

АНАЛИЗ УСИЛИЙ В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ШАГАНИЯ

Н. М. Суслов¹, С. А. Чернухин¹, А. Е. Калянов¹

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Россия, 620144,
г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Аннотация: Экскаватор-драглайн является неотъемлемой единицей при ведении вскрышных и выемочных работ на угольных разрезах и карьерах по добыче строительных ископаемых. Использование таких машин на карьерах позволяет применять бес-транспортную технологию выемки полезного ископаемого, что в значительной мере дает возможность снизить себестоимость продукта. Мощные экскаваторы-драглайны ввиду больших масс оснащаются специальным механизмом шагания, который позволяет обеспечить низкое удельное давление на грунт как при стационарной работе, так и при перемещении машины. Самые мощные модели драглайнов оснащаются механизмом шагания с гидравлическим приводом. В данной работе исследуется анализ кинематики движения и сил, возникающих в механизме шагания гидравлического привода шагающего экскаватора. Основная цель исследования заключается в определении момента, когда возникают наибольшие усилия в тяговом и подъемном гидроцилиндре, а также определении направления и величины реакции шарнира опорного башмака в процессе выполнения шага. Для достижения этой цели используется метод построения силовых многоугольников. Полученные результаты анализа кинематики и силовых характеристик механизма шагания послужат основой для дальнейшего исследования данного механизма. Результаты исследования позволяют более подробно изучить поведение механизма шагания и оптимизировать его работу.

Ключевые слова: одноковшовый экскаватор, драглайн, механизм шагания, гидравлический привод, карьер, анализ усилий.

Для цитирования: Суслов Н. М., Чернухин С. А., Калянов А. Е. Анализ усилий в гидравлическом механизме шагания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 140–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_140.

Analysis of forces in the hydraulic walking mechanism

N. M. Suslov¹, S. A. Chernuhin¹, A. E. Kaljanov¹

¹ Ural State Mining University, Russia, 620144, Russia, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

Abstract: The excavator-dragline is an integral unit for conducting stripping and excavation work in coal mines and quarries for the extraction of construction minerals. The use of such machines in quarries allows for the application of non-transport technology for the extraction of valuable minerals, which significantly reduces the cost of the product. Powerful excavator-draglines, due to their large mass, are equipped with a special walking mechanism, which ensures low specific pressure on the ground both during stationary work and during movement. The most powerful models of draglines are equipped with a hydraulic drive walking mechanism.

The present study focuses on analyzing the kinematics of motion and forces occurring in the walking mechanism of a hydraulic-driven excavator. The main objective is to determine the moment when the highest forces occur in the traction and lifting hydraulic cylinders, as well as to determine the direction and magnitude of the reaction at the joint of the supporting shoe during the stepping process. The method of constructing force polygons is employed to achieve this goal. The obtained results of kinematic analysis and force characteristics of the walking mechanism will serve as a basis for further research on this mechanism. The findings of the study will allow for a more detailed examination of the behavior of the walking mechanism and optimize its operation.

Key words: single-bucket excavator, dragline, walking mechanism, hydraulic drive, quarry, analysis of forces.

For citation: Suslov N. M., Chernuhin S. A., Kaljanov A. E. Analysis of forces in the hydraulic walking mechanism. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):140–152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_140.

Введение

Согласно паспорту национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости», утвержденному 24 декабря 2018 по итогам заседания президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам, а также указу Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», стратегической целью всех отраслей РФ является повышение производительности труда во всех промышленных сферах, в том числе и горнодобывающей отрасли.

Основными машинами, обеспечивающими механизацию и высокую производительность труда в горной промышленности, являются экскаваторы. Среди них существенную долю занимают шагающие экскаваторы-драглайны. Эти машины играют важную роль при ведении вскрышных работ и при разработке угольных карьеров.

В настоящий момент на карьерах России задействовано более 90 единиц мощных экскаваторов-драглайнов с вместимостью ковша более 15 м³. На угольных разрезах, таких как в Куз-

бассе, по бестранспортной технологии разрабатывается до 24% вскрышных пород экскаваторами-драглайнами [1].

Работа мощных драглайнов на горных предприятиях включает периодическое перемещение в процессе продвижения забоя и более длительные переходы при изменении места работы. Поэтому оптимизация не только рабочего оборудования экскаваторов, но и механизма их передвижения имеет высокое значение для повышения их эксплуатационной производительности. Исследование анализа усилий, возникающих в механизме шагания шагающих экскаваторов, поможет определить наиболее нагруженные участки и разработать эффективные стратегии улучшения производительности и долговечности машин. Таким образом, комплексный подход к оптимизации и анализу работы экскаваторов позволит повысить эффективность горных работ и улучшить условия труда в горной промышленности [1–3].

