

# К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОДЪЕМНЫХ СОСУДОВ КОМПЛЕКСОВ ШАХТНОГО ПОДЪЕМА

С. А. Тимухин, А. М. Плотников, Д. С. Дмитриев

## On the question of substantiating the movement speeds of conveyances of hoisting complexes

S. A. Timukhin, A. M. Plotnikov, D. S. Dmitriev

The article mentions that the main dynamical equation of mining hoisting units cannot be the basis for energy analysis of unit operations. That is why the purpose of the article is the attempt to fill this gap. Strategy to evaluate the energy efficiency of mining hoisting units operation is described based on the classical mechanics. Dependencies of energy expenditure in the function of average movement speed of conveyances for the time of the hoisting cycle were received. Evaluation of the hoisting unit blank run energetics was given. It was shown that in this operating mode no work in the hoisting system is done, however energy consumption for the retaining of the cargo takes place. In the operating mode of the hoisting unit the main power consumption is accounted for the potential component of the full energy of hoisting system, kinetic component of full energy of the system at that is inconsiderable. Analysis of received results shows low energetic efficiency of hoisting units operation during low speeds of conveyances, especially up to 5–6 m/s. The dependencies of energy consumption in the velocity function that are provided in the article are confirmed by experiments that were carried out on industrial hoisting units. Rational speed values of conveyances movement that provide minimal energy consumption during maximum possible movement speed of conveyances in bores are recommended during the operation.

Keywords: hoisting units; energy dependences; movement speed; energy consumptions.

В статье отмечено, что основное уравнение динамики шахтных подъемных установок не может являться основой для энергетического анализа работы установок. Поэтому целью статьи является попытка восполнить этот пробел. На базе классической механики изложен подход к оценке энергетической эффективности работы шахтных подъемных установок. Получены зависимости расхода энергии в функции средней скорости движения подъемных сосудов за время подъемного цикла. Дана оценка энергетики режима холостого хода подъемной установки. Показано что в этом режиме работы в подъемной системе не совершается, однако расход энергии на удержание груза имеет место. В рабочем режиме подъемной установки основной расход электроэнергии приходится на потенциальную составляющую полной энергии подъемной системы, кинетическая составляющая полной энергии системы при этом незначительна. Анализ полученных результатов показывает низкую энергетическую эффективность работы подъемных установок при малых скоростях движения сосудов, особенно до 5–6 м/с. Приведенные в статье зависимости расхода энергии в функции скорости подтверждены экспериментами, проведенными на промышленных подъемных установках. В работе рекомендуются рациональные значения скоростей движения подъемных сосудов, обеспечивающих минимальные энергетические затраты при максимально возможной скорости движения подъемных сосудов в стволах.

Ключевые слова: подъемные установки, энергетические зависимости, скорости движения, энергетические затраты.

### Введение

Развитие горнодобывающей отрасли промышленности страны на современном этапе обусловило строительство крупных шахт и рудников, разрабатывающих глубокозалегающие угольные пласты и рудные массивы. В этих условиях особенно возрастает роль подъемных комплексов горных предприятий, величина полезного груза которых достигает 50 т при высоте подъема 1200–1600 м и мощности привода подъемных установок до 5000 кВт и более.

Такие параметры характерны, например, для подъемных комплексов крупных горнодобывающих предприятий России: Норильского ГМК, Гайского ГОКа, ОАО «Севералюкситруд» и др. Энергоемкость подъемных установок (ПУ) этих предприятий составляет значительную долю в общем энергетическом балансе предприятия, что вызывает необходимость обоснования и обеспечения энергосберегающих режимов работы машин. Однако лежащее в основе теории подъемных установок известное уравнение динамики подъема в дифференциальной форме М. М. Федорова и его производные для различных систем подъема [1–7] позволяют осуществлять главным образом силовой анализ, поэтому они малоприменимы для энергетического анализа режимов работы установок. Статья представляет собой попытку восполнить этот пробел.

### Анализ энергетики подъема

С учетом основных принципов классической механики запишем в общем виде уравнение энергетического баланса подъемной установки

$$E_{\text{полн}} = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} + E_{\text{сопр}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{полн}}$ ,  $E_{\text{пот}}$ ,  $E_{\text{кин}}$  – полная, потенциальная и кинетическая энергии подъемной системы;  $E_{\text{сопр}}$  – энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивлений в подъемной системе.

