

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-296-306>
УДК 539.3;539.87,51-74;622.6

Оригинальная статья

**М. А. Журавков¹, М. А. Николайчик¹, Н. М. Климкович¹,
И. Н. Карпович^{1*}, И. В. Морочковский²**

¹Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030, Минск, Республика Беларусь

²ООО «Проектирование горнорудных предприятий»,
пр. Независимости 169, 220024, Минск, Республика Беларусь

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
НАПРАВЛЯЮЩИХ ШАХТНОГО СТВОЛА С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ
ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ**

Аннотация. Рассматривается задача контактного взаимодействия роликов клети (лифта) шахтного подъемного комплекса с направляющими проводниками при эксплуатации системы лифтоподъемника в вентиляционном стволе с учетом динамики движения воздушных потоков. Изучено влияние различных режимов работы вентиляционной установки, а также движения клети и противовеса на параметры контактного взаимодействия, возникающего между роликами клети и направляющими проводниками. Разработана численная модель контактного взаимодействия роликов клети с шахтными направляющими проводниками на основе метода конечных элементов. Построенная конечно-элементная модель позволяет производить оценку напряженно-деформированного состояния конструкционных элементов направляющих устройств при различных конфигурациях силового воздействия со стороны клети, а также определять величины критических нагрузок, которые могут вызывать остаточные деформации в направляющих проводниках. Анализ результатов исследований показал, что аэродинамические силы, возникающие при эксплуатации шахтных подъемных комплексов, оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние данной геотехнической системы, что подчеркивает необходимость их учета при проектировании элементов шахтного подъемного комплекса. Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации шахтных подъемных комплексов путем оптимизации их конструкций при проектировании для минимизации напряжений в узле контакта роликов клети с шахтными направляющими проводниками, а также для разработки рекомендаций по замене направляющих устройств в условиях многоциклового воздействия со стороны роликов клети.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, ролик клети, направляющие проводники, вентиляционный ствол, механико-математическая модель, численная модель, метод конечных элементов, шахтный подъемный комплекс

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Журавков Михаил Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>, e-mail: Zhuravkov@bsu.by; Николайчик Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0003-3733-1615>, e-mail: NikolaitchikMA@bsu.by; Климкович Никита Михайлович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0009-0001-7204-1974>, e-mail: nikita.klimkovich@yandex.ru; Карпович Иван Николаевич – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0009-0003-5056-3880>, e-mail: KarpovichIN@bsu.by; Морочковский Иван Владимирович – начальник горного отдела ООО «Проектирование горнорудных предприятий», <https://orcid.org/0009-0000-2230-1494>, e-mail: ivan.morochkovski@pgrp.by

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Вклад авторов: Журавков Михаил Анатольевич – обоснование концепции исследования, формулировка цели, задачи исследования, выводов; Николайчик Михаил Александрович – создание модели исследования, постановка задачи, обобщение результатов исследования, работа с графическими материалами; Климкович Никита Михайлович – создание геометрической и конечно-элементной модели, моделирование процесса нагружения роликов; Карпович Иван Николаевич – определение нагрузок, действующих со стороны клети на ролики, редактирование текста рукописи, оформление рукописи; Морочковский Иван Владимирович – анализ и систематизация исходных и полученных в рамках исследования данных.

Для цитирования: Оценка напряженно-деформированного состояния направляющих шахтного ствола с учетом динамики воздушных потоков / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, Н. М. Климкович [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 296–306. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-296-306>

Поступила в редакцию: 22.04.2025

Доработанный вариант: 14.11.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Original article

Michael A. Zhuravkov¹, Mikhail A. Nikolaitchik¹, Nikita M. Klimkovich¹,
Ivan N. Karpovich^{*, 2}, Ivan V. Morochkovski²

¹Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus

²LLC "Design of Mining Enterprises", 169, Nezavisimosti Ave., 220024, Minsk, Republic of Belarus

ASSESSMENT OF THE MINE SHAFT GUIDES STRESS-STRAIN STATE UNDER THE ELEVATOR FORCE IMPACT CAUSED BY THE DYNAMICS OF AIRFLOW MOTION

Abstract. This study addresses the problem of contact interaction between the rollers of a mine hoist cage (elevator) and the guide conductors during the operation of a hoist system in a ventilation shaft, taking into account the dynamics of airflow. The influence of various operating modes of the ventilation system, as well as the movement of the cage and counterweight, on the parameters of the contact interaction arising between the cage rollers and guide conductors has been investigated. A numerical model of the contact interaction between the cage rollers and mine guide conductors has been developed based on the finite element method. The constructed finite element model allows for the assessment of the stress-strain state of the structural elements of the guiding devices under various configurations of force exerted by the cage, as well as for determining the magnitudes of critical loads that can cause residual deformations in the guide conductors. Analysis of the research results has shown that aerodynamic forces arising during the operation of mine hoist complexes significantly influence the stress-strain state of this geotechnical system, highlighting the necessity of accounting for them in the design of mine hoist components. The obtained results can be used to ensure the safe and failure-free operation of mine hoist complexes by optimizing their designs during the planning stage to minimize stresses in the contact node between the cage rollers and mine guide conductors, as well as to develop recommendations for replacing guide devices under conditions of multi-cycle loading from the cage rollers.