Единственным устройством, служащим для передвижения мощных экскаваторов-драглайнов, является шагающий механизм. Наиболее эффективным и распространенным механизмом является трехопорный шагающий механизм. Применение шагающего

механизма обусловлено обеспечением низкого удельного давления на грунт при значительном весе машины. Низкое удельное давление на грунт обеспечивается за счет больших площадей опорных поверхностей механизма. При стационарной работе экскаватора опорной поверхностью, воспринимающей вес всей машины и передающей его на грунт, является опорная база. При перемещении драглайнов, оснащенных трехопорным механизмом шагания, вес машины распределяется между задней кромкой опорной базы и двумя опорными башмаками, расположенными по обе стороны от базы.

В среднем, согласно проведенным исследованиям драглайнов [4], эксплуатируемых на карьерах, на передвижение машины затрачивается от 30 до 70 минут в смену, что составляет примерно 15% от общего рабочего времени [5]. Следовательно, данное исследовательское направление является актуальным и важным и позволяет повысить эффективность работы механизма шагания, а следовательно, и эффективность использования экскаватора-драглайна в целом.

Трехопорные механизмы шагания в зависимости от типа привода разделяют на две большие группы. Существует механизм шагания с механическим приводом, где перемещение машины осуществляется за счет кривошипно-рычажной системы, и механизм шагания с гидравлическим приводом, где перемещение машины происходит за счет поочередной работы гидроцилиндров.

Механизмы шагания с кривошипно-рычажным приводом, как правило, применяются на драглайнах малой мощности. Синхронизация движения опорных башмаков происходит за счет сквозного поперечного вала, а при увеличении веса машины увеличивается

кутящий момент и нагрузка на механические части, происходит снижение жесткости кинематической связи между опорными башмаками, следовательно, возникает ситуация, когда один из башмаков достигает поверхности грунта при шагании раньше и воспринимает на себя основную нагрузку. Также к недостаткам трехопорного механизма с механическим приводом можно отнести отсутствие возможности регулировки величины шага, что может повлечь за собой невозможность дальнейшего продвижения машины по причине проскальзывания опорных башмаков.

У механизма шагания с гидравлическим приводом отсутствуют вышеперечисленные недостатки. За счет независимой работы подъемных и тяговых гидроцилиндров данный механизм может регулировать длину шага. Гидравлический привод позволяет обеспечить плавность перемещения машины и тем самым равномерно распределить усилия на все узлы механизма шагания. Металлоемкость трехопорного механизма шагания с гидравлическим приводом в среднем на 20% ниже механизма с кривошипно-рычажным приводом.

Трехопорный механизм шагания с гидравлическим приводом (*рис. 1*) состоит из опорной базы 1, двух шарнирно укрепленных на противоположных сторонах поворотной рамы 2 подъемных цилиндров 3, двух тяговых цилиндров 4, двух опорных башмаков 5, шарнирно подвешенных к цилиндрам [6].

Работа по перемещению экскаватора-драглайна, оснащенного трехопорным гидравлическим механизмом шагания, является циклической и осуществляется попеременной работой двух подъемных и двух тяговых гидроцилиндров. Процесс осуществления шага состоит

из четырех циклических операций, которые обеспечивают попеременное поднятие, передвижение и опускание машины: 1 — подача опорных башмаков; 2 — подъем базы; 3 — рабочий ход; 4 — остановка шагания [7].

На этапе подачи опорных башмаков происходит высвобождение башмаков из механических захватов, подача их в направлении движения и опускание их на поверхность грунта за счет работы подъёмных и тяговых цилиндров. Подъем базы осуществляется при помощи выдвигания плунжеров подъёмных цилиндров, которые поднимают переднюю по ходу движения машины кромку базы над грунтом на высоту, обеспечивающую требуемую длину шага. Опирается машина в этот момент происходит на два опорных башмака и заднюю кромку базы. Рабочим ходом машины обозначается непосредственное передвижение машины за счет втягивания штоков тяговых гидроцилиндров. При рабочем ходе задняя по ходу движения машины кромка базы волочится по грунту, а поднятая часть машины плавно опускается на поверхность грунта. Цикл остановки знаменуется опиранием всей поверхностью

базы машины о грунт и возвратом опорных башмаков в исходное положение после завершения перемещения машины для проведения дальнейшей экскавации грунта. Все эти этапы взаимодействия опорных башмаков, подъемных и тяговых цилиндров обеспечивают плавное и эффективное движение экскаватора-драглайна в процессе работы [8, 9].

