

## ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИКИ СЕКЦИЙ И ТРЕНИЯ ПО ИХ ВНЕШНЕМУ КОНТУРУ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАГРУЗОК В СИСТЕМЕ «ЩИТОВАЯ МЕХАНИЗИРОВАННАЯ КРЕПЬ – БОКОВЫЕ ПОРОДЫ»

Гуляев К.В., канд. техн. наук, Семенченко А.К., докт. техн. наук,  
Донецкий национальный технический университет

*Рассмотрены математические модели для исследования кинематики секций щитовых крепей и рабочего процесса их взаимодействия с боковыми породами. Приведены некоторые результаты исследования влияния кинематики секций и трения на формирование нагрузок в системе «ЩМК-БП».*

*Mathematical models for research of kinematics of the units of shield supports and loadings at its interaction with wall rock are considered. Some results of research of influence of kinematics of the units and friction on its external contour on forming of the loadings in the system are shown.*

Анализ результатов моделирования рабочих процессов в системах «Щитовая механизированная крепь – боковые породы» (ЩМК-БП) с различными типами ЩМК показал, что главными факторами, определяющими закономерности формирования нагрузок в рассматриваемых системах, являются конструктивная схема секции, реализуемые при взаимодействии с БП кинематические характеристики и силовые параметры крепи и трение по внешнему контуру секций [1].

Исследования кинематических характеристик выполнялись на базе математической модели «Кинематика ЩМК»:

$$\bar{Y}_k = \bar{f}_k[\varphi_1; \bar{P}_k(\bar{P}_ч, \bar{P}_{кс})], \quad (1)$$

где  $\bar{Y}_k$  - выходной вектор, компонентами которого являются: координаты  $(X_m, Y_m)$  точки М, лежащей на оси шарнирного соединения перекрытия с ограждением; координаты  $(X_0, Y_0)$  точки 0 – мгновенного центра вращения ограждения; угловые координаты звеньев крепи  $(\varphi_2, \varphi_3, \gamma_c, \varphi_r, \gamma_{c1}, \gamma_{c2})$ ; угол передачи  $\Psi$ ; углы  $\gamma_m$  и  $\gamma_s$ , характеризующие соответственно положения касательной и нормали к траектории движения точки М;  $\bar{f}_k$  - вектор-функция преобразования входного параметра  $\varphi_1$  (угла поворота ведущего звена) в вектор  $\bar{Y}_k$ ;  $\bar{P}_k$  - вектор параметров крепи, компонентами которого являются:  $\bar{P}_ч$

- вектор конструктивных параметров четырехзвенника и  $\bar{P}_{kc}$  - вектор конструктивных параметров секции, влияющих на кинематику и учитывающий вид расчетной схемы (двух – или четырехстоечная секция ЦМК).

Установлено, что структура и параметры четырехзвенных механизмов современных исследованных ЦМК удовлетворяют условиям Грасгофа, т.е. они относятся к односторонним двухкоромысловым механизмам с шатуном – ограждением. Однако соотношения конструктивных параметров четырехзвенников исследованных ЦМК отличаются большим многообразием и определяют существенно различные виды траектории движения точки М: В1, В2, В3, В4 [1,2].

Для исследованных ЦМК отечественного и зарубежного производства составлен каталог кинематических паспортов и предложена классификация по виду траектории точки М [2].

Вид и параметры траектории движения точки М можно интегрально характеризовать переменным (в общем случае) углом  $\gamma_m$  между нормалью к почве и касательной к траектории точки М. Функция  $\gamma_m(\varphi_1)$  отражает закон изменения кривизны траектории (соотношения между горизонтальной и вертикальной компонентами смещений шарнира М и перекрытия) в пределах рабочего диапазона раздвижности крепи  $\varphi_{1B} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1H}$ .

В ЦМК с кинематикой В3 на траектории оси шарнира М присутствуют одна или две точки перегиба кривой. В точках перегиба траектории точки М  $\gamma_m(\varphi_1)=0$ , а сила трения между кровлей и перекрытием меняет знак. Следовательно, данный признак позволяет учитывать влияние вида и параметров траектории оси шарнира М и трения между кровлей и перекрытием на формирование нагрузок в системе «ЦМК-БП».