Keywords: contact interaction, elevator roller, guide rails, ventilation mine shaft, mechanical-mathematical model, numerical model, finite element method, mine shaft lifting system

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: Michael A. Zhuravkov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>, e-mail: Zhuravkov@bsu.by; Mikhail A. Nikolaitchik – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Scientific Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0003-3733-1615>, e-mail: NikolaitchikMA@bsu.by; Nikita M. Klimkovich – Junior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0009-0001-7204-1974>, e-mail: nikita.klimkovich@yandex.ru; Ivan N. Karpovich – Junior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0009-0003-5056-3880>, e-mail: KarpovichIN@bsu.by; Ivan V. Morochkovski – Head of the Mining Department at LLC "Design of Mining Enterprises", <https://orcid.org/0009-0000-2230-1494>, e-mail: ivan.morochkovski@pgrp.by

Contribution of the authors: Michael A. Zhuravkov – justification of the research concept, formulation of the research goal, objectives, conclusions; Mikhail A. Nikolaitchik – creation of the research model, task formulation, summarization of research results, work with graphical materials; Nikita M. Klimkovich – creation of the geometric and finite element model, modeling the loading process of the rollers; Ivan N. Karpovich – determination of the loads acting on the rollers from the elevator, editing the manuscript text, formatting the manuscript; Ivan V. Morochkovski – analysis and systematization of the initial and obtained data within the framework of the research.

For citation: Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Klimkovich N. M., Karpovich I. N., Morochkovskiy I. V. Assessment of the mine shaft guides stress-strain state under the elevator force impact caused by the dynamics of airflow motion. *Vestsi*

Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 296–306 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-296-306>

Received: 22.04.2025

Modified: 14.11.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Канатный транспорт входит в систему подъемного комплекса, являющегося ответственным элементом горнодобывающего предприятия с подземным способом разработки полезных ископаемых. Безопасность шахтного подъемного комплекса обеспечивается надежной и безаварийной работой многочисленных его элементов.

Подъемный комплекс представляет собой сложную систему, состоящую из множества элементов и требующую решения широкого перечня модельных задач механики, возникающих при детальном изучении состояния как отдельных элементов, так и всего комплекса в целом. Исследования по данному направлению охватывают большой диапазон фундаментальных и прикладных задач. Часть работ посвящена моделированию состояния элементов шахтного подъемного комплекса при различных условиях нагружения и эксплуатации [1; 2] в рамках концепций и подходов механики деформируемого твердого тела (см., например, [3–5]). Определенные исследования связаны с моделированием движения [6–8] и изучением колебаний системы [9; 10] с применением классических законов теоретической механики. Помимо этого, в значительном количестве работ рассматриваются процессы движения потоков воздуха в шахтном стволе [11–13] и шахте [14; 15]. Также довольно широко исследуются процессы контактного взаимодействия [16; 17] и многоциклового износа контактных пар и, в частности, роликов клети (см., например, [18–20]).

В настоящей статье рассматривается один из элементов системы «лифтоподъемник – шахтный направляющий проводник (далее – направляющая) и ролик клети» (далее – ролик). В ранее выполненных исследованиях движения клети в вентиляционном стволе установлено, что в моменты сближения клети и противовеса возникают области пониженного и повышенного давления, приводящие к появлению колебаний данного оборудования [11]. Такие колебания гасятся подпружиненными роликами клети, оказывающими силовое воздействие на шахтные направляющие. На рис. 1 приведено распределение давления в случае, когда воздушный поток направлен на встречу движению клети. Анализ картины обтекания показывает, что перед клетью формируется зона повышенного давления, которое воздействует не только на ее нижнюю поверхность,

но и передается далее на противовес. Одновременно с этим вокруг боковой части клети возникают обширные области отрицательного давления. Совместное действие этих факторов приводит к возникновению сил, оказывающих влияние на колебание клети.

Цель настоящей работы – исследование влияния аэродинамических сил, возникающих в системе при движении клети и противовеса, на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «ролики клети – шахтные направляющие». В силу отсутствия фактических данных о жесткостях пружин в роликах клети, обеспечивающих непрерывный контакт с направляющей, в работе рассмотрено несколько вариантов.

Постановка задачи. Модельная задача связана с исследованием контактного взаимодействия роликов клети с направляющей, вызванного динамикой движения воздушных потоков в шахтном стволе при движении клети и противовеса. При проведении модельных исследований рассмотрена конструкция шахтного лифтоподъемника с четырьмя ограничительными направляющими. По каждой направляющей движется набор из трех или шести роликов, расположенных с разных сторон направляющей (рис. 2).