Методы

С целью оптимального использования механизма шагания драглайна исследуется анализ усилий, возникающих в металлоконструкции механизма во время совершения шага. В рамках исследования выбран экскаватор-драглайн ЭШ-14/75, который оснащен трехопорным механизмом шагания с гидравлическим приводом. Основной задачей анализа является определение усилий, которые возникают при перемещении механизма, а также их влияние на металлоконструкцию. Экскаватор-драглайн ЭШ-14/75, произведенный УЗТМ, является объектом исследования для получения данных о возникающих усилиях в процессе шагания. Анализ результатов позво-

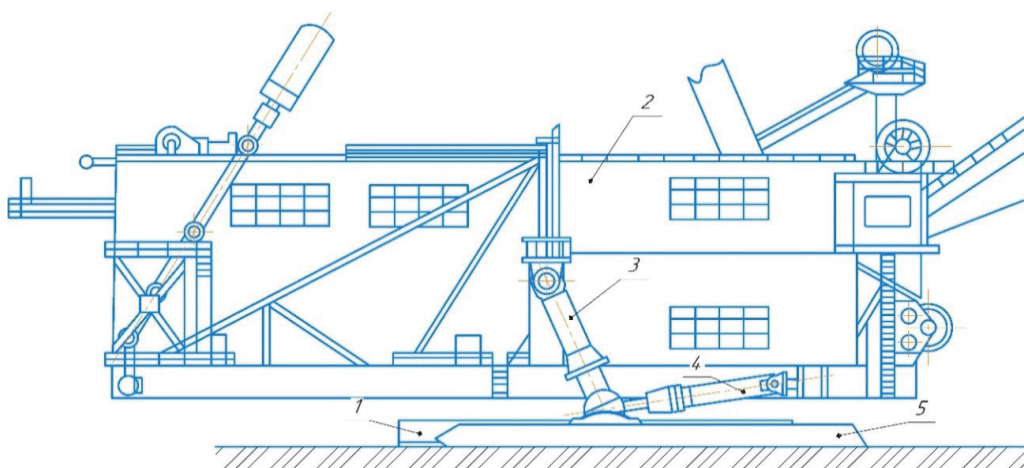


Рис. 1. Экскаватор-драглайн с трехопорным механизмом шагания
Fig. 1. Dragline excavator with a three-support walking mechanism

лит оптимизировать работу механизма шагания и обеспечить эффективное функционирование экскаватора-драглайна в целом. При известных геометрических параметрах механизма (рис. 2) [10, 11] строим схему положения в пространстве основных звеньев механизма шагания (рис. 3). В связи с тем, что угол поворота подъемных гидроцилиндров принимается равным $\alpha=24^\circ$, весь путь делится на 12 равных частей, соответствующих положению подъемного гидроцилиндра через каждые два градуса. Имея данные отметки, можно измерить величину усилия подъемного или тягового гидроцилиндров для любого расчетного положения. Направление усилий в цилиндрах определяется по схеме размеров, считая для каждого расчетного положения усилия направленными вдоль осей цилиндров.

При анализе механизма шагания экскаватора-драглайна последовательность построения силовых многоугольников выполняется в несколько этапов.

На первом этапе определяются силы, действующие на тяговый и подь-

емный гидроцилиндры в процессе шагания. Эти силы включают компоненты, связанные с собственным весом механизма, а также силы, возникающие при передвижении машины и приложении нагрузки.

На втором этапе проводится построение силовых многоугольников для каждого гидроцилиндра. Силовой многоугольник представляет собой графическую схему, на которой изображены все силы, действующие на гидроцилиндр в определенных точках хода.

Третий этап включает определение реакции шарнира опорного башмака, которая возникает в процессе шагания. Реакция шарнира определяется как сумма всех сил, приложенных к опорному башмаку.

Завершающий этап заключается в анализе полученных результатов и их использовании для дальнейшего исследования механизма шагания. Построение силовых многоугольников позволяет более подробно изучить усилия, возникающие в механизме, и оптимизировать его работу. Это имеет важное