Исследование рабочих процессов в системах «ЦМК-БП» выполнялось методом имитационного моделирования с использованием модели «рабочий процесс ЦМК»:

$$\bar{Y}_H = \bar{f}_H[\bar{Y}_K; \bar{P}_H(\bar{P}_{cc}, \bar{P}_{nc})] \quad (2)$$

где  $\bar{Y}_H$  - выходной вектор, компонентами которого являются «внешние» ( $R_1, R_2, R_3, R_4, F_n, F_{oc}, R_k$ ) и внутрисекционные ( $S, T_1, T_2$ ) нагрузки;  $\bar{f}_H$  - вектор – функция преобразования входного вектора  $\bar{Y}_K$  в вектор  $\bar{Y}_H$ ;  $\bar{P}_H$  - вектор параметров секции крепи, компонентами которого являются:  $\bar{P}_{cc}$  - вектор силовых параметров секции и  $\bar{P}_{nc}$  - вектор конструктивных параметров секции, влияющих на нагрузки и



учитывающий вид расчетной схемы. Расчетные схемы для двухстоечных (ПО-[0+2]) и четырехстоечных (ПО-[2+2]) ЩМК и подробные алгоритмы моделирования кинематики по зависимости (1) и рабочего процесса - по зависимости (2) рассмотрены в работах [3,4]. В качестве основной фазы рабочего цикла рассматривался режим потенцирования крепью работы горного давления при реализации проектных силовых параметров крепи в пределах рабочего диапазона ее раздвижности. Моделирование такого режима нагружения ЩМК позволило выявить влияние особенностей кинематики секций крепи и коэффициента трения на характер изменения сил трения между кровлей и перекрытием ( $F_n$ ), между почвой и основанием ( $F_{oc}$ ) и закономерности формирования нагрузок в системе «ЩМК-БП».

В работах [3, 4] рассмотрены рабочие процессы и закономерности формирования нагрузок при взаимодействии с боковыми породами двухстоечных (ПО-[0+2]) и четырехстоечных (ПО-[2+2]) секций с различной кинематикой, но при одинаковых значениях коэффициентов трения  $\mu=0,3$ .

Вместе с тем представляют научный и практический интерес результаты исследований, характеризующие совместное влияние особенностей кинематики секций крепи и значений коэффициентов трения на характер и уровень нагрузок в изучаемых системах.

Рассмотрим этот вопрос применительно к ЩМК с секциями ПО-[0+2] с траекторией В3, обуславливающей скачкообразное изменение сил в системе, и крепи с траекторией В1, при которой происходит монотонное изменение сил в системе «ЩМК-БП» в пределах рабочих диапазонов раздвижности исследуемых крепей.

Первым представительным объектом исследования ЩМК ПО-[0+2] с кинематикой вида В3 принята в качестве примера крепь КМ500Т (обслуживаемая мощность пластов 1.25 – 2.5 м, сопротивление секции 2460 – 3180 кН, масса секции 9056 кг). Характеристики силового взаимодействия этой крепи с боковыми породами при  $\mu=0.3$  и реализации проектных силовых параметров приведены на рис.1б.

Как видно из рис.1б, границам областей 1 и 2 (отмечены пунктиром) соответствуют критические значения угла  $\varphi_1$  (мощности пласта  $H, м$ ), при которых  $\gamma_m = 0$ . При переходе через эти положения (точки перегиба на траектории оси шарнира М) происходит изменение знака сил трения  $F_n$ ,  $F_{oc}$  и значительные скачкообразные приращения внутрисекционных нагрузок  $S$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . Аналогичный характер формирования нагрузок наблюдается и при других значениях коэффици-