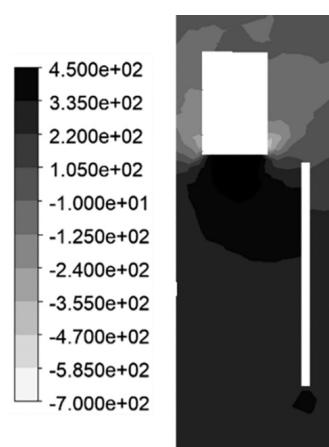


Рис. 1. Распределение давления в окрестности лифта и противовеса, Па

Fig. 1. Pressure distribution in the vicinity of the elevator and counterweight, Pa

Для исследуемой системы была выбрана направляющая таврового сечения, так как такой профиль не только используется в специализированных шахтных подъемниках, но и широко применяется в грузовых и грузопассажирских лифтах. Таким образом, предложенная методика представляет интерес для горной промышленности и для других областей, где используются направляющие таврового профиля.

Методология исследований. Построение математической модели для выполнения аналитических расчетов взаимодействия роликов и направляющих является достаточно сложным. Геометрические особенности, такие как фаски, скругления и профиль направляющих, а также вариативность жесткостей пружин, обеспечивающих непрерывный контакт роликов с направляющими, значительно усложняют процесс построения аналитических решений. Учитывая данные обстоятельства, решение модельной задачи строилось численно на основе метода конечных элементов. Численная модель (без учета трения между роликом и направляющей) была верифицирована с использованием известного аналитического решения задачи Герца [1].

В качестве материала ролика и направляющей была принята сталь, а обода ролика – резина. Физико-механические свойства перечисленных материалов приведены в табл. 1 [21; 22].

Таблица 1. Физико-механические свойства материалов
 Table 1. Physical and mechanical properties of materials

Название материала Name of the Material	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Модуль Юнга, ГПа Young's modulus, GPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	Предел текучести, МПа Yield strength, MPa	Предел прочности, МПа Ultimate strength MPa
Сталь Steel	7 850	200	0,30	250	490
Резина Rubber	1 200	0,80	0,48	–	–

Геометрическая модель направляющей. Длина направляющей составляла 4 м. Вид поперечного сечения направляющей – тавровый профиль Т89 (ГОСТ Р 71033–2023)¹. Диаметр ролика – 0,17 м, толщина слоя резины – 0,012 м, ширина слоя резины – 0,34 м. При проведении численных расчетов ролики располагались по центру направляющей. Данный случай рассматривался как наиболее неблагоприятный с точки зрения НДС в шахтной направляющей. Значение коэффициента трения между роликом и направляющей принималось равным 0,7 [23; 24].

В процессе движения ролики клети оказывают силовое воздействие на направляющую. Исследовалось НДС направляющей в случаях контакта с одним, а также двумя роликами одновременно, расположенными по нормали к направляющей или параллельно ей. Несмотря на то что конструкция имеет три или шесть роликов, одновременно на направляющую могут действовать только два (для противовеса, см. рис. 2) или четыре ролика (для клети). Ролики, закрепленные на подпружиненных кронштейнах, прижимаются к рабочей грани направляющего проводника с определенным усилием, обеспечивая непрерывный контакт.

В случае воздействия четырех роликов расстояние между их осями составляет 0,27 м. При моделировании узла контакта между противовесом и направляющей были рассмотрены следующие варианты граничных условий (рис. 3):

1) сила прикладывается только к ролику/роликам, расположенным по одной линии, перпендикулярно к направляющей по оси X – сила F_x ;

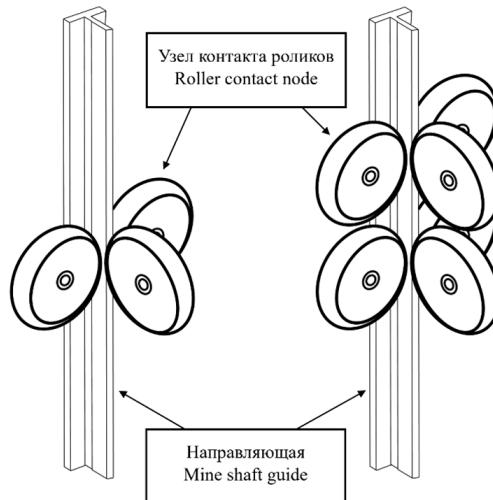


Рис. 2. Пример узла контакта трех и шести роликов с направляющей

Fig. 2. Example of the contact node of three and six rollers with the guide

¹ ГОСТ Р 71033–2023. Лифты. Направляющие для кабин и противовесов. Основные параметры и размеры. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 23 с. URL: <https://meganorm.ru/Data/816/81617.pdf>