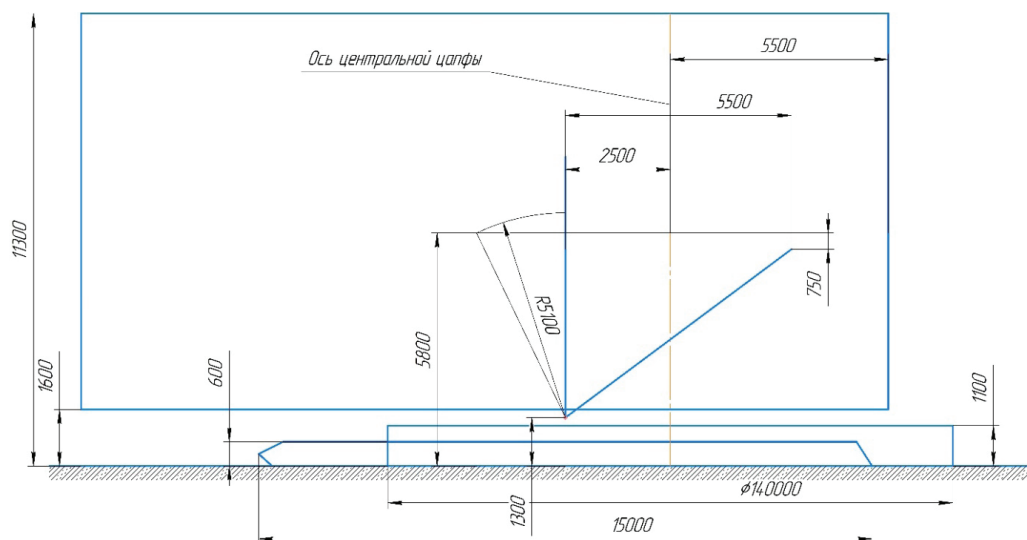


Рис. 2. Геометрические параметры механизма шагания ЭШ-14/75

Fig. 2. Geometric parameters of the stepping mechanism ЭШ-14/75

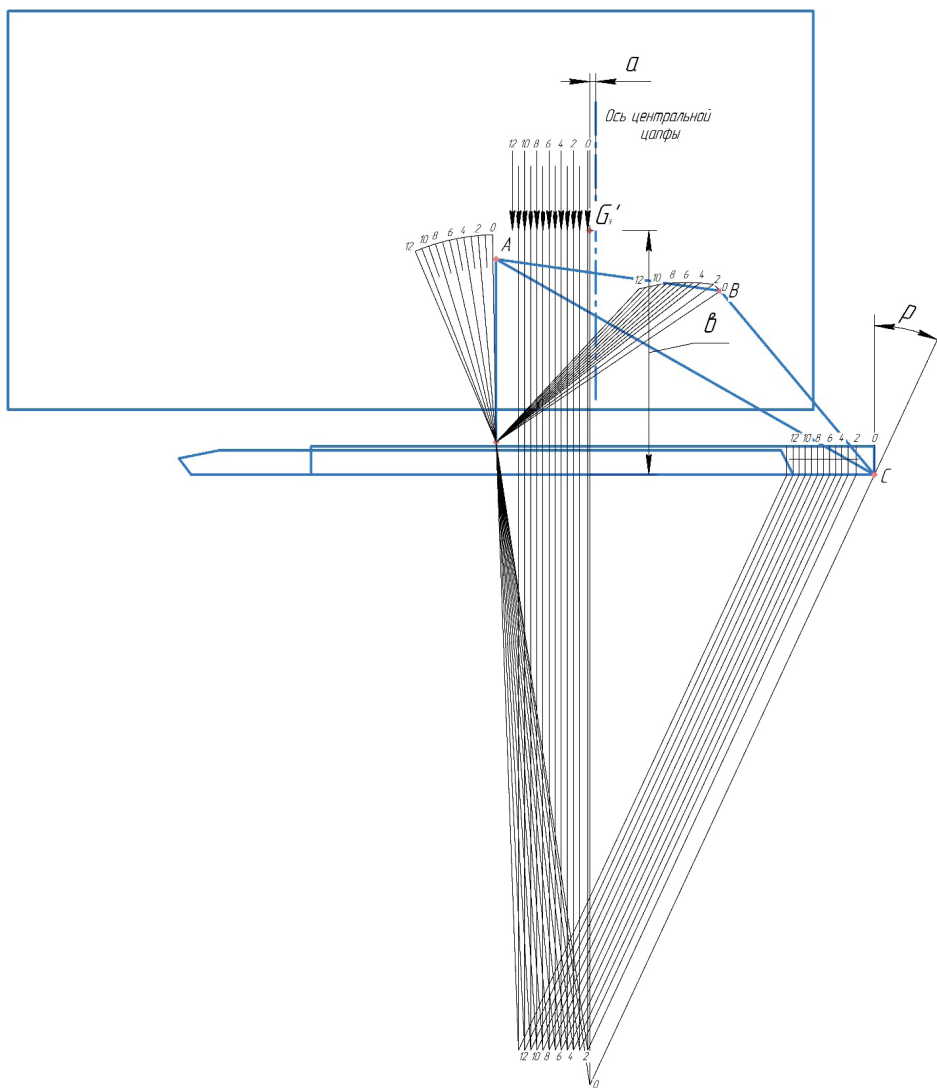


Рис. 3. Кинематическая схема перемещения драглайна
 Fig. 3. Kinematic scheme of dragline movement

значение для повышения производительности и надежности экскаватора-драглайна.

