

Г.Д. Трифанов, В.Ю. Зверев, Е.О. Вагин, Е.В. Архипов

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В КАНАТАХ

Рассмотрено влияние кинематических параметров движения скипов шахтных подъемных установок на возникновение дополнительных динамических нагрузок в канатах, обусловленных движущим усилием на подъемной машине и упругими свойствами каната, проявляющихся в виде неравномерности движения скипа и имеющих переменный характер. Рассмотрена зависимость величины воздействующих на канат нагрузок от диаграммы скорости, по которой движется скип. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых определены динамические нагрузки, действующие на канат, при различных значениях максимальной скорости подъема и ускорений подъемной машины. Определено, что влияние величины кинематических параметров подъемных установок на возникновение и величину дополнительных динамических нагрузок в канате неоднозначно. Установлено, что при задании подъемной машине различных скоростей и ускорений амплитуда изменения усилия в канате зависит от частоты вращения подъемной машины и рывка — величины изменения ускорения в единицу времени. Увеличение амплитуды динамической составляющей усилия в канате возникает при кратности частоты вращения подъемной машины и частоты свободных колебаний скипа на канате. Возникновение колебаний и рост их амплитуды вызывается при резком изменении ускорения.

Ключевые слова: шахтная подъемная установка, скип, канат, динамические нагрузки, кинематические параметры, период работы, колебания, частота.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-103-110

Канаты шахтных подъемных установок в процессе своей эксплуатации регулярно испытывают нагрузки, не учитываемые при выборе и расчете запаса прочности каната на этапе проектирования подъемной установки. К таким нагрузкам относятся динамические усилия, возникающие в канате при каждом цикле подъема груза [1].

Основные динамические нагрузки в канате возникают на периодах разгона и замедления подъемной машины и опре-

деляются заданным скипу ускорением [2]. Дополнительное их воздействие сопровождается все периоды работы подъемной установки и обусловлено неравномерностью работы привода и упругими свойствами каната. Подъем груза при этом сопровождается колебаниями скипа в вертикальном направлении и переменным увеличением и уменьшением натяжения каната. Источниками этих явлений являются внешнее воздействие при изменении движущего усилия на

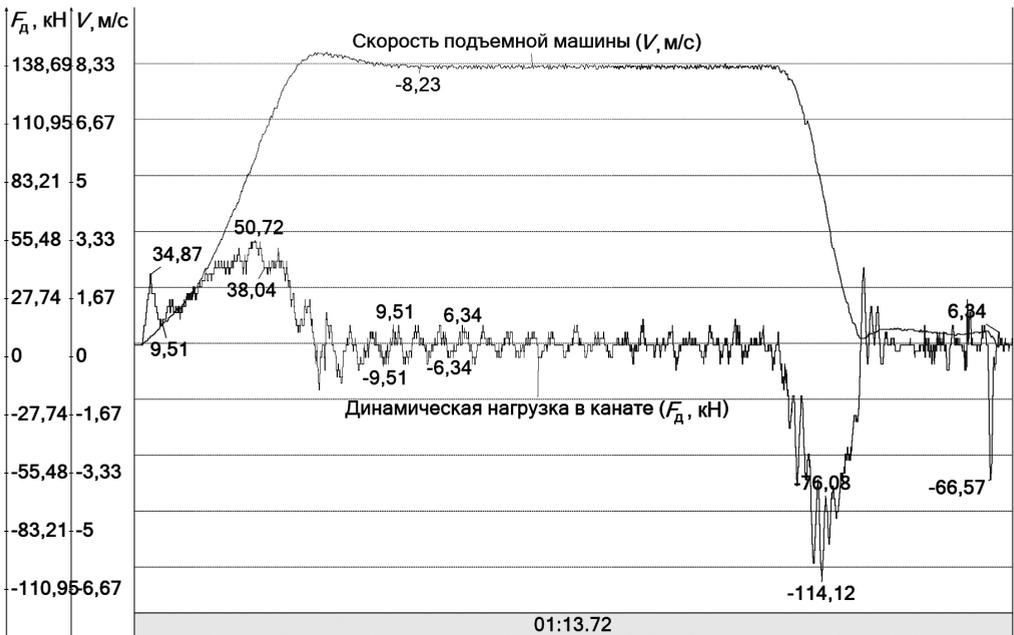


Рис. 1. Динамические нагрузки в канате, возникающие при скорости подъема 8,2 м/с

подъемной машине в периоды разгона и замедления, загрузка и разгрузка скипа. Воздействие дополнительной динамической составляющей нагрузки на канат при работе подъемной установки снижает фактический запас прочности каната и оказывает влияние на его долговеч-

ность, что отрицательно сказывается на безопасности подъема в целом [2, 3].