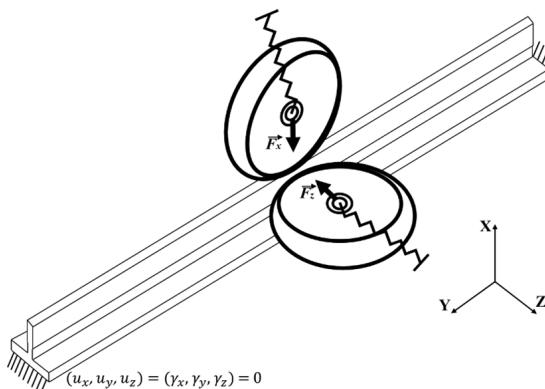


Рис. 3. Схема сил, действующих на направляющую со стороны роликов

Fig. 3. Scheme of forces acting on the guide from the rollers

широкий спектр возможных режимов движения клети и противовеса, включая различные режимы вентиляции.

Результаты исследований и их обсуждение. В моменты сближения клети и противовеса при движении в вентиляционном шахтном стволе возникают области перепада давлений, которые вызывают их колебания.

В рамках исследований моделировались различные режимы движения клети с противовесом и потока воздуха в шахтном стволе. Рассматривалось движение клети вниз и противовеса вверх, клети вверх и противовеса вниз. Стоит отметить, что вентиляция также может работать в двух режимах: поток воздуха направлен из основания шахтного ствола вверх или поток воздуха поступает в шахтный ствол с земной поверхности. Таким образом, были рассмотрены все возможные случаи динамики движения воздушных потоков.

В табл. 2 представлены результаты моделирования контактного взаимодействия ролика и направляющей для трех вариантов граничных условий с учетом сил, создаваемых подпружиненным механизмом роликов.

Оценка запаса прочности направляющей производилась по следующим критериям:

- 1) $\sigma_{int} \geq \sigma$ – критерий интенсивности напряжений, МПа;
- 2) $|\sigma_3| \geq \sigma$, $\sigma_3 < 0$ – критерий максимальных сжимающих напряжений, МПа;
- 3) $\sigma_1 \geq \sigma$, $\sigma_1 > 0$ – критерий максимальных растягивающих напряжений, МПа,

где $\sigma_{int} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$ – интенсивность напряжений, σ_1 – первое главное напряжение, σ_2 – второе главное напряжение, σ_3 – третье главное напряжение, σ_1 – предел текучести.

Анализ результатов численного моделирования НДС конструкций направляющей при силовом воздействии со стороны клети (противовеса) в соответствии с выбранным диапазоном жесткостей пружин показал, что минимальный запас прочности направляющей относительно предела текучести на ее концах по критерию максимальных растягивающих напряжений, составляет 1,6; минимальный запас прочности направляющей относительно передела текучести в районе контактного взаимодействия ролика и направляющей по критерию максимальных сжимающих напряжений – 2,5.

При этом минимальный запас прочности направляющей на ее концах относительно предела прочности составляет 3,0, а минимальный запас прочности направляющей в районе контактного взаимодействия ролика и направляющей относительно предела прочности – 4,8.

Также были получены значения минимальных нагрузок на ролики, приводящие к возникновению остаточных деформаций в направляющей. Для нахождения предельных значений нагрузок, при которых превышается предел текучести направляющей, рассматривались варианты граничных условий 1 и 2.

2) нагрузка прикладывается только к ролику/роликам, расположенным на боковой грани направляющей, перпендикулярно направляющей по оси Z – сила F_z ;

3) нагрузка прикладывается к двум/четырем роликам одновременно – F_x и F_z .

По краям направляющей принималось ограничение по всем степеням свободы.

Силы F_x и F_z были определены в результате решения задачи по нахождению аэродинамических сил, действующих на клеть и противовес соответственно при их движении в вентиляционном стволе в рамках ранее проведенных исследований [11]. Значения данных сил были получены для различных жесткостей пружин роликов, обеспечивающих их контакт с направляющими. Также учтен широкий спектр возможных режимов движения клети и противовеса, включая различные режимы вентиляции.

Таблица 2. Анализ полученных результатов
Table 2. Analysis of the obtained results