Для проведения анализа изменений усилий в механизме шагания драглайна построим силовые многоугольники механизма шагания драглайна (рис. 4), считая, что имеется жесткий треугольник с вершинами А — в центре оси подъемного цилиндра, В — в центре

оси тягового цилиндра и С — на задней кромке базы. При рабочем ходе треугольник АВС перемещается, описывая углом А дугу радиусом, равным расстоянию между центрами осей подвески подъемного гидроцилиндра и центром вращения, находящимся в центре оси нижней подвески, а угол С в этот момент скользит по горизонтальной прямой. При построении при-

нимаем, что усилия подъемного и тягового гидроцилиндров направлены вдоль их осей, а реакция базы в начале шага приложена к задней по ходу движения кромке базы. Нахождение в равновесии экскаватора обеспечивается под действием трех сил: G_3 — веса экскаватора, R — реакции базы, T — реакции шарнира опорного башмака, которые находятся в одной точке пересечения линий действия этих сил. При построении силовых многоугольников угол поворота подъемных гидроцилиндров при рабочем ходе, согласно проводимым исследованиям [5, 12], принимаем равным $\alpha=24^\circ$ и строим многоугольники в положениях, соответствующих повороту подъемного гидроцилиндра через каждые два градуса, принимая, что равным углом поворота подъемных гидроцилиндров соответствуют равные перемещения штоков тяговых гидроцилиндров, следовательно, учитывая начальное и конечное положение механизма шагания при перемещении, получается 13 силовых многоугольников. Направление реакции шарнира опорного башмака T находим путем соединения точки пересечения направления веса перемещаемой части экскаватора G_3' и направления реакции опорной базы R с центром шарнира опорного башмака [13].

Вес перемещаемой части экскаватора находится вычитанием из общего веса машины основных составляющих элементов машины, не перемещаемых в момент шага, таких как вес опорных башмаков, вес ковша, вес всех элементов гидравлической системы, и рассчитывается по формуле

$$G_3' = G_3 - G_{mp} - G_{об} - G_k - G_n - G_{ш},$$

где G_3 — вес экскаватора, $G_{об}$ — вес двух опорных башмаков, $G_{тр}$ — вес двух траверз, G_k — вес ковша, G_n — вес плунжеров двух подъемных гидро-

цилиндров, $G_{ш}$ — вес двух штоков тяговых гидроцилиндров.

Результаты

По величине и направлению веса экскаватора [14], направлению реакции опорной базы R и шарнира опорного башмака T находим величины реакций R и T . Раскладывая реакцию шарнира опорного башмака T по направлениям осей подъемного и тягового гидроцилиндров, находим величины усилий в цилиндрах P_n и $P_{тр}$. Разложив усилия цилиндров по направлению осей координат, найдем составляющие усилий $x_n, y_n, x_{тр}, y_{тр}, F, R_6$ [15, 16]. Полученные данные сводим в **таблицу**. В таблице активные усилия в цилиндрах взяты со знаком минус, пассивные усилия в цилиндрах взяты со знаком плюс.

Последовательность построения силовых многоугольников (**рис. 4**) осуществляется следующим образом [17].

Для построения первого многоугольника по величине и направлению усилий подъемного и тягового цилиндров находим величину и направление реакции шарнира опорного башмака T . Далее по величине и направлению усилий веса экскаватора G_3 и реакции шарнира опорного башмака T находим величину и направление реакции грунта R . Найдя величину и направление реакции шарнира опорного башмака T и реакции грунта R , на схеме размеров экскаватора проведем из центра шарнира опорного башмака направление реакции T и из точки C (рис. 3) положения задней по ходу движения экскаватора кромки опорной базы, направление реакции R , находим точку их пересечения. Точка пересечения определит положение центра тяжести перемещаемой части экскаватора, которое принимается при дальнейших построениях [11, 18].

Усилия в механизме шагания при перемещении ЭШ-14/75
Forces in the walking mechanism when moving ЭШ-14/75

Наименование параметра	Условное обозначение	Положение экскаватора при рабочем ходе												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Усилие в подъемных цилиндрах, кН	P_n	10199,28	10101,21	10052,18	10003,14	9856,035	9708,93	9414,72	9316,65	9218,58	9120,51	9022,44	8728,23	6668,76
Вертикальная составляющая усилия подъемных цилиндров, кН	Y_n	10199,28	10101,21	10003,14	9954,11	9807	9610,86	9218,58	9022,44	8875,34	8679,2	8434,02	7943,67	6031,31
Горизонтальная составляющая усилия подъемных цилиндров, кН	X_n	0	1442,60	441,315	735,525	1078,77	1471,05	2059,47	2353,68	2647,89	2942,1	3138,24	3579,555	2991,135
Усилие в тяговых цилиндрах, кН	P_T	-1716,23	-1569,12	-1127,81	-686,49	-98,07	490,35	1569,12	2157,54	2745,96	3334,38	3922,8	5050,61	0
Вертикальная составляющая усилия тяговых цилиндров, кН	Y_T	-931,67	-931,67	-686,49	-392,28	-68,65	343,245	1078,77	1471,05	1912,37	2304,65	2844,03	3726,66	0
Горизонтальная составляющая усилия тяговых цилиндров, кН	X_T	-1372,98	-1274,91	-833,6	-490,35	-68,65	343,25	1127,81	1569,12	1961,4	2353,68	2696,93	3334,38	0
Реакция шарнира опорного башмака, кН	T	9316,65	9218,58	9414,72	9610,86	9807	10003,14	10297,35	10591,56	10787,7	10983,84	11278,05	11670,33	6668,76
Вертикальная составляющая реакции опорной базы, кН	R_6	2795	2893,07	2647,89	2500,79	2353,68	2108,51	1814,1	1520,09	1274,91	1029,74	735,525	392,28	6031,31
Усилие сопротивления перемещению опорной базы, кН	F	1372,98	1422,02	1323,95	1274,91	1176,84	1078,77	882,63	735,53	637,455	490,35	392,28	196,14	2991,14