С учетом того что сопротивления движению в шахтном подъеме относят к статическим сопротивлениям и поскольку их величина пропорциональна нормальному давлению, создаваемому силами тяжести, исходя из секундной производительности ПУ имеем:

$$A_c = A_v / 3600,$$

где  $A_v$  – часовая производительность подъема; запишем уравнение (1) для уравновешенной системы подъема в следующем виде:

$$E_{\text{полн}} = A_c g H_n + 0,5 A_c v_{\text{cp}}^2 + k' A_c g H_n,$$

где  $H_n$  – высота подъема;  $v_{\text{cp}}$  – средняя скорость движения подъемного сосуда в течение подъемного цикла;  $k'$  – коэффициент вредных сопротивлений;

$$E_{\text{полн}} = A_c (K g H_n + 0,5 v_{\text{cp}}^2), \quad (2)$$

где  $K$  – грузовой коэффициент ПУ,  $K = 1 + k'$ .

Анализ уравнения (2) показывает, что оно представляет зависимость энергии, т. е. способности подъемной системы совершать работу в функции средней скорости подъема.

Выполним исследование этой зависимости в диапазоне  $v_{\text{cp}} = 0–30$  м/с для следующих вариантов подъемных установок:

1.  $A_v = 400$  т/ч;  $H_n = 600$  м;  $k = 1,1$ ;
2.  $A_v = 600$  т/ч;  $H_n = 800$  м;  $k = 1,1$ ;
3.  $A_v = 800$  т/ч;  $H_n = 1000$  м;  $k = 1,1$ .

Результаты этого исследования приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. К анализу уравнения (2).

$v_{\text{cp}}$ , м/с	$E_{\text{полн}}$ , кВт			$E_{\text{полн}}$ , кВт		
	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
0	0,00	0,00	0,00	718,67	1437,33	2395,56
2	0,22	0,33	0,44	718,89	1437,67	2396,00
4	0,89	1,33	1,78	719,56	1438,67	2397,33
6	2,00	3,00	4,00	720,67	1440,33	2399,56
8	3,56	5,33	7,11	722,22	1442,67	2402,67
10	5,56	8,33	11,11	724,22	1445,67	2406,67
12	8,00	12,00	16,00	726,67	1449,33	2411,56
14	19,89	16,33	21,78	729,56	1453,67	2417,33
16	14,22	21,33	28,44	732,89	1458,67	2424,00
18	18,00	27,00	36,00	736,67	1464,33	2431,56
20	22,22	33,33	44,44	740,89	1470,67	2440,00
22	26,89	40,33	53,78	745,56	1477,67	2449,33
24	32,00	48,00	64,00	750,67	1485,33	2459,56
26	37,56	56,33	75,11	756,22	1493,67	2470,67
28	43,56	65,33	87,11	762,22	1502,67	2482,67
30	50,00	75,00	100,00	768,67	1512,33	2495,56

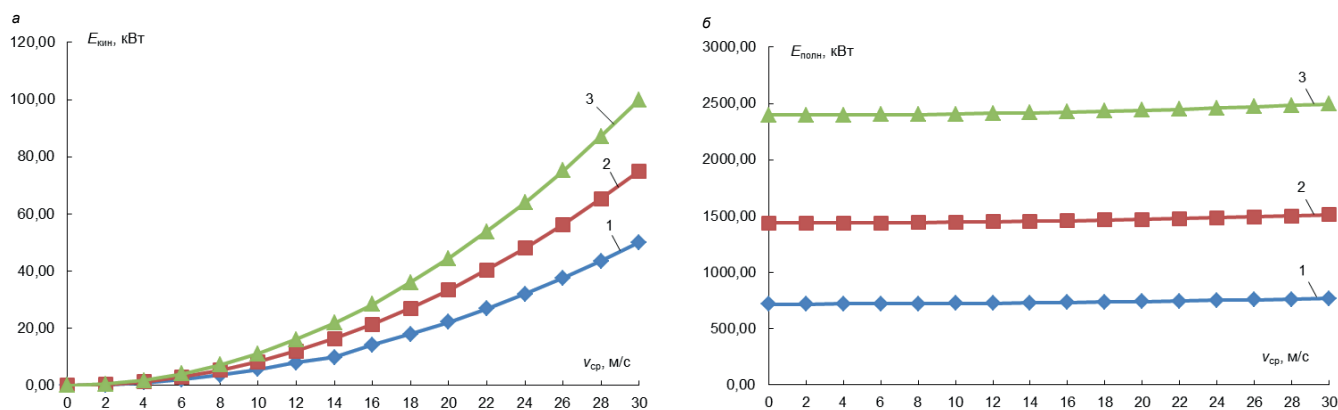


Рисунок 1. К анализу уравнения (2). а – зависимость кинетической энергии; б – зависимость полной энергии.