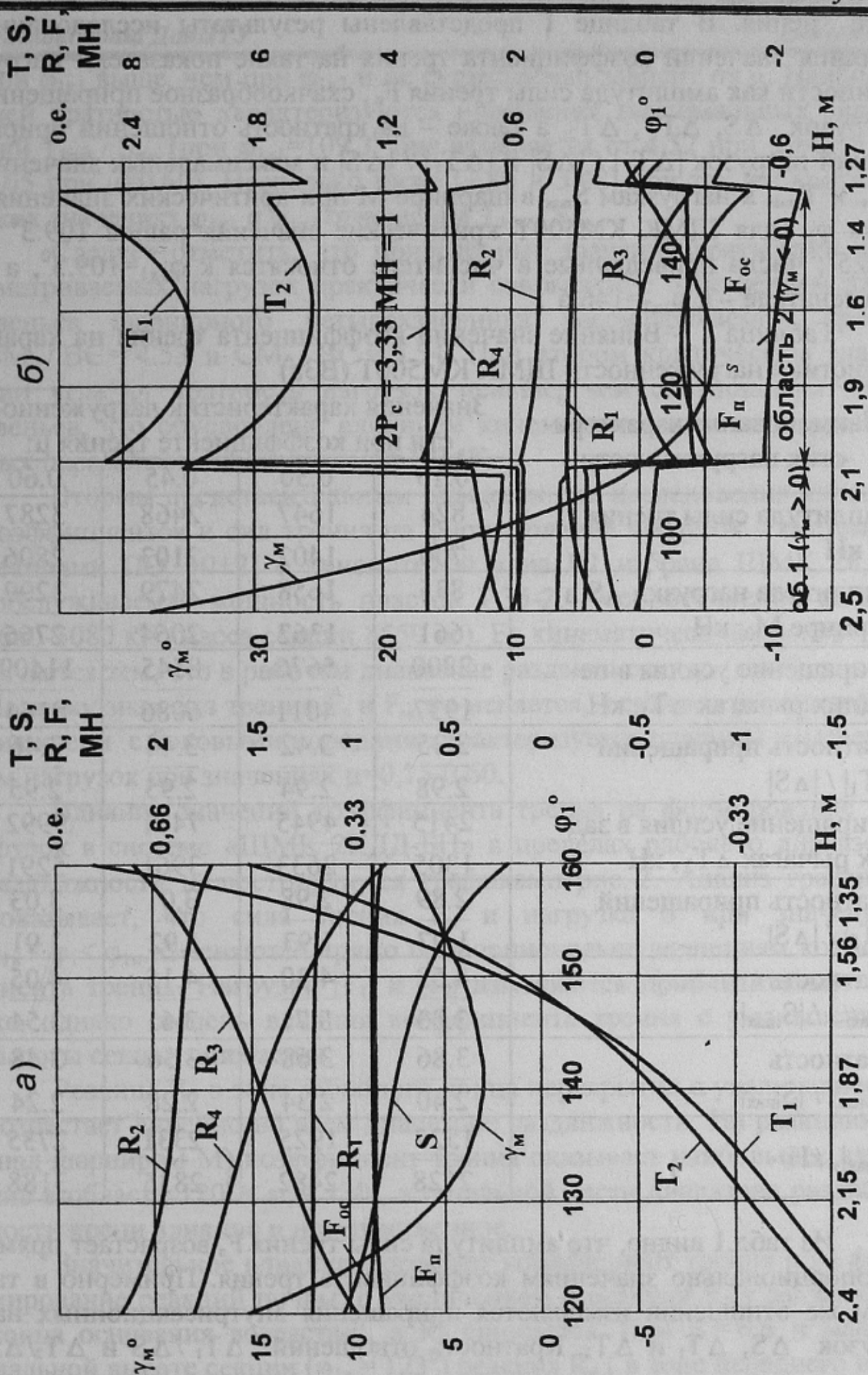


Рис. 1. – Формирование нагрузок в системах "2КДД-БП" (а) и КМ500Т-БП(б) при  $\mu = 0,3$



ента трения. В таблице 1 представлены результаты исследования влияния значений коэффициента трения на такие показатели нагруженности как амплитуда силы трения  $F_n$ , скачкообразное приращение нагрузок  $\Delta S$ ,  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ , а также – на кратность отношений приращений нагрузок  $|\Delta T_1| / |\Delta S|$  и  $|\Delta T_2| / |\Delta S|$  и максимальных значений  $T_{1max}$  и  $T_{2max}$  к нагрузкам  $S_{max}$  в шарнире М при критических значениях угла  $\varphi_1$  (для ЦМК КМ500Т критические значения равны  $109.3^\circ$  и  $146.5^\circ$ ; числа приведенные в числителе относятся к  $\varphi_{1к1}=109.3^\circ$ , а в знаменателе – к  $\varphi_{1к2}=146.5^\circ$ ).