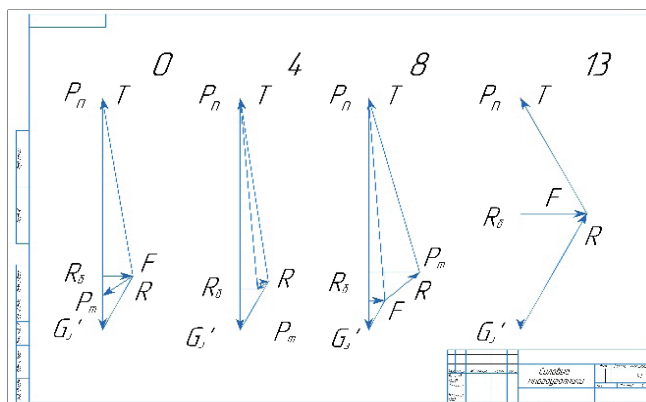


Рис. 4. Силовые многоугольники механизма шагания при перемещении ЭШ-14/75 в начальном, промежуточном и конечном положении
 Fig. 4. Power polygons of the stepping mechanism during the movement of the ЭШ-14/75 in the initial, intermediate, and final positions

Для определения величины и направления реакции шарнира опорного башмака T и реакции грунта R в многоугольниках 1–12 (см. рис. 3) проделываем аналогичные действия, как и в первом многоугольнике. Далее на схеме размеров экскаватора, проведя из центра шарнира опорного башмака направление реакции T , находим точку пересечения с линией центра тяжести перемещаемой части экскаватора. Из точки пересечения проводим линию направления опорной реакции грунта R до пересечения с линией горизонта. Последняя точка пересечения будет являться точкой приложения реакции грунта R [19–21].

Анализируя полученные результаты построения силовых многоугольников и данные трехопорного механизма шагания, сведенные в таблицу, можно сделать следующие выводы.

1. Вертикальная составляющая усилия подъемных цилиндров (Y_n) и усилие в подъемных цилиндрах (P_n) в целом постепенно уменьшается по мере продвижения экскаватора вперед (от положения 0 до положения 13). Это связано с плавным опусканием передней части машины на грунт при выполнении рабочего хода.

2. Вертикальная составляющая усилия тяговых цилиндров (Y_T) и горизонтальная составляющая усилия тяговых цилиндров (X_T), как и в целом усилие в тяговых цилиндрах (P_m), имеет отрицательные значения, что указывает на то, что тяговые цилиндры оказывают сжимающее воздействие на механизм шагания, то есть работа тяговых гидроцилиндров осуществляется в двух режимах, одну треть часть шага тяговые гидроцилиндры работают в тяговом режиме, далее гидроцилиндры переходят в тормозной режим, не давая машине бесконтрольно рухнуть на грунт, обеспечивая плавность опускания.

3. Реакция шарнира опорного башмака (T) постепенно увеличивается по мере продвижения экскаватора вперед. Это указывает на то, что опорный башмак подвергается усилиям, препятствующим его смещению.

4. Вертикальная составляющая реакции опорной базы (R_6) имеет некоторую вариацию, но в целом остается примерно постоянной во всех положениях экскаватора. Это свидетельствует о стабильной вертикальной нагрузке на опорную базу.

4. Усилие сопротивления перемещения опорной базы (F) имеет некоторую вариацию и достигает максимального значения в **положении 0** (рис. 4). Это связано с трением и сопротивлением грунта при перемещении машины.

Представленные данные позволяют оценить распределение усилий в механизме шагания экскаватора ЭШ-14/75 при выполнении рабочего хода и понять, какие усилия действуют на различные элементы механизма в каждый момент совершения шага.

Заключение

В результате проведенного исследования гидравлического механизма шагания экскаватора-драглайна установлена зависимость усилий, возникающих в механизме, от его кинематических параметров в процессе шагания.

Полученные результаты будут использованы для определения дав-

ления рабочей жидкости в полостях подъемных и тяговых гидроцилиндров, определения скорости перемещения штоков гидроцилиндров, что позволяет рассчитывать нагрузки в осях шарниров, размеры ответственных узлов и соединений.

Применение полученных результатов проведенного исследования обеспечивает научный задел для продолжения изучения гидравлического механизма шагания экскаватора-драглайна с целью прогнозирования устойчивости от опрокида драглайна при его перемещении по косогору и под уклон.

