1i} D_i}{E_{TP} S_{\psi i}^H} + \frac{F_{1i}}{E_{Ж}} \right), \quad (5)$$

где H_{oi} - начальное расстояние от торца до поршня i -го гидроцилиндра;
 $D_i, S_{\psi i}^H$ - диаметр и толщина стенок напорной полости i -го гидроцилиндра.

- для сливной полости i -го гидроцилиндра:

$$C_{3i} = (H_{max i} - X_{2i}) \left(\frac{1 - \chi}{2} \cdot \frac{F_{2i} d_i}{E_{TP} S_{\psi i}^C} + \frac{F_{2i}}{E_{Ж}} \right), \quad (6)$$

где $H_{max i}$ - величина хода поршня i -го гидроцилиндра;
 $d_i, S_{\psi i}^C$ - диаметр и толщина стенок сливной полости i -го гидроцилиндра.

Коэффициент упругости для рукавов высокого давления рассчитывается по формуле [4]:

$$C_{PBД} = \frac{V_{PBД}}{E_{np}}, \quad (7)$$

где E_{np} - приведенный модуль упругости, учитывающий сжимаемость жидкости и деформацию рукавов;

$V_{pвд}$ - объем рукавов высокого давления.

В качестве демпфирующего устройства на насосной станции устанавливаются гидроаккумуляторы. Коэффициент упругости гидроаккумулятора равен [5]:

$$C_a = m_a \frac{Q_a P_a^{\frac{1}{\nu}}}{\nu P_H^{\frac{1+\nu}{\nu}}}, \quad (8)$$

где m_a - число аккумуляторов, установленных в гидросистеме;

Q_a - объем газовой камеры при давлении зарядки;

P_a - давление зарядки гидроаккумулятора;

ν - показатель политропы ($\nu = 1,3 \div 1,4$).

Все элементы и узлы гидросистемы, по которым протекает жидкость, характеризуются гидравлическими сопротивлениями как местными (в заделках и ответвлениях, в сужениях, расширениях и поворотах потока), так и линейными, зависящими от протяженности каналов. Экспериментально доказано существование двух режимов установившегося движения жидкости. При малых скоростях жидкости ее частицы движутся параллельно друг другу и оси канала, не перемешиваясь. Такой режим назван ламинарным. При больших скоростях движения жидкости ее частицы движутся в направлении потока по хаотичной траектории и перемешиваются между собой. Такой режим течения жидкости назван турбулентным [2]. Для расчетов гидросистем механизированных крепей установлено, что, на основании определения числа Рейнольдса и сравнения его с критическим, режим течения жидкости является турбулентным [5]. Так как поток жидкости проходит по трубопроводам и каналам разного сечения, то при определении коэффициента гидравлического сопротивления участка гидросистемы, все коэффициенты различных местных сопротивлений приводятся к выбранной площади поперечного сечения участка по формуле:

$$\xi_i = \xi_i' \frac{\rho}{2f_i^2}, \quad (9)$$

где ξ_i' - безразмерный коэффициент местного гидравлического сопротивления, который определяется на основании экспериментальных и справочных данных для конкретного характера местного сопротивления;

ρ - плотность рабочей жидкости;

f_i - площадь поперечного сечения, по которому рассчитывается коэффициент гидравлического сопротивления.

Линейные потери давления в канале определяются по справочным данным [4, 6], либо аналитически по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{L_K}{d_K} * \frac{\rho}{2f_K^2} q^2, \quad (10)$$

где λ - коэффициент сопротивления;

L_K, d_K, f_K - соответственно длина, диаметр и площадь поперечного сечения канала;

q - расход жидкости в канале.

Моделирование работы гидросистемы секций механизированной крепи заключается в моделировании совместной работы N гидроцилиндров, количество которых зависит как от конструкции и технологии работы комплекса, так и от моделируемой технологической операции.