Таблица 1 – Влияние значений коэффициента трения на характеристики нагруженности ЦМК КМ500Т (В3а)

Наименование характеристик нагруженности	Значения характеристик нагруженности при коэффициенте трения $\mu$ :			
	0.15	0.30	0.45	0.60
Амплитуда силы трения $F_n$ , кН	824	1647	2468	3287
	700	1402	2103	2806
Амплитуда нагрузки $\Delta S$ в шарнире $M_0$ , кН	835	1658	2479	3299
	661	1362	2064	2766
Приращение усилия в передних рычагах $\Delta T_1$ , кН	2800	5676	8545	11409
	1937	4011	6086	8164
Кратность приращений $ \Delta T_1  /  \Delta S $	3.35	3.42	3.44	3.46
	2.98	2.94	2.95	2.95
Приращение усилия в задних рычагах $\Delta T_2$ , кН	2415	4945	7471	9992
	1305	2633	3961	5291
Кратность приращений $ \Delta T_2  /  \Delta S $	2.89	2.98	3.01	3.03
	1.97	1.93	1.92	1.91
Кратность $ T_{1max}  /  S_{max} $	4.52	4.30	4.15	4.05
	3.83	3.71	3.61	3.54
Кратность $ T_{2max}  /  S_{max} $	3.86	3.68	3.56	3.48
	2.40	2.34	2.28	2.24
$ S_{max} $ , кН	1527	1925	2331	2735
	2128	2482	2835	3188

Из табл.1 видно, что амплитуда силы трения  $F_n$  возрастает прямо пропорционально значениям коэффициента трения. Примерно в таком же отношении изменяются приращения внутрисекционных нагрузок  $\Delta S$ ,  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ . Кратность отношений  $\Delta T_1 / \Delta S$  и  $\Delta T_2 / \Delta S$

при  $\varphi_{1к1}$  выше, чем при  $\varphi_{1к2}$  и не существенно зависит от  $\mu$ . Наибольшей кратностью характеризуются отношения максимальных значений  $T_{1max} / S_{max}$  (при  $\varphi_{1к1} = 109.3^\circ$  она изменяется от 4.52 при  $\mu = 0.15$  до 4.05 при  $\mu = 0.60$ ). Несколько ниже (3.86 и 3.48) при тех же критических значениях  $\varphi_{1к1}$  и  $\varphi_{1к2}$  отношения  $T_{2max} / S_{max}$ .

Следует отметить, что приведенные значения кратностей рассматриваемых нагрузок практически совпадают с отношением длин звеньев шарнирного четырехзвенника рассматриваемой крепи:  $BM_0 / BC = 4.53$  и  $CM_0 / BC = 3.54$ . При втором критическом значении угла  $\varphi_1$  кратность нагрузок меньше, чем соотношения длин звеньев, что обусловлено влиянием кинематических и конструктивных параметров анализируемой ЦМК.

Вторым представительным объектом для исследования влияния коэффициентов и сил трения на формирование нагрузок в системе с секциями ПО  $-[0+2]$  с кинематикой вида В1 избрана ЦМК 2КДД (обслуживаемая мощность пластов 1.35-2.4; сопротивление секции 2660-3080 кН; масса секции 8550 кг). Ее кинематический паспорт отличается тем, что в рабочем диапазоне раздвижности  $\gamma_m(\varphi_1) > 0$ , рис. 1а. Поэтому знак сил трения  $F_n$  и  $F_{oc}$  не меняется, а силовое взаимодействие крепи с боковыми породами характеризуется плавным изменением нагрузок при значениях  $\mu = 0,15-0,60$ .