Представленные схемы позволяют прогнозировать возможность внедрения в гидравлическую схему аккумуляторов с целью повышения эффективности механизма, за счет рекуперации потенциальной энергии поднятой машины над грунтом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Злобина Е. В. Статистические модели определения рабочих параметров шагающих экскаваторов // Вестник КузГТУ. — 2010. — № 5. — С. 90–92.
2. Грабский А. А., Сергеев В. Ю., Грабская Е. П. Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов // Уголь. — 2021. — № 2. — С. 14–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.
3. Klishin S. V., Klishin V. I., Opruk G. Y. Discrete element modeling of gravity flow of broken rocks in the technology of longwall top coal caving // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 206, 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012007.
4. Pevzner L. D., Kiselev N. A. Automatic control system for walking dragline excavator digging // Mining Science and Technology (Russia). 2022, vol. 7(1), pp. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>.
5. Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Безгинов Г. Ю., Ематин Е. А. Моделирование электропотребления экскаваторов угольного разреза на основе анализа временных рядов // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2022. — № 6. — С. 38–44.
6. Liu H., Kearney M., Forbes M. Planning dragline positioning sequence with a search algorithm // IFAC-PapersOnLine. 2017, vol. 50(1), pp. 12477–12483.
7. Золотухина Н. В., Дудник А. В. Шагающие экскаваторы при добыче нерудных полезных ископаемых // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей инженерной школы САФУ, Архангельск, 20 ноября 2019 г. — Архангельск: Северный, 2019. — С. 129–132.
8. Вин З. Х., Певзнер Л. Д., Темкин И. О. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение бортовой информационной системы шагающего драглайна // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 2. — С. 190–196. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-190-196.

9. Суслов Н. М., Чернухин С. А. Совершенствование шагающих механизмов, повышающее эффективность их использования // Известия УГГУ. — 2018. — Вып. 3(51). — С. 108–113. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-108-113.

10. Пахомов Е. Г., Белый В. А., Счастливец С. А., Демьян Е. С. Определение усилий в элементах механизма шагающего экскаватора // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 15–17 октября 2020 года. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. — С. 269–273.

11. Безкоровайный П. Г., Шестаков В. С., Юсупов Т. И. Исследование нагружения рабочего оборудования гидравлического экскаватора при транспортировании ковша // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — №11-1. — С. 209–218. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_209.

12. Sahu A. R., Palei S. K. Fault analysis of dragline subsystem using Bayesian network model // Reliability Engineering & System Safety. 2022, vol. 225, 108579.

13. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С., Иванов И. Ю. Энергопотребление одноковшовых экскаваторов // Горный журнал. — 2018. — № 1. — С. 73–77. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.13.

14. Xiao S., Ma L., Dong G., Ding X. Parameters optimization of dragline working platform based on nonlinear programming // Journal of the China Coal Society. 2019, vol. 44, no. 10, pp. 3076–3084. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1462.

15. Sahu A. R., Palei S. K. Fault prediction of drag system using artificial neural network for prevention of dragline failure // Engineering Failure Analysis. 2020, vol. 113, 104542.

16. Liu H., Kearney M. P., Austin K. J. Dragline operation modelling and task assignment based on mixed-integer linear programming // Optimization and Engineering. 2018, vol. 19, pp. 1005–1036. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9386-5>.

17. Jung T., Raduenz H., Krus P., De Negri V. J., Lee J. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators // Automation in Construction. 2022, no. 135, 104046.

18. Mishra A., Palei S. K., Gupta S. Reliability analysis of dragline using equivalent aging model // Arabian Journal for Science and Engineering. 2020, vol. 45, pp. 6975–6984. DOI: 10.1007/s13369-020-04622-3.

19. Palei S. K., Das S., Chatterjee S. Reliability-centered maintenance of rapier dragline for optimizing replacement interval of dragline components // Mining, Metall Explor. 2020, vol. 37, pp. 1121–1136. DOI: 10.1007/s42461-020-00226-5.

20. Суслов Н. М., Чернухин С. А., Суслов Д. Н. Повышение энергоэффективности шагающего драглайна // Известия УГГУ. — 2020. — Вып. 3(59). — С. 131–139. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-131-139.

21. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 4. — С. 156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Zlobina E. V. Statistical models for determining the operating parameters of walking excavators. *Bulletin of KuzSTU*. 2010, no. 5, pp. 90–92. [In Russ].

2. Grabsky A. A., Sergeev V. Yu. & Grabskaya E. P. Rationale for choosing a strategy for maintenance and repair of quarry excavators. *Ugol*. 2021, no. (2), pp. 14–17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.