Направление Direction	Жесткость пружин ролика, кН/м Stiffness of roller springs, kN/m	Вариант граничных условий 1 Boundary condition variant 1				Максимальные эквивалентные напряжения, МПа Max value of equivalent stresses, MPa	Максимальные сжимающие напряжения, МПа Max value of compressive stresses MPa	Максимальные растягивающие напряжения, МПа Max value of tensile stresses MPa	Максимальный прогиб, мм Max deflection, mm	Максимальные сжимающие напряжения в районе контакта, МПа Max value of compressive stresses at contact, MPa	Максимальные эквивалентные напряжения в районе контакта, МПа Max value of equivalent stresses at contact, MPa
		Максимальная силы в направлении оси X, Н Max force in X direction, N	Максимальная сила в направлении оси Y, Н Max force in Y direction, N	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа Max value of equivalent stresses, MPa	Максимальные сжимающие напряжения, МПа Max value of compressive stresses MPa						
Поток вверх Клеть вниз Flow Up Elevator Down	35	1385	112,23	99,19	158,73	9,45	99,19	96,07			
	20	673	54,53	48,57	77,13	4,63	48,57	47,16			
Поток вверх Клеть вверх Flow Up Elevator Up	35	459	37,19	33,34	52,60	3,18	33,34	32,31			
	20	288	23,34	21,36	33,01	2,00	21,36	20,34			
Поток вниз Клеть вниз Flow Down Elevator Down	35	650	52,56	46,94	74,34	4,52	46,94	45,52			
	20	712	57,69	51,34	81,60	4,89	51,34	49,85			
Поток вниз Клеть вверх Flow Down Elevator Up	35	1079	87,25	78,06	123,40	7,38	78,06	75,28			
	20	462	37,44	33,55	52,95	3,20	33,55	32,52			
Вариант граничных условий 2 Boundary condition variant 2											
Поток вверх Клеть вниз Flow Up Elevator Down	35	439	38,17	50,92	49,90	2,98	28,82	28,91			
	20	243	21,12	28,18	27,62	1,68	15,95	16,00			
Поток вверх Клеть вверх Flow Up Elevator Up	35	404	35,12	46,86	45,92	2,76	26,52	26,60			
	20	9	0,78	1,04	1,02	0,07	0,59	0,59			

Окончание табл. 2

Направление Direction	Жесткость пружин ролика, кН/м Stiffness of roller springs, kN/m	Максимальная сила в направлении оси X, Н Max force in X direction, N	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа Max value of equivalent stresses, MPa	Максимальные сжимающие напряжения, МПа Max value of compressive stresses MPa	Максимальные растягивающие напряжения, МПа Max value of tensile stresses MPa	Максимальный против, мм Max deflection, mm	Максимальные сжимающие напряжения в районе контакта, МПа Max value of compressive stresses at contact, MPa	Максимальные эквивалентные напряжения в районе контакта, МПа Max value of equivalent stresses at contact, MPa
Поток вниз Клеть вниз Flow Down Elevator Down	35 20	402 222	34,95 19,30	46,62 25,75	45,69 25,23	2,75 1,54	26,38 14,57	26,47 14,62
Поток вниз Клеть вверх Flow Down Elevator Up	35 20	577 256	50,16 22,25	66,93 29,68	65,59 29,09	3,93 1,78	37,87 16,80	37,99 16,85
<i>Вариант граничных условий 3 Boundary condition variant 3</i>								
Поток вверх Клеть вниз Flow Up Elevator Down	35 20	1385,47 673,13	109,71 53,45	101,25 49,03	150,79 73,45	9,30 4,61	101,25 49,03	98,49 47,91
Поток вверх Клеть вверх Flow Up Elevator Up	35 20	434,90 288,11	40,66 22,93	55,49 21,72	37,73 31,51	3,21 2,03	23,89 21,72	30,58 20,75
Поток вниз Клеть вниз Flow Down Elevator Down	35 20	405,74 712,31	36,56 56,61	49,84 52,02	42,75 77,81	3,02 4,93	25,75 52,02	27,66 50,88
Поток вниз Клеть вверх Flow Down Elevator Up	35 20	909,47 491,93	75,66 39,02	103,45 48,25	93,22 54,22	6,44 3,43	61,96 36,37	59,92 34,99

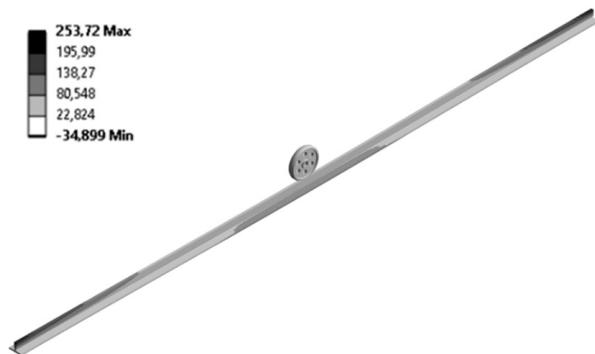


Рис. 4. Распределение максимальных главных напряжений на концах направляющей, МПа

Fig. 4. Distribution of maximum principal stresses at the ends of the guide, MPa

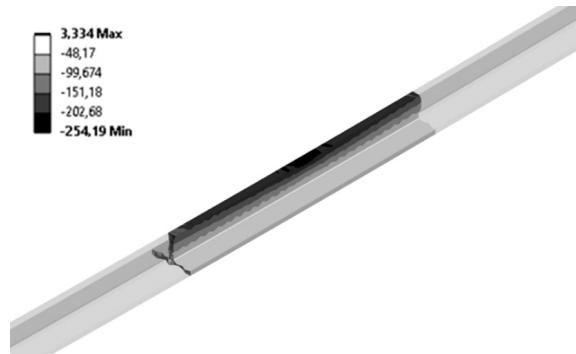


Рис. 5. Распределение минимальных главных напряжений в районе контактного взаимодействия, МПа