Таким образом, для обеспечения безопасности работы подъемной установки и увеличения срока службы каната необходимо снижение воздействия динамических нагрузок на канат [2]. Данная за-



Рис. 2. Динамические нагрузки в канате, возникающие при скорости подъема 6,5 м/с

дача может быть решена путем выбора параметров диаграммы скорости подъемной установки с учетом обеспечения плавности движения скипа и минимизации дополнительных динамических нагрузок в канате при изменении движущего усилия.

Основными кинематическими параметрами подъемной установки, определяющими движение скипа, являются:

- ускорение подъемной машины при трогании и разгоне, а так же замедлении и остановке подъемной машины;
- значение максимальной скорости в период равномерного движения.

Для оценки влияния параметров движения скипа на динамические нагрузки в канате проведены экспериментальные исследования в рамках динамического испытания системы «скип—армировка» [4, 5]. При помощи специализированной аппаратуры «Армир» записаны данные о вертикальных ускорениях скипа при различных режимах работы подъемной установки. Результатом проведения испытания и обработки полученных данных являются графики динамических нагрузок в канате, совмещенные с диаграммой скорости подъемной машины [5, 6]. При анализе графиков рассматриваются циклы работы подъемной установки при наибольшем статическом

усилии на канат, которое возникает при движении груженого скипа. Влияние кинематических параметров движения скипа на величину динамических нагрузок в канате оценивается по максимальному отклонению от среднего значения усилия в канате [5].

Полученные графики динамических нагрузок в канате, возникающих при подъеме груза в автоматическом режиме работы подъемной установки при скорости 8,2 м/с и в ручном режиме при скоростях движения скипа 6,5 и 4 м/с представлены на рис. 1–3.

Из графиков на рис. 1–3 видно, что динамические нагрузки в канате имеют переменный (циклический) характер, возникают с момента трогания и не затухают до полной остановки и стопорения подъемной машины. На графиках отмечены пиковые значения ускорений скипа, определяющие наибольшие отклонения динамической нагрузки от своего среднего значения на каждом периоде работы подъемной установки.

Амплитуды динамической нагрузки в канате при всех исследуемых режимах работы подъемной установки приведены к соответствующим периодам и представлены в табл. 1.

Частота колебаний усилия в канате обуславливает количество воздействий

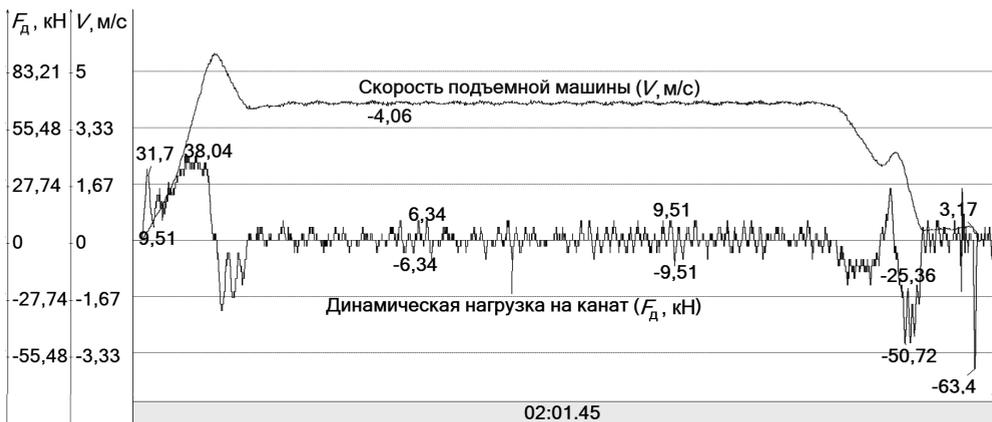


Рис. 3. Динамические нагрузки в канате, возникающие при скорости подъема 4 м/с

Таблица 1

Амплитуды колебаний динамической нагрузки в канате (кН)

Период работы подъемной установки	Автоматический режим	Ручной режим	
	скорость подъема 8,2 м/с	скорость подъема 6,5 м/с	скорости подъема 4 м/с
Трогание	12,6	9,5	11,1
Разгон	6	4,8	0
Равномерное движение	9,5 (6,3)	12,7 (9,5)	9,5 (6,3)
Замедление	19	14,3	12,7
Остановка	36,5	38	33,3

наибольшего значения динамической нагрузки на канат за соответствующий период. На характер изменения нагрузки влияют частота свободных колебаний скипа на канате и частота вращения подъемной машины.