Как следует из табл. 1 и рис. 1, зависимости полной энергии подъемной системы в функции  $v_{ср}$  представляют собой параболы с параметром

$0,5 A_c v_{ср}^2$ , отсекающие на оси ординат величину потенциальной энергии системы  $kA_c gH_n$ . Следовательно, в режиме холостого хода ПУ полная энергия системы будет равна ее потенциальной составляющей, т. е.

$$E_{полн}^{x,x} = E_{пот}^{x,x} = QgH_{x,x}, \tag{3}$$

где  $Q$  – масса полезного груза;  $H_{x,x}$  – положение удерживаемого груза относительно горизонта загрузки.

Полный расход энергии  $W_{полн}$  за время движения  $t_{дв}$  подъемного сосуда в течение подъемного цикла

$$W_{полн} = W_{пот} + W_{кин} = t_{дв} A_c (kgH_n + 0,5 v_{ср}^2), \tag{4}$$

где  $W_{пот}$ ,  $W_{кин}$  – расход потенциальной и кинетической энергии.

Заменив в этом уравнении  $t_{дв} = H_n/v_{ср}$ , приведем его к виду

$$W_{полн} = (kA_c g H_n^2)/v_{ср} + 0,5 A_c H_n v_{ср}. \tag{5}$$

Продифференцировав данное уравнение по  $v_{ср}$  и приравняв полученное выражение к нулю, получим формулу для определения оптимальной по критерию энергозатрат величины средней скорости подъемных сосудов

$$v_{ср}^{opt} = \sqrt{2kgH_n}.$$

Однако значения  $v_{ср}^{opt}$ , найденные по этой формуле, могут представлять интерес только с теоретической точки зрения, поскольку экстремум функции  $W_{полн} = f(v_{ср})$  лежит в области нереально высоких для ПУ значений скоростей движения подъемных сосудов. Поэтому выпол-

ним анализ уравнения (4) для рассмотренных ранее вариантов подъемных установок.

Результаты данного анализа приведены в табл. 2 и на рис. 2, откуда следует, что затраты энергии на ПУ в значительной степени определяются скоростями движения подъемных сосудов.

Анализ полученных зависимостей  $W_{полн} = f(v_{ср})$  свидетельствует о низкой энергетической эффективности малых скоростей движения подъемных сосудов, особенно в диапазоне до 5–6 м/с [8, 9].

Кроме того, он показывает также значительное снижение расхода энергии за время подъемного цикла при увеличении этих скоростей, особенно в диапазоне до 12–15 м/с. При дальнейшем увеличении скоростей до 20–25 м/с снижение энергозатрат также продолжится, хотя и менее интенсивно. Как следует из табл. 2, расход электроэнергии за подъемный цикл сократится примерно в 15 раз при увеличении скорости подъема с 2 до 30 м/с за счет сокращения времени движения  $t_{дв}$  подъемных сосудов примерно во столько же раз.

Экспериментальное подтверждение этих данных дано в работе [10], где приведены результаты эксперимента по подъему груза массой 23 500 кг на высоту  $H_n = 1150$  м с разными скоростями. Как следует из этих результатов, увеличение скорости движения подъемных сосудов с 8 до 9 м/с привело к снижению расхода электроэнергии за время подъемного цикла с 230 кВт·ч до 175 кВт·ч, т. е. на 24 %.

В ходе другого эксперимента, проведенного на наклонном стволе шахты «Черемуховская» ОАО «Севералюбхимтреста»,  $Q = 9590$  кг,  $H_n = 345$  м,  $\alpha_n = 28,5^\circ$ ,  $L_n = 723$  м, где  $\alpha_n$  – угол наклона рельсового пути;  $L_n$  – длина откатки.