Выражение для определения сопротивления перемещению гидродомкратов секции крепи на основании проведенных исследований [8]:

$$\begin{aligned}
R_j = & \frac{1}{n_{20}} \left\{ \left[G \cos \alpha + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) \eta^* \frac{\sin \beta}{\cos(\beta_y - \gamma_{II})} \right] f_n + \right. \\
& + \left. \left[\sum_{i=1}^{n_1} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) K_{конси} \right] - G_{верх} \right\} (f_n + f_{KP}) + \\
& + \left\{ G_{кон} (\sin \alpha - \cos \alpha f_n) * \frac{l_Q(l_A + l_B)}{l_A^2 + l_B^2} \left(1 + \frac{L_R}{L_b}\right) - 0.5 P_p \frac{l_b}{L_b} + \sum_{i=n_3+1}^N P_{2i} F_{1i} K_{ci} \right\} * f_{TP} \Big\} + R_{ynл}
\end{aligned} \quad (11)$$

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

$R_{ynл}$ – сила трения в уплотнениях поршня и штока;

j – номер гидродомкрата передвигки: $j = n_2 + 1 \div n_3$;

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

Сопротивление перемещению гидростоек при их разгрузке равно:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{ynл} - (G_{верх} - R_{KP} - R_n) \frac{1}{n_{2c}} \quad (12)$$

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

При распоре гидростоек сопротивление перемещению равно:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{ynл} + G_{верх} \quad (13)$$

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

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{ynл} + G_{верх} + R_{KP} + R_n \quad (14)$$

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

$$R_{j=n_2+1 \div n_3} = R_{ynл} + G_{кон} \cos \alpha f_n \quad (15)$$

Полученная математическая модель отличается от ранее разработанных тем, что учтены полученные 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.

Оценка сходимости результатов экспериментальных и теоретических исследований параметров гидросистемы секций механизированных крепей при передвижении на наклонных пластах выполнена по данным моделирования процесса передвижения секций крепи 1М88Н с учетом результатов проведенных экспериментальных исследований.

На рисунках 2–7 представлены графики изменения параметров секции крепи и ее гидросистемы, построенные по результатам экспериментальных исследований и данным моделирования. Их анализ подтверждает адекватность модели для исследования процессов изменения параметров при передвижении секций механизированной крепи.

В таблице 1 приведены расчетные значения погрешности моделирования.

Таблица 1

Оценка погрешности моделирования передвижения секций крепи 1М88Н с одновременной разгрузкой гидростоек

№ п/п	$\Delta ГС$, м	$\Delta ГД$, м	$\Delta Р_{пс}$, МПа	$\Delta Р_{шс}$, МПа	$\Delta Р_{шд}$, МПа	$\Delta Р_{пд}$, МПа
1	0	0	0,50	0	0	0
2	0,0009	0,000	7,26	7,63	1,27	0,84
3	0,0025	0,004	0,70	1,13	1,06	0,26
4	0,0042	0,035	0,33	0,07	1,64	0,02
5	0,0049	0,129	0,55	0,21	0,83	0,22
6	0,0042	0,139	0,02	1,47	1,24	1,04
7	0,0028	0,130	0,18	0,41	1,17	0,76
8	0,0009	0,079	0,24	0,02	1,75	0,66
9	0,0002	0,046	0,24	0,17	1,70	0,04
10	0,0038	0,077	0,08	0,33	1,63	0,07
11	0,0036	0,045	0,16	0,66	1,63	0,15
12	0,0021	0,000	0,21	0,72	1,54	0,04
Средний процент отклонения	10,04%	8,38%	4,37%	5,51%	6,47%	4,74%

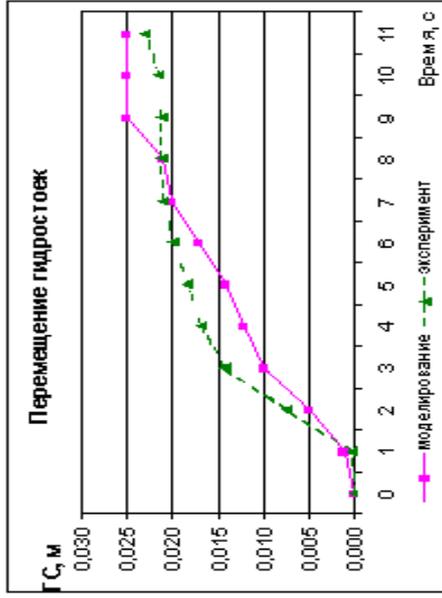


Рис. 2.

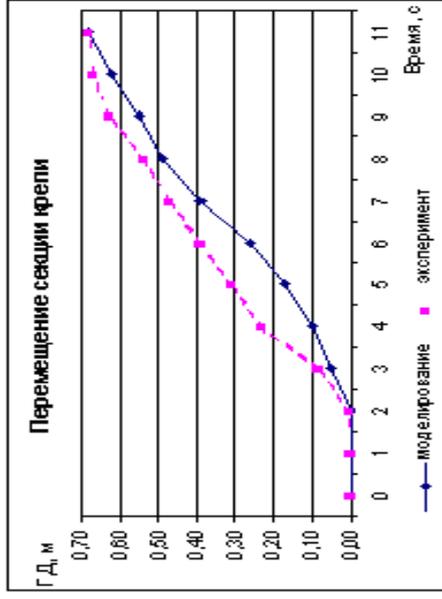


Рис. 3.