Частота свободных колебаний скипа на канате (ω) зависит от длины подъемного каната (h) и определяется выражением [7]:

$$\omega(h) = \sqrt{\frac{E \cdot F}{h \cdot m_3}}, \quad (1)$$

где m_3 — эквивалентная масса концевого груза [8]; E — модуль упругости каната; F — площадь сечения каната.

При подъеме груженого скипа длина каната уменьшается, частота колебаний скипа не остается постоянной. График зависимости частоты свободных коле-

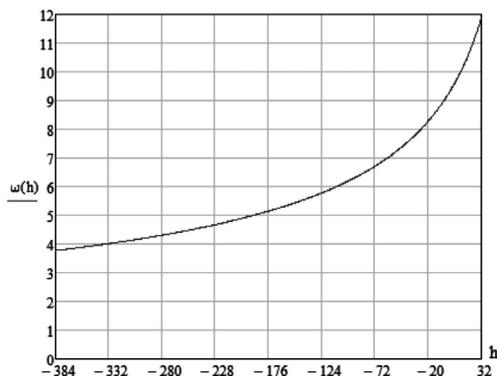


Рис. 4. Частота свободных колебаний скипа на канате (Гц)

баний скипа на канате от его положения в стволе представлен на рис. 2. На графике: -384 м — отметка загрузки скипа, 32 м — отметка разгрузки.

Для данной подъемной установки при движении скипа со скоростью 8,2 м/с частота вращения подъемной машины составляет 31,1 об/мин (3,28 Гц), при скорости 6,5 м/с — 25 об/мин (2,6 Гц), 4 м/с — 15,5 об/мин (1,6 Гц).

Учитывая величину частоты вращения подъемной машины и частоты колебаний скипа на канате можно отметить, что на периоде равномерного движения колебания динамической нагрузки в канате соответствуют частоте вращения подъемной машины.

Частота динамической нагрузки изменяется при кратности частоты свободных колебаний скипа на канате частоте вращения подъемной машины. На скоростях подъема 6,5 и 4 м/с при этом возникают биения и увеличение амплитуды динамической нагрузки [9, 10]. Таким образом, даже при меньшей скорости подъема в ручном режиме работы в период равномерного движения скипа на канат действуют динамические нагрузки, значение которых равно и даже больше величины нагрузок, возникающих при работе подъемной установки в автоматическом режиме. На остальных периодах подъема частота динамической нагрузки



Рис. 5. Динамические нагрузки в канате, возникающие в период разгона при подъеме груженого скипа в автоматическом режиме

соответствует частоте свободных колебаний скипа на канате (рис. 2) [7, 8].

Снижение максимальной скорости в 2 раза не уменьшает, и даже увеличивает динамические нагрузки в канате, возникающие в период равномерного движения [11].

Снижение динамических нагрузок в период разгона обусловлено тем, что при заданном темпе нарастания ускорения привод, не успевая развить соответствующее автоматическому режиму работы значение ускорения, заканчивает процессы разгона и замедления до момента приведения системы в динамическое равновесие. Колебания динамической нагрузки в канате не успевают возникнуть.

Зависимость динамических нагрузок в канате от кинематических параметров движения скипа в период разгона системы рассматривалась при постоянном значении максимальной скорости подъема,

но различных значениях ускорения и темпа его нарастания. Подъем груженых скипов при этом осуществлялся с максимальной скоростью равной 10,3 м/с. Так как увеличение суммарного усилия в канате возникает именно в период разгона, в ручном режиме работы подъемной установки различные ускорения задавались в периоды трогания и основного разгона подъемной машины. Графики динамических нагрузок, возникающих в период разгона в автоматическом и ручном режимах работы подъемной установки, представлены на рис. 5 и 6.

Отклонения величины динамической нагрузки в канате от среднего значения представлены в табл. 2. В ней сведены данные о возникающих в период разгона амплитудах и соответствующих им ускорениях подъемной машины.

Частота колебаний динамической нагрузки соответствует свободным колебаниям скипа на канате.