Влияние значений коэффициента трения на формирование нагрузок в системе «ЦМК 2КДД-БП» в пределах рабочего диапазона раздвижности иллюстрируются графиками рис. 2. Анализ графиков показывает, что сила трения  $F_n$  и нагрузка  $S$  при значениях  $\varphi_{1в} < \varphi_1 < \varphi_{1н}$  изменяются прямо пропорционально значениям коэффициента трения. Нагрузки  $|T_1|$  и  $|T_2|$  изменяются приблизительно так же, однако степень влияния коэффициента трения с уменьшением высоты секции снижается.

Реакция  $R_1$  в зоне забойного конца перекрытия с увеличением  $\mu$  возрастает линейно во всем диапазоне раздвижности. На реакцию  $R_2$  (над шарниром М) коэффициент трения оказывает наибольшее влияние в области  $120^\circ < \varphi_1 < 130^\circ$ , в остальной части диапазона раздвижности крепи влияние  $\mu$  несущественное.

Значительное влияние оказывает коэффициент трения  $\mu$  на формирование реакций почвы: с увеличением  $\mu$  реакция  $R_3$  у завального конца основания возрастает, а  $R_4$  снижается. При  $\mu = 0.6$  и максимальной высоте секции ( $\varphi_{1в} = 123^\circ$ ) реакция  $R_4$  (в зоне переднего нос-