3. Klishin S. V., Klishin V. I., Opruk G. Y. Discrete element modeling of gravity flow of broken rocks in the technology of longwall top coal caving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 206, 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012007.
4. Pevzner L. D., Kiselev N. A. Automatic control system for walking dragline excavator digging. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7(1), pp. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>.
5. Karpenko S. M., Karpenko N. V., Bezginov G. Yu., Ematin E. A. Modeling of power consumption of coal mine excavators based on time series analysis. *Energy security and energy saving*. 2022, no. 6, pp. 38–44.
6. Haiquan Liu, Michael Kearney, Michael Forbes, Planning Dragline Positioning Sequence with A Search Algorithm. *IFAC-PapersOnLine*. 2017, vol. 50(1), pp. 12477–12483.
7. Zolotukhina N. V., Dudnik A. V. Walking excavators in the extraction of non-metallic minerals. *Engineering tasks: problems and solutions: Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of the Higher School of Engineering of NArFU, Arkhangelsk, November 20, 2019*. Arkhangelsk, Severny, 2019, pp. 129–132. [In Russ].
8. Vin Z. H., Pevzner L. D., Temkin I. O. Algorithmic and hardware support of the onboard information system of the walking dragline. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 2, pp. 190–196. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-190-196.
9. Suslov N. M., Chernukhin S. A. Improvement of walking mechanisms that increase the efficiency of their use. *News of the Ural State Mining University*. 2018, iss. 3, pp. 108–113. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-108-113.
10. Pakhomov E. G., Bely V. A., Shlyavenko S. A., Demyan E. S. Determination of forces in the elements of the mechanism of a walking excavator. *Energy-resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries. Materials of the International scientific and practical conference, Belgorod, October 15–17, 2020*. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2020, pp. 269–273. [In Russ].
11. Bezkorovayny P. G., Shestakov V. S., Yusupov T. I. Loading of hydraulic excavator implement in bucket movement. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11–1, pp. 209–218. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_209.
12. Sahu A. R., Palei S. K. Fault analysis of dragline subsystem using Bayesian network model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022, vol. 225, 108579.
13. Komissarov A. P., Lagunova V. Yu., Shestakov A. S., Ivanov I. Yu. Power consumption of single-bucket excavators. *Mining Journal*. 2018, no. 1, pp. 73–77. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.13.
14. Xiao S., Ma L., Dong G., Ding X. Parameters optimization of dragline working platform based on nonlinear programming. *Journal of the China Coal Society*. 2019, vol. 44, no. 10, pp. 3076–3084. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1462.
15. Sahu A. R., Palei S. K. Fault prediction of drag system using artificial neural network for prevention of dragline failure. *Engineering Failure Analysis*. 2020, vol. 113, 104542.
16. Liu H., Kearney M. P., Austin K. J. Dragline operation modelling and task assignment based on mixed-integer linear programming. *Optimization and Engineering*. 2018, vol. 19, pp. 1005–1036. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11081-018-9386-5>.
17. Taerang Jung, Henrique Raduenz, Petter Krus, Victor J. De Negri, Jangmyung Lee. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators. *Automation in Construction*. 2022, no. 135, 104046.
18. Mishra A., Palei S. K., Gupta S. Reliability analysis of dragline using equivalent aging model. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020, vol. 45, pp. 6975–6984. DOI: 10.1007/s13369-020-04622-3.

19. Palei S. K., Das S., Chatterjee S. Reliability-centered maintenance of rapier dragline for optimizing replacement interval of dragline components. *Mining, Metall Explor.* 2020, vol. 37, pp. 1121–1136. DOI: 10.1007/s42461-020-00226-5.

20. Suslov N. M., Chernukhin S. A., Suslov D. N. Improving the energy efficiency of a walking dragline. *News of the Ural State Mining University.* 2020, issue 3(59), pp. 131–139. [In Russ].

21. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. S., Khoroshavin S. A. Digital model of the process of rock excavation by working equipment of a quarry excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 156–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Суслов Николай Максимович — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «УГГУ», 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия, e-mail: Nikolay.Suslov@m.ursmu.ru;

Чернухин Станислав Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, ORCID iD: 0000-0003-3423-6129; ФГБОУ ВО «УГГУ», 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия, e-mail: stas_chernuhin@mail.ru;

Калянов Александр Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент кафедры горных машин и комплексов, ORCID iD: 0009-0008-69050416; ФГБОУ ВО «УГГУ», 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия, e-mail: kalyanov.alexandr@yandex.ru;

Для контактов: *Чернухин Станислав Алексеевич*, e-mail: stas_chernuhin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Suslov N. M., Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Mining machines and complexes, e-mail: Nikolay.Suslov@m.ursmu.ru;

Chernuhin S. A., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department of Mining machines and complexes, ORCID iD: 0000-0003-3423-6129, e-mail: stas_chernuhin@mail.ru (corresponding author);

Kaljanov A. E., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department of Mining machines and complexes, ORCID iD: 0009-0008-69050416, e-mail: kalyanov.alexandr@yandex.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 14.11.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 14.11.2023; accepted for printing 10.12.2023.