Таблица 2

Амплитуды динамических нагрузок в канате, возникающие при разгоне подъемной машины (кН)

Периоды работы подъемной установки	Автоматический режим	Ручной режим
Трогание	F , кН	14,3
	a , м/с ²	0,3
Основной разгон	F , кН	28,5
	a , м/с ²	0,8



Рис. 6. Динамические нагрузки в канате, возникающие в период разгона при подъеме грузевого скипа в ручном режиме

Из представленных графиков видно, что влияние ускорения подъемной машины на возникновение динамических нагрузок в канате не однозначное. При одном и том же значении ускорения трогания нагрузки уменьшаются в 1,5 раза. Это обусловлено тем, что в ручном режиме работы нарастание ускорения подъемной машины было задано менее интенсивно [12] — рывок при трогании не превышает $0,5 \text{ м/с}^3$. В автоматическом режиме рывок при трогании составляет $0,8 \text{ м/с}^3$. Большое значение рывка определяет разницу между движением, заданным подъемной машиной, и перемещением скипа, что влияет на возникновение дополнительных ускорений скипа в вертикальном направлении и рост динамических нагрузок в канате.

Аналогичный процесс наблюдается при основном разгоне — даже при меньшем значении ускорения, но большом рывке, в ручном режиме движения возникают большие амплитуды динамической нагрузки, а значит и увеличение суммарного нагружения каната за цикл.

При плавном наборе ускорения в ручном режиме в конце разгона, ускорение было задано равным значению ускорения в автоматическом режиме ($0,8 \text{ м/с}^2$), но его нарастание происходило с меньшим рывком. Возникающие

колебания динамической нагрузки в канате уменьшились почти в 3 раза.

В результате проведения оценки влияния кинематических параметров подъемных установок на динамические нагрузки данных можно сделать следующие выводы:

- кинематические параметры подъемных установок имеют существенное влияние на возникновение дополнительных динамических нагрузок в канатах;
- на возникновение динамических нагрузок в подъемных канатах при равномерном движении оказывает влияние максимальная скорость подъема, определяемая частотой вращения барабана подъемной машины. При кратности частоты свободных колебаний и частоты вращения подъемной машины наблюдается возникновение биений и увеличение амплитуды динамической нагрузки;
- при разгоне основные динамические нагрузки в канатах определяются ускорением, заданным подъемной машиной. На дополнительные динамические нагрузки, проявляющиеся в виде колебания усилия в канате, оказывает влияние величина изменения ускорения в единицу времени — рывок. Большое значение рывка вызывает большие амплитуды колебаний нагрузки в канате, даже при меньшем значении ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самуся В. И., Ильин С. Р., Кириченко В. Е., Ильина И. С. Динамика канатных и гидро-транспортных подъемных комплексов горных предприятий. — Днепропетровск: Изд-во НГУ, 2015. — 302 с.
2. 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.
3. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Под ред. А. П. Гусенкова; 2-е изд. — М., 1993. — 364 с.
4. Ильин С. Р., Трифанов Г. Д., Воробель С. В. Комплексные экспериментальные исследования динамики скипов рудоподъемного ствола // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 5. — С. 30–35.
5. Трифанов Г. Д., Зверев В. Ю., Стрелков М. А. Экспериментальные исследования влияния режима работы шахтных подъемных установок на динамические нагрузки в канате // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 6. — С. 21–25.
6. Трифанов Г. Д. Расшифровка и анализ записей регистраторов параметров шахтных подъемных установок: учебное пособие. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2009. — 154 с.
7. Hankus D. J. Budowa i własności mechaniczne lin stalowych. — Katowice: Główny instytut górnictwa, 1990. 256 s.
8. Степанов А. Г. Динамика машин. — Екатеринбург: УрО РАН, 1999. — 392 с.
9. Ильин С. Р., Ильина С. С., Самуся В. И. Механика шахтного подъема: монография. — Донецк: НГУ, 2014. — 247 с.
10. Johansson B., Steinarson A. A new method for automatic reduction of catenary oscillations in drum hoist installations / Hoist & haul 2015: Proceedings of the international conference on hoisting and haulage. 2015. pp. 125–140.
11. Воробель С. В., Трифанов Г. Д. Влияние диаграммы скорости на динамические нагрузки в системе «подъемный сосуд-жесткая армировка» и деформацию рамы подъемного сосуда // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 12. — С. 16–19.
12. Киричок Ю. Г., Чермалых В. М. Привод шахтных подъемных установок большой мощности. — М.: Недра, 1972. — 336 с. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Трифанов Геннадий Дмитриевич¹ — доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: 2983723@gmail.com,

Зверев Валерий Юрьевич¹ — аспирант, e-mail: zvva92@mail.ru,

Вагин Евгений Олегович² — инженер-эксперт,

Архипов Евгений Викторович² — руководитель группы экспертов — главный метролог,

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

² ООО «Региональный канатный центр».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 7, pp. 103–110.