Было установлено, что увеличение скорости подъема с 1 до 3 м/с привело к снижению расхода электроэнергии за время подъемного цикла с 27,26 до 20,16 кВт·ч, т. е. на 26 %.

**Заключение**

Следовательно, при выборе энергосберегающих режимов работы ПУ следует ориентироваться на максимально допустимые с точки зрения возможностей технической реализации скорости движения подъемных

Таблица 2. К анализу уравнения (4).

$v_{ср}$ , м/с	$t_{дв}$ , с			$W_{пот}$ , кВт·ч			$W_{полн}$ , кВт·ч		
	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	300	400	500	59,89	159,70	332,72	59,91	159,74	332,78
4	150	200	25	29,94	79,85	166,36	29,98	79,93	166,48
6	100	1233	167	19,96	53,23	110,91	20,02	53,35	111,09
8	75	100	125	14,97	39,93	83,18	15,05	40,07	83,43
10	60	80	100	11,98	31,94	66,54	12,07	32,13	66,85
12	50	67	83	9,98	26,62	55,45	10,09	26,84	55,82
14	43	57	71	8,56	22,81	47,53	8,69	23,07	47,96
16	38	50	63	7,49	19,96	41,59	7,63	20,26	42,08
18	33	44	56	6,65	17,74	36,97	6,82	18,08	37,52
20	30	40	50	5,99	15,97	33,27	6,17	16,34	33,89
22	27	36	45	5,44	14,52	30,25	5,65	14,93	30,93
24	25	33	42	4,99	13,31	27,79	5,21	13,75	28,47
26	23	31	38	4,61	12,28	25,59	4,85	12,77	26,40
28	21	29	36	4,28	11,41	23,77	4,54	11,93	24,63
30	20	27	33	3,99	10,65	22,18	4,27	11,20	23,11

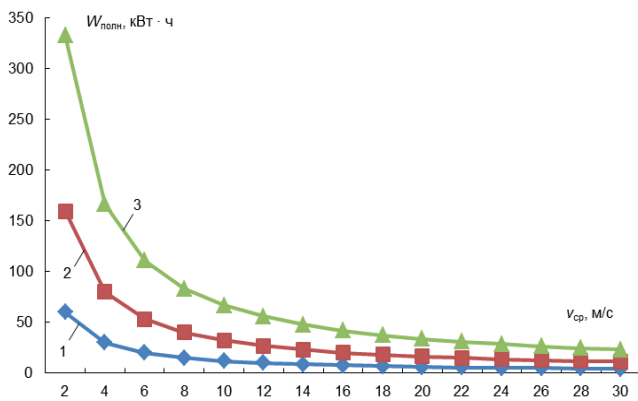


Рисунок 2. К анализу уравнения (4).

сосудов [11, 12]. Такой подход обеспечивает как высокую производительность ПУ по горной массе, так и минимально возможные энергетические затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li Z. G., Wang Z. X., Chen J. H., Zhong Y. N. Dynamic simulative study of hoisting system of mine // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 215. P. 982–985.
2. Степанов А. Г., Ольховиков Ю. П., Трифанов Г. Д. Экспериментальные исследования динамики скипового подъема // *Изв. вузов. Горный журнал*. 1982. № 3. С. 82–84.
3. Белобров В. И., Дзензерский В. А., Самуся В. И. и др. Динамика шахтных подъемных установок. Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. ун-та, 2000. 384 с.
4. Зверев В. Ю., Трифанов Г. Д., Стрелков М. А. Анализ динамических нагрузок, действующих на канаты шахтных подъемных установок // *Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования*. 2015. Т. 1. С. 26–32.
5. Трифанов Г. Д., Стрелков М. А., Зверев В. Ю. Способы минимизации динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок // *Горный журнал*. 2015. № 8. С. 92–95.
6. Zhao Y. F., Sha L., Zhu Y. Dynamic simulation analysis of the crane hoisting process based on adams // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 940. P. 132–135.
7. Плотников А. М. Применение многоканатных подъемных установок в наземном исполнении на примере ОАО «Гайский ГОК» // *Изв. УГГУ*. 2011. Вып. 25/26. С. 113–119.
8. Трифанов М. Г., Барашков Д. В. Ограничитель скорости ОС-5 // *Горное оборудование и электромеханика*. 2012. № 11. С. 18–21.
9. Малиновский А. К. К вопросу повышения надежности, безопасности и эффективности шахтных подъемных машин // *ГИАБ*. 2015. № 5. С. 313–316.
10. Дмитриев В. Т., Попов Ю. В., Дмитриев Д. С. Обоснование скорости движения сосуда шахтной подъемной установки // *Изв. вузов. Горный журнал*. 2012. № 2. С. 41–43.