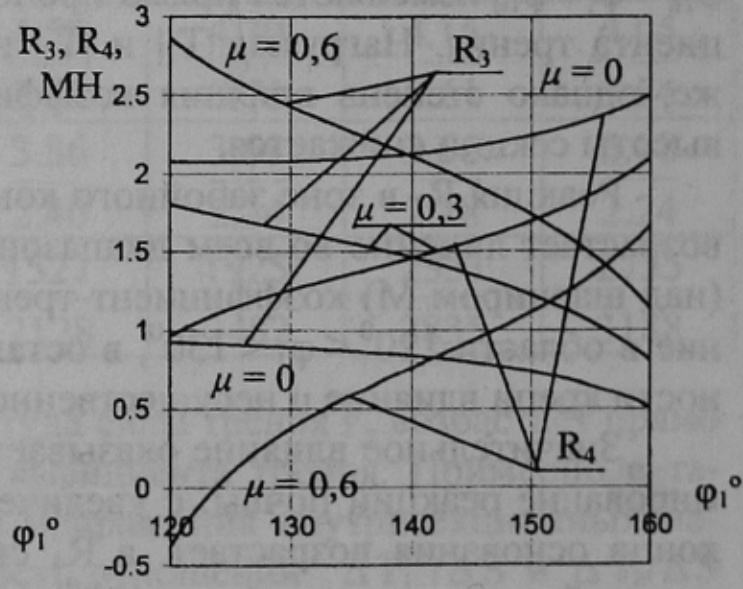
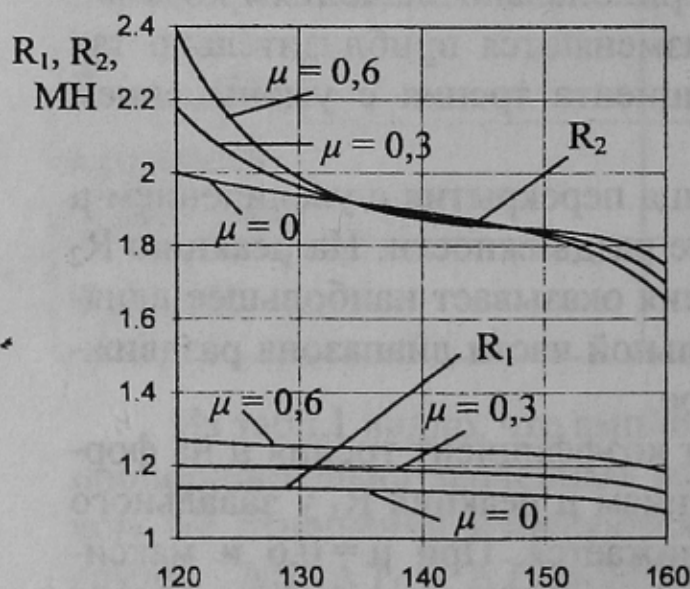
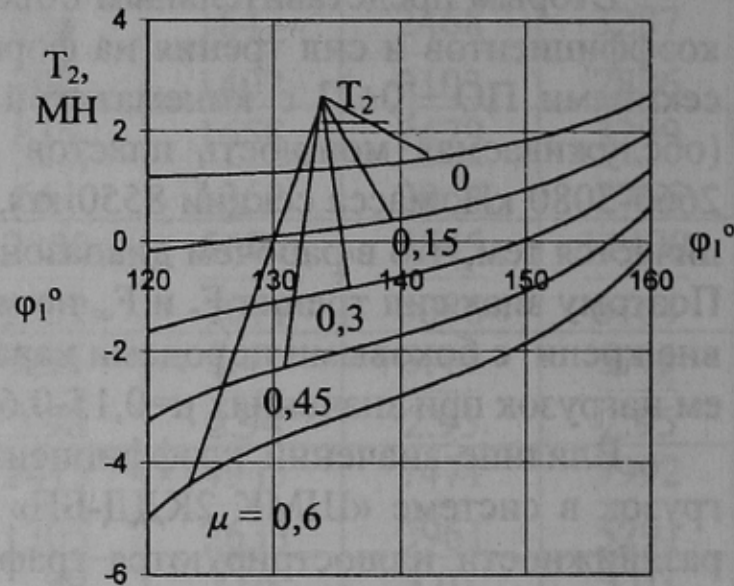
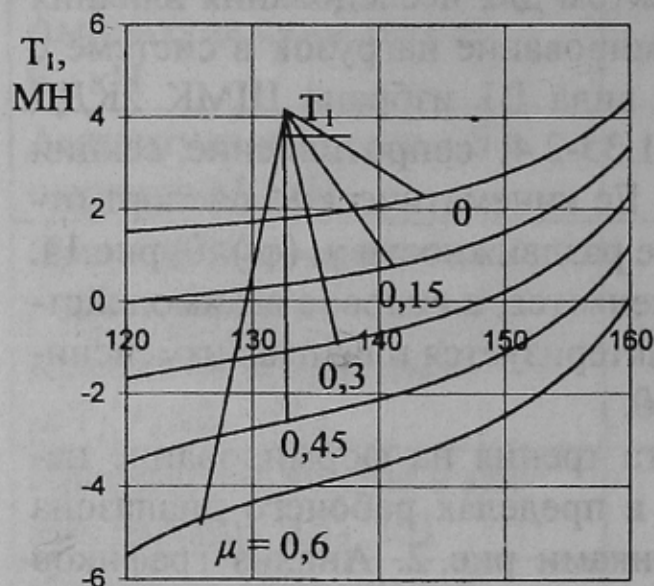
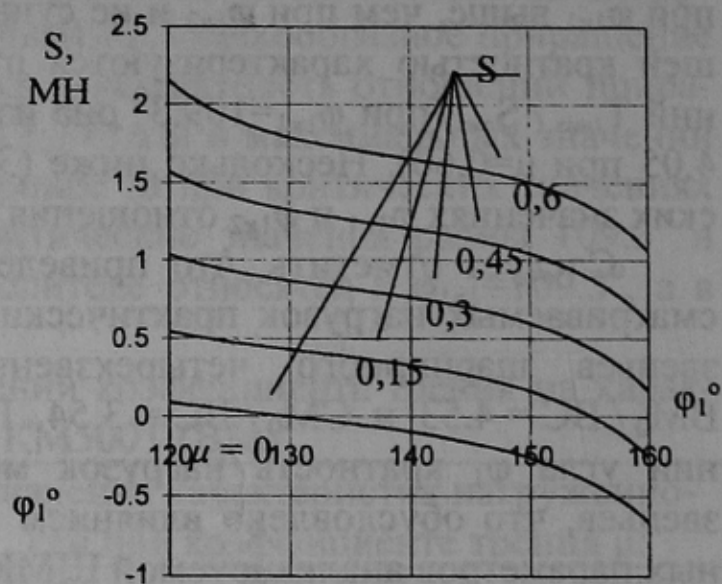
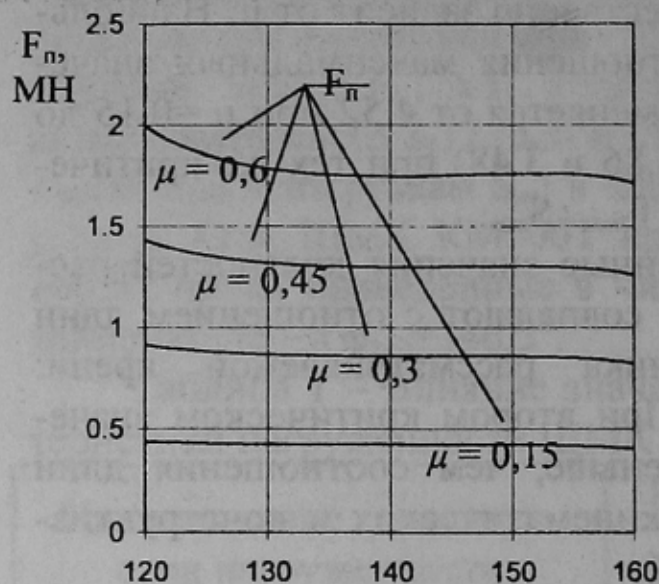