Fig. 5. Distribution of minimum principal stresses in the area of contact interaction, MPa

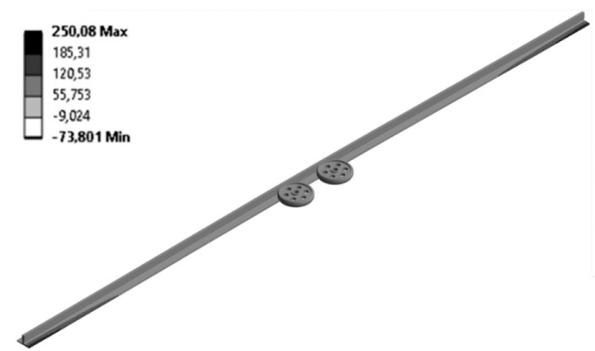


Рис. 6. Распределение максимальных главных напряжений на концах направляющей, МПа

Fig. 6. Distribution of maximum principal stresses at the ends of the guide, MPa

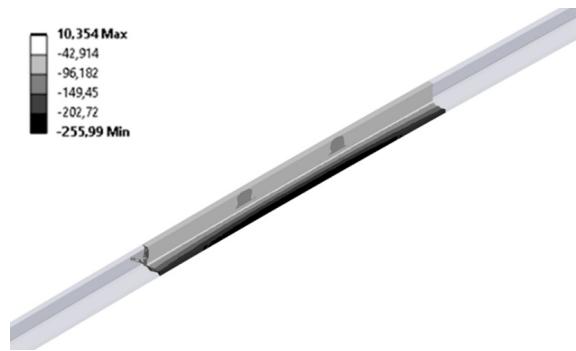


Рис. 7. Распределение минимальных главных напряжений в районе контактного взаимодействия, МПа

Fig. 7. Distribution of minimum principal stresses in the area of contact interaction, MPa

Так, превышение предела текучести в случае одного контактного узла (одного ролика) для варианта граничных условий 1 имеет место при воздействии силы величиной более 4 400 Н (превышение предела текучести на концах направляющей) и/или 5 900 Н (превышение предела текучести в районе контактного взаимодействия); для граничных условий 2 – соответственно 2 200 Н (превышение предела текучести на концах направляющей) и/или 3 900 Н (превышение предела текучести в области контакта). На рис. 4, 5 показано распределение напряжений в ситуациях, когда превышен предел текучести для рассмотренных вариантов.

Результаты численного моделирования показали, что в случае двух контактных узлов (двух роликов) при варианте граничных условий 1 для превышения предела текучести на концах направляющей необходимо приложить нагрузку 2 200 Н или 3 500 Н – для превышения предела текучести в районе контактного взаимодействия; для варианта граничных условий 2 – 2 200 Н для превышения предела текучести на концах направляющей и/или 3 900 Н – для превышения предела текучести в области контакта к каждому ролику. Соответствующие значения напряжений получены также для случаев воздействия двух роликов на направляющую (рис. 6, 7).

Заключение. В рамках исследований разработана численная модель контактного взаимодействия роликов клети с направляющими с учетом динамики движения воздушных потоков в вентиляционном стволе. При проведении расчетов учтено влияние различных режимов работы вентиляции и динамики движения клети и противовеса.

В результате получено распределение НДС контактной пары «ролик клети – направляющая» для различных конфигураций силового воздействия на направляющие. Помимо этого, вычислены значения критических нагрузок на ролики, вызывающие возникновение остаточных деформаций в направляющей, для различных вариантов контактного взаимодействия.

Исследования показали, что аэродинамические силы играют существенную роль в формировании НДС системы «ролики клети – шахтные направляющие», что подчеркивает необходимость их учета при проектировании элементов шахтного подъемного комплекса.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с расчетами НДС и прочности конструкционных элементов шахтного подъемного комплекса в условиях воздействия аэродинамических сил с целью повышения эксплуатационной долговечности и безопасности рассматриваемой геотехнической системы.