11. Oskouei M. A., Awuah-Offei K. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines // *Mining Technology*. 2014. Vol. 123, №. 4. P. 175–182.
12. Belytshcko T., Hsien B. Non-linear transient finite element analysis with convected coordinates // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1973. Vol. 7. P. 255–271.

REFERENCES

1. Li Z. G., Wang Z. X., Chen J. H., Zhong Y. N. 2012, Dynamic Simulative Study of Hoisting System of Mine. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 215, pp. 982–985.
2. Stepanov A. G., Ol'khovikov Y. P., Trifanov G. D. 1982, *Ekspерименталь'nye issledovaniya dinamiki skipovogo pod'emna* [Experimental research of skip hoisting dynamics]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. No. 3, pp. 82–84.
3. Belobrov V. I., Dzenzerskiy V. A., Samusya V. I., Ilyin S. R. 2000, *Dinamika shakhtnykh pod'emnykh ustanovok* [Dynamics of mining hoisting units]. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovskiy University, 2000, 384 p.
4. Zverev V. Y., Trifanov G. D., Strelkov M. A. 2015, *Analiz dinamicheskikh nagruzok, deystvuyuschikh na kanaty shakhtnykh pod'emnykh ustanovok* [Analysis of dynamic loads, that are acting on the ropes of mining hoisting equipment]. *Aktualnye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gomoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya: materialy konferentsii* [Actual problems of increasing the efficiency and safety of mining and oilfield equipment: materials of the conference]. Vol. 1, pp. 26–32.
5. Trifanov G. D., Strelkov M. A., Zverev V. Y. 2015, *Sposoby minimizatsii dinamicheskikh nagruzok v kanatakh pod'emnykh ustanovok* [Minimization methods of dynamic loads in ropes of mining hoisting units]. *Gornyi zhurnal* [Mining journal]. No. 8. pp. 92–95.
6. Zhao Y. F., Sha L., Zhu Y. 2014, Dynamic Simulation Analysis of the Crane Hoisting Process Based on Adams. *Advanced Materials Research*. Vol. 940, pp. 132–135.
7. Plotnikov A. M. 2011, *Primeneniye mnogokanatnykh pod'emnykh ustanovok v nazemnom ispolnenii na primere OAO "Gaiskiy GOK"* [Application of multi-rope hoisting units in above ground execution on the example of JSC "Gaiskiy mining and processing combined works"] *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University]. Issue 25–26. 2011. pp. 113–119.
8. Trifanov M. G., Barashkov D. V. 2012, *Ogranichitel' skorosti OS-5. Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics]. No. 11. pp. 18–21.
9. Malinovskiy A. K. 2015, *K voprosu povysheniya nadezhnosti, bezopasnosti i effektivnosti shakhtnykh pod'emnykh mashin* [On the question of increasing the reliability, safety and efficiency of mining hoisting machinery]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. No. 5, pp. 313–316.
10. Dmitriev V. T., Popov Y. V., Dmitriev D. S. 2012, *Obosnovaniye skorosti dvizheniya sosuda shakhtnoi pod'emnoy ustanovki* [Substantiation of movement speed of the mining lifting unit vessel]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. No. 2, pp. 41–43.
11. Oskouei M. A., Awuah-Offei K. 2014, Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines. *Mining Technology*. Vol. 123(4). pp. 175–182.
12. Belytshcko T., Hsien B. 1973, Non-linear transient finite element analysis with convected coordinates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 7. pp. 255–271.

Сергей Андреевич Тимухин,  
Александр Михайлович Плотников,  
Дмитрий Сергеевич Дмитриев,  
Уральский государственный горный университет  
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Sergey Andreevich Timukhin,  
Aleksandr Mikhaylovich Plotnikov,  
Dmitriy Sergeevich Dmitriev  
Ural State Mining University  
Ekaterinburg, Russia