Рис. 2 – Влияние угла  $\varphi_1$  и коэффициента трения  $\mu$  на формирование нагрузок и реакций связей в системе «Крепь 2КДД - боковые породы»

ка основания) меняет знак, что дает основание прогнозировать возможность потери продольной устойчивости секции в виде «опрокидывания» на завал. При меньших значениях  $\mu$ , в том числе и при наиболее вероятном значении  $\mu = 0.3$ , соотношение между  $R_3$  и  $R_4$  свидетельствует о достаточной продольной устойчивости секций ПО  $-[0+2]$  с кинематикой вида В1б при относительном снижении реакции почвы на передний носок основания.

Приведенный анализ показывает, что при увеличении коэффициентов трения в пределах 0.15- 0.60 может наблюдаться, при прочих равных условиях, существенный рост силы трения  $F_n$  и внутрисекционных нагрузок. Вместе с тем, в пределах рабочего диапазона подвижности изменение нагрузок протекает монотонно и не оказывает отрицательного влияния на состояние кровли и на нагруженность силовых элементов секций крепей ПО  $-[0+2]$  с кинематикой В1.

Таким образом, наиболее существенное влияние коэффициентов трения на формирование внутрисекционных нагрузок характерно для крепей ПО  $-[0+2]$  с кинематическими паспортами В3, обуславливающими скачкообразное изменение направления сил трения и нагрузок в системе «ЩМК-БП». При этом в областях диапазонов подвижности, где  $\gamma_m < 0$ , нагрузки  $T_1$  и  $T_2$  могут в несколько раз превышать номинальное суммарное сопротивление гидростоек, рис. 16.

Для обеспечения надежности тяжело нагруженных силовых элементов шарнирного четырехзвенника и других деталей металлоконструкций ЩМК их прочностные расчеты должны выполняться с учетом особенностей кинематики секций и значений коэффициентов трения, соответствующих максимально возможным нагрузкам.

#### Список источников

1. Гуляев К.В. Обоснование кинематических и силовых параметров щитовых механизированных крепей поддерживающе-оградительного типа для очистных забоев. //Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Донецк, ДонГТУ.-2001.-21с.
2. Гуляев К.В., Гуляев В.Г., Семенченко А.К. Каталог кинематических паспортов щитовых крепей и их классификация. //Науковий вісник національної гірничої академії України, 1999.-№2,-с.63-66.
3. Гуляев К.В. Математическая модель для исследования взаимодействия щитовых крепей с боковыми породами //Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 16, Серія: гірничо-електромеханічна, Донецьк.-2000,с.92-101.
4. Гуляев К.В. Исследование и совершенствование щитовых механизированных крепей поддерживающе-оградительного типа // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 27, Серія: гірничо-електромеханічна, Донецьк.-2001,-с.177-193.