Список использованных источников

1. Журавков, М. А. Контактная задача взаимодействия направляющего ролика с шахтным проводником / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, П. С. Маевский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 3 (56). – С. 83–89. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-83-89>
2. Horizontal dynamic modeling and vibration characteristic analysis for nonlinear coupling systems of high-speed elevators and guide rails. / D. Song, P. Zhang, Y. Wang [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37. – P. 643–653. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0109-2>
3. Wang, X. Mechanical model and seismic study of the roller guide–rail assembly in the counterweight system of elevators. / X. Wang, S. Günay, W. Lu // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2021. – Vol. 50, № 2. – P. 518–537. <https://doi.org/10.1002/eqe.3344>
4. Самуся, В. И. Компьютерное моделирование и исследование динамики систем «сосуд–армировка» в стволах с нарушенной геометрией / В. И. Самуся, И. С. Ильина, С. С. Ильина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 20. – С. 277–285. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.20.8>
5. Fiołek, P. Assessment of hoisting conveyance guiding forces based on field acceleration measurements and numerical simulation. / P. Fiołek, J. Jakubowski // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 22. – Art. ID 10758. <https://doi.org/10.3390/app142210758>
6. Zhuravkov, M. A. Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes / M. A. Zhuravkov, V. P. Savchuk, M. A. Nikolaitchik // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2021. – № 2. – С. 105–113. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2021-2-105-113>
7. Drzewosz, A. The problem of stability in mechanical systems using the example of mine hoist installations / A. Drzewosz, S. Wolny // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 15. – Art. ID 6472. <https://doi.org/10.3390/app14156472>
8. Nikolaitchik, M. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft / M. Nikolaitchik // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 201. – Art. ID 01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101017>
9. Escalona, J. L. Advances in the modeling and dynamic simulation of reeving systems using the arbitrary Lagrangian–Eulerian modal method / J. L. Escalona, N. Mohammadi // Nonlinear Dynamics. – 2022. – Vol. 108. – P. 3985–4003. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07357-y>
10. Ивановская, А. В. Особенности динамического анализа тяговой системы с конечным натяжением / А. В. Ивановская // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – № 1. – С. 37–46. https://doi.org/10.47404/2619-0605_2022_1_37
11. Журавков, М. А. Моделирование динамики движения лифта и противовеса в потоке воздуха вентиляционного шахтного ствола. / М. А. Журавков, М. А Николайчик, И. Н. Карпович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 1. – С. 120–130. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20250111>
12. Wu, R. Computational fluid dynamics modeling of rope-guided conveyances in two typical kinds of shaft layouts / R. Wu, Z. Zhu, G. Cao // PLOS One. – 2015. – Vol. 10. – Art. ID e0118268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118268>
13. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction. / R. Wu, Z. Zhu, G. Chen [et al.] // Journal of Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16. – P. 155–163.
14. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе / Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, О. С. Паршаков, А. В. Богомягков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112–118.
15. Computational study on aerodynamic characteristics and behaviour of S5010 airfoil / M. H. F. Yazik, M. Tamagawa, M. T. H. Sultan, A. Adzrif // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2024. – Vol. 66, iss. 1. – P. 41–52. – URL: https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3720
16. Комплексное исследование многоциклового контактного взаимодействия системы «направляющий ролик – шахтный проводник» / М. А. Журавков, А. В. Богданович, М. А. Николайчик [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2022. – № 4. – С. 5–18. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-04-1>
17. Design and analysis of engine timing silent chain system / Y. Cheng, S. Yin, C. Meng [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2016. – Vol. 230, iss. 13. – P. 2225–2234. <https://doi.org/10.1177/0954406215590643>
18. Gizicki, M. Classification and recognition of roller bearing damage in lift installations using supervised machine learning and vibration analysis / M. Gizicki, S. Kaczmarczyk, R. Smith // 14th Symposium on Lift & Escalator Technologies, 20–21 September 2023. – P. 65–72. URL: https://liftescalatorlibrary.org/paper_indexing/papers/00000533.pdf

19. Hu, D. Research on vibration reduction characteristics of high-speed elevator with rolling guide shoes based on hydraulic damping actuator / D. Hu, Q. Wang, J. Zhan // *Actuators*. – 2024. – Vol. 13, iss. 9. – Art. ID 356. <https://doi.org/10.3390/act13090356>
20. Roller–rail parameters on the transverse vibration characteristics of super-high-speed elevators / S. Cao, R. Zhang, S. Zhang [et al.] // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 43, № 4. – P. 535–543. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2018-0083>
21. Марочник сталей и сплавов / сост.: А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
22. Wang, H. Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach / H. Wang, I. L. Al-Qadi // *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. – 2011. – Vol. 80. – P. 289–316.
23. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буш [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
24. Rubber friction: The contribution from the area of real contact / A. Tiwari, N. Miyashita, N. Espallargas, B. N. J. Persson // *The Journal of Chemical Physics*. – 2018. – Vol. 148, iss. 22. – Art. ID 224701. <https://doi.org/10.1063/1.5037136>