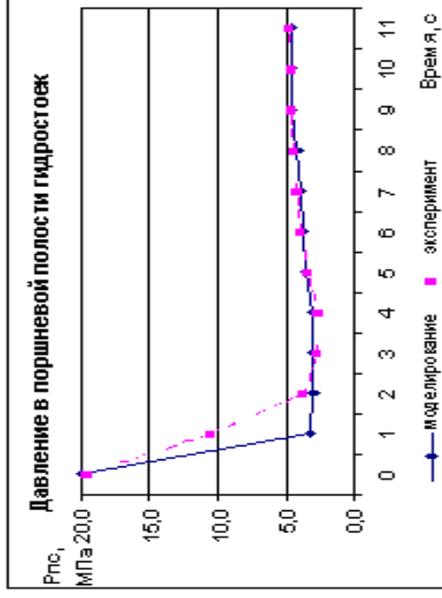


Рис. 4.

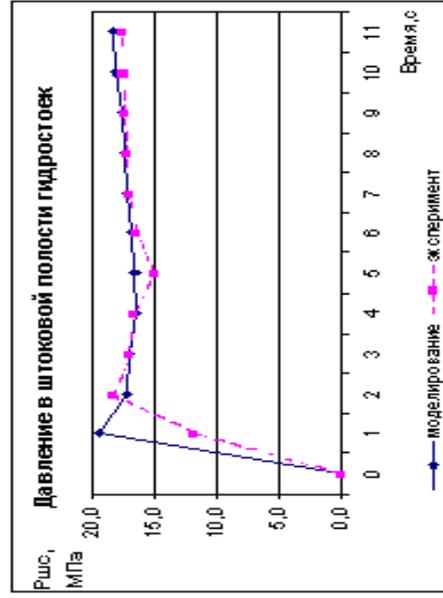


Рис. 5.

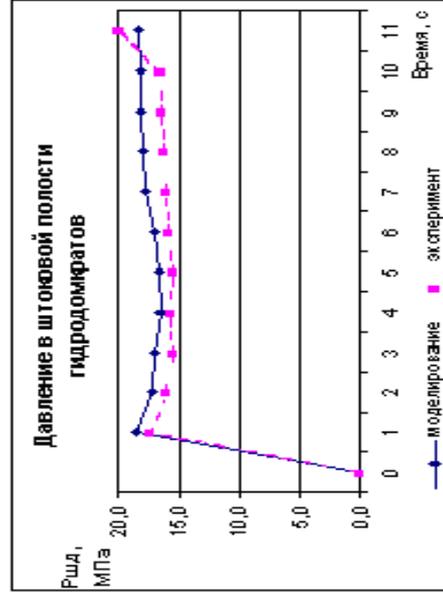


Рис. 6.

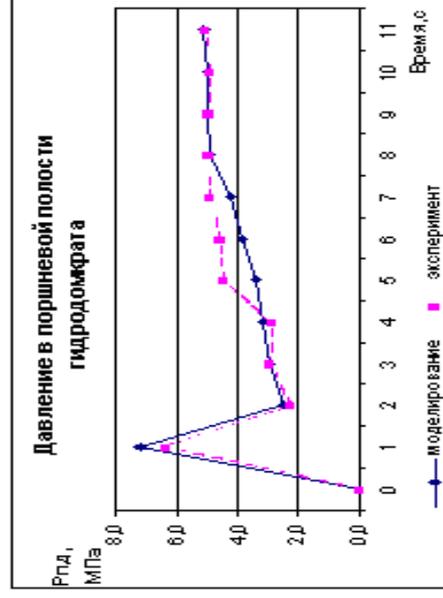


Рис. 7.

Выводы. В результате проведенных исследований разработана модифицированная математическая модель гидросистемы секций механизированной крепи, отличается от ранее существующих учетом полученных выражений для определения сопротивления перемещению гидроцилиндров при передвижении секций механизированной крепи на наклонных пластах.

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 гидросистемы механизированной крепи, а также модели ее отдельных гидроэлементов приняты институтами ДонУГИ и Донгипроуглемаш для 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.