UDC 622.673

G.D. Trifanov, V.Yu. Zverev, E.O. Vagin, E.V. Arkhipov

ESTIMATION OF INFLUENCE EXERTED BY KINEMATIC PARAMETERS OF HOISTING MACHINES ON THE DYNAMIC LOADS IN CABLES

The authors considered kinematic parameters influence of mine hoisting skips movement on the additional dynamic forces in the wire ropes. These forces due to the driving force of the lifting machine and the rope elastic properties manifested in the form of non-uniformity skip movement and having the oscillatory nature change.

In this paper, authors consider the dependence of the speed diagram, which skip moves, at the available and magnitude of forces in the wire rope. For examine of the effect of various lifting ma-

chine velocities and accelerations at the occurrence of dynamic forces in the wire rope were held experimental studies. In the course of study, the dynamic forces in the wire rope were identified for different values of maximum hoisting speed and acceleration.

According to the results of tests and the data analyzing determined that the influence of kinematic parameters value on the additional dynamic loads and its magnitude in the wire rope is ambiguous. We found that when change the speeds and accelerations of the lifting machine tasks with the amplitude of change efforts in the wire rope depends on the frequency of hoisting drum rotation and value of the acceleration change per unit time.

Increasing of the forces dynamic component in the wire rope occurs when the multiplicity of the frequency of hoisting machine rotation and the frequency of free fluctuations of a skip on the wire rope. The origin of fluctuations and the growth of their amplitudes is caused the sudden acceleration change. Due to the large value of the jerk an increasing acceleration occurs intensively that causes the difference between the movement of specified lifting machine, and the skip moving, which affects the appearance of additional accelerations in the vertical direction and increasing of dynamic forces in the wire rope.

Key words: mining hoist plant, skip, wire rope, dynamic forces, kinematic parameters, stage of work, fluctuations, frequency.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-103-110

AUTHORS

Trifanov G.D.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of Chair, e-mail: 2983723@gmail.com,

Zverev V.Yu.¹, Graduate Student, e-mail: zva92@mail.ru,

Vagin E.O.², Engineer–Expert,

Arkhipov E.V.², Leader of Expert Group – Chief Metrologist,

¹ Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia,

² LTD «Regional Rope Center», 614990, Perm, Russia.

REFERENCES

1. Samusya V.I., Il'in S.R., Kirichenko V.E., Il'ina I.S. *Dinamika kanatnykh i gidrotransportnykh pod'emnykh kompleksov gornykh predpriyatii* (Dynamics of cable and hydraulic hoisting systems in mines), Dnepropetrovsk, Izd-vo NGU, 2015, 302 p.

2. Trifanov G. D., Strelkov M. A., Zverev V. Yu. *Gornyy zhurnal*. 2015, no 8, pp. 92–95.

3. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni*. Pod red. A.P. Gusenkova; 2-e izd. (Strength calculations under time-variant stresses. Gusenkov A.P. (Ed.), 2nd edition), Moscow, 1993, 364 p.

4. Il'in S.R., Trifanov G.D., Vorobel' S.V. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011, no 5, pp. 30–35.

5. Trifanov G. D., Zverev V. Yu., Strelkov M. A. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2015, no 6, pp. 21–25.

6. Trifanov G. D. *Rasshifrovka i analiz zapisey registratorov parametrov shakhtnykh pod'emnykh ustanovok: uchebnoe posobie* (Interpretation and analysis of data of mine hoisting recorders. Educational aid), Perm, Izd-vo PGU, 2009, 154 p.

7. Hankus D.J. *Budowa i wlasnosci mechaniczne lin stalowych*. Katowice: Glówny instytut górnictwa, 1990. 256 s.

8. Stepanov A. G. *Dinamika mashin* (Dynamics of machines), Ekaterinburg, UrO RAN, 1999, 392 p.

9. Il'in S.R., Il'ina S.S., Samusya V.I. *Mekhanika shakhtnogo pod'ema: monografiya* (Mine hoist dynamics), Donetsk, NGU, 2014, 247 p.

10. Johansson B., Steinarson A. A new method for automatic reduction of catenary oscillations in drum hoist intllations. *Hoist & haul 2015: Proceedings of the international conference on hoisting and haulage*. 2015. pp. 125–140.

11. Vorobel' S. V., Trifanov G. D. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011, no 12, pp. 16–19.

12. Kirichok Yu. G., Chermalykh V. M. *Privod shakhtnykh pod'emnykh ustanovok bol'shoy moshchnosti* (Heavy-duty drive of mine hoisting), Moscow, Nedra, 1972, 336 p.