References

1. Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Maevskiy P. S. Contact problem of interaction of a guide roller with a mine conductor. *Mekhanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2021, no. 3 (56), pp. 83–89 (in Russian). <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-83-89>
2. Song D., Zhang P., Wang Y., Du C., Lu X., Liu K. Horizontal dynamic modeling and vibration characteristic analysis for nonlinear coupling systems of high-speed elevators and guide rails. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, vol. 37, pp. 643–653. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0109-2>
3. Wang X., Günay S., Lu W. Mechanical model and seismic study of the roller guide–rail assembly in the counterweight system of elevators. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, vol. 50, no. 2, pp. 518–537. <https://doi.org/10.1002/eqe.3344>
4. Samusia V. I., Iliina I. S., Iliina S. S. Computer modeling and investigation of dynamics of the system “vessel–reinforcement” in shafts with broken geometry. *Vestnik Permskogo natsional’nogo issledovatel’skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol. 15, no. 20, pp. 277–285 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.20.8>
5. Fiołek P., Jakubowski J. Assessment of hoisting conveyance guiding forces based on field acceleration measurements and numerical simulation. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 22, art. ID 10758. <https://doi.org/10.3390/app142210758>
6. Zhuravkov M. A., Savchuk V. P., Nikolaitchik M. A. Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*, 2021, no. 2, pp. 105–113. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2021-2-105-113>
7. Drzewosz A., Wolny S. The problem of stability in mechanical systems using the example of mine hoist installations. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 15, art. ID 6472. <https://doi.org/10.3390/app14156472>
8. Nikolaitchik M. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 201, art. ID 01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101017>
9. Escalona J. L., Mohammadi N. Advances in the modeling and dynamic simulation of reeving systems using the arbitrary Lagrangian–Eulerian modal method. *Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 108, pp. 3985–4003. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07357-y>
10. Ivanovskaia A. V. Features of dynamic analysis of the traction system with finite tension. *Vestnik Kershenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University], 2022, no. 1, pp. 37–46 (in Russian). https://doi.org/10.47404/2619-0605_2022_1_37
11. Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Karpovich I. N. Modeling Dynamic Behavior of Elevator and Counterweight in Airflow in Ventilation Mine Shaft. *Journal of Mining Sciences*, 2025, vol. 61, pp. 109–118. <https://doi.org/10.1134/s1062739125010119>
12. Wu R., Zhu Z., Cao G. Computational fluid dynamics modeling of rope-guided conveyances in two typical kinds of shaft layouts. *PLOS One*, 2015, vol. 10, art. ID e0118268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118268>
13. Wu R., Zhu Z., Chen G., Cao G., Li W. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction. *Journal of Vibroengineering*, 2014, vol. 16, pp. 155–163.
14. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Parshakov O. S., Bogomyagkov A. V. Blind Roadway Ventilation Improvement by Means of Increasing Initial Air Flow Velocity. *Journal of Mining Science*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1134/s1062739122010124>
15. Yazik M. H. F., Tamagawa M., Sultan M. T. H., Adzrif A. Computational study on aerodynamic characteristics and behaviour of S5010 airfoil. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2024, vol. 66, iss. 1, pp. 41–52. Available at: https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3720
16. Zhuravkov M. A., Bogdanovich A. V., Nikolaitchik M. A., Makhutov N. A., Gadenin M. M., Reznikov D. O. Comprehensive study of multi-cycle contact interaction of the “guide roller – mine conductor” system. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii = Safety and Emergencies Problems*, 2022, no. 4, pp. 5–18 (in Russian). <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-04-1>

17. Cheng Y., Yin S., Meng C., Wang X., Liu H. Design and analysis of engine timing silent chain system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, vol. 230, iss. 13, pp. 2225–2234. <https://doi.org/10.1177/0954406215590643>
18. Gizicki M., Kaczmarczyk S., Smith R. Classification and recognition of roller bearing damage in lift installations using supervised machine learning and vibration analysis. *14th Symposium on Lift & Escalator, 20–21 September 2023*, pp. 65–72. Available at: https://liftescalatorlibrary.org/paper_indexing/papers/00000533.pdf
19. Hu D., Wang Q., Zhan J. Research on vibration reduction characteristics of high-speed elevator with rolling guide shoes based on hydraulic damping actuator. *Actuators*, 2024, vol. 13, iss. 9, art. ID 356. <https://doi.org/10.3390/act13090356>
20. Cao S., Zhang R., Zhang S., Qiao S., Cong D., Dong M. Roller–rail parameters on the transverse vibration characteristics of super-high-speed elevators. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 535–543. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2018-0083>
21. Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V. [et al.], (compilers). *Steel and Alloy Directory*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p. (in Russian).
22. Wang H., Al-Qadi I. L. Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2011, vol. 80, pp. 289–316.
23. Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A., Buyanovskii I. A., Gekker F. R., Goryacheva I. G. [et al.]. *Fundamentals of Tribology (Friction, Wear, Lubrication)*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p. (in Russian).
24. Tiwari A., Miyashita N., Espallargas N., Persson B. N. J. Rubber friction: The contribution from the area of real contact. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, vol. 148, iss. 22, art. ID 224701. <https://doi.org/10.1063/1.5037136>