



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362>

УДК 622.44:62–83

**Обоснование решений по повышению энергоэффективности
вентиляторных установок и подъемных машин
в условиях реконструкции рудника «Молибден»**Р. В. Клюев   *Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация* kluev-roman@rambler.ru**Аннотация**

Экономическая эффективность высокопроизводительных горных предприятий во многом определяется параметрами и режимами работы энергоемких машин. Традиционно вентиляторные установки и подъемные машины считаются одними из самых энергоемких. Исследования направлены на анализ работы вентиляторных установок главного проветривания и подъемных установок рудника, а также на разработку мероприятий по обеспечению рациональных режимов их работы с целью повышения энергоэффективности и снижения эксплуатационных затрат. В работе описаны методы расчета систем проветривания, включая аналитические, которые используются для проектирования и анализа режимов работы систем проветривания. В исследовании использованы данные о режимах работы систем рудника «Молибден». Выявлено, что вентиляторные установки работают неэффективно, с завышенным удельным расходом электроэнергии. В связи с этим предложены мероприятия по замене электродвигателей, что позволит снизить энергопотребление и эксплуатационные затраты. Расчеты показывают, что экономический эффект от замены двигателей вентиляторной установки на руднике «Молибден» составит 4,9 млн руб. в год. На основе анализа характеристик подъемных установок рудника проведен проверочный расчет мощности электродвигателей подъемных машин. Отмечено, что для повышения эффективности подъемных систем необходимо использовать современные многоканатные установки с уравновешенной конструкцией. Предложены меры по загрузке технологического оборудования, что позволит снизить удельный расход электроэнергии на добычу руды. Анализ данных за 8 лет показал обратную корреляцию между объемом добычи руды и удельным расходом электроэнергии. Увеличение производительности на 10–15 % снижает удельный расход энергии на 2–5 %. Исключение периодов низкой загрузки оборудования и внедрение автоматизированных систем управления позволят повысить эффективность установок в целом. Результаты исследования могут быть использованы для горнодобывающих предприятий с аналогичными условиями эксплуатации, особенно при глубокой разработке месторождений.

Ключевые слова

рудник, энергоэффективность, вентиляторные установки, системы проветривания, подъемные машины, электродвигатель, добыча руды, удельный расход электроэнергии, экономический эффект

Для цитирования

Klyuev R. V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):84–94. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

**Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation
and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine**R. V. Klyuev   *Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation* kluev-roman@rambler.ru**Abstract**

The economic efficiency of high-performance mining enterprises largely depends on the parameters and operating modes of energy-intensive equipment. Ventilation fans and hoisting machines are traditionally considered among the most energy-intensive equipment. This study focuses on analyzing the operation of the main ventilation fans and hoisting equipment at the Molibden mine and on developing measures to



ensure optimal operating conditions aimed at improving energy efficiency and reducing operating costs. The paper presents methods for evaluating the efficiency of mine ventilation systems, including analytical approaches applied in system design and performance assessment. The study draws on operational data from the Molibden mine. The analysis revealed that the ventilation fans were operating inefficiently, with excessive specific energy consumption. Consequently, the replacement of electric motors is proposed to reduce energy use and operational expenditures. Calculations indicate that the expected economic benefit from replacing the ventilation fan motors at the Molibden mine amounts to 4.9 million rubles per year. Based on an analysis of the hoisting equipment characteristics, a required motor power assessment was performed. The study demonstrates that the use of modern multi-rope hoisting systems with balanced designs is essential for improving operational efficiency. Measures to optimize equipment utilization are proposed, which would reduce the specific energy consumption associated with ore extraction. An analysis of eight years of data revealed an inverse correlation between ore output and specific energy use: a 10–15% increase in productivity results in a 2–5% reduction in specific energy consumption. Avoiding periods of low equipment utilization and implementing automated control systems can significantly enhance overall system efficiency. The findings of this study may be applicable to mining enterprises operating under similar conditions, particularly those engaged in deep-level mining.

Keywords

mine, energy efficiency, ventilation fans, mine ventilation systems, hoisting machines, electric motor, ore extraction, specific energy consumption, economic benefit

For citation

Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):84–94. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362>

Введение

Системы проветривания рудников являются критически важной инженерной системой, обеспечивающей безопасные и эффективные условия труда в подземных условиях [1]. В отличие от открытых горных выработок, где естественная вентиляция является решающим фактором в обеспечении проветривания, подземные рудники представляют собой замкнутые пространства с ограниченным доступом воздуха и повышенными рисками аварийных ситуаций [2, 3]. Системы вентиляции угольных шахт, опасных по газу, где процессы выделения метана в горные выработки не всегда удается прогнозировать [4, 5], имеют особое значение в обеспечении безопасности горного производства. Процесс выделения метана создает серьезные проблемы для обеспечения надежного проветривания горных выработок, удаления вредных газов, пыли и избыточного тепла, возникающих в результате реализации технологических процессов [6–8], с учетом производительности и топологии горных выработок [9].

Развитие горнодобывающей отрасли приводит к необходимости учета рисков аварийных ситуаций, научного обоснования методов расчета аэрологических рисков [1, 3], а также нового методического и алгоритмического обеспечения определения режимов проветривания шахт и рудников [10–12]. Многообразие технических элементов, их функционал и свойства требуют комплексных решений, обеспечивающих реализацию главных функций систем проветривания горных предприятий [13]. При этом необходимо учитывать энергетическую и экономическую эффективность принимаемых инженерных решений, которые в значительной степени определяют эффективность всего горного предприятия [14–16].

Вентиляторные установки (установленная мощность на крупных предприятиях составляет 5–7 МВт) и подъемные машины на горном предприятии являются самыми энергоемкими объектами. От их производительности зависит производительность предприятия в целом, так как они являются ключевым элементом транспортной системы предприятия [17]. Современная подъемная машина оборудуется системой регулируемого электропривода, обеспечивающего ее эффективную и безопасную работу. Поэтому снижение затрат на эксплуатацию вентиляторных и подъемных машин, обоснование их режимов работы является актуальной задачей.

Объект исследования. В качестве объекта исследования в работе рассматривается Тырныаузский ВМК (ТВМК), который в 2025 г. планируется вновь ввести в работу.

Целью работы является анализ режимов работы вентиляторных установок главного проветривания и подъемных установок рудника, а также разработка мероприятий по оптимизации их работы.

Методы исследования. Анализ режимов работы систем проветривания рудников и вентиляторных установок, режимов работы подъемных машин и их электроприводов, расчет систем проветривания рудников – это сложная инженерная задача, требующая сочетания теоретических и эмпирических подходов, обработки экспериментальных данных, а также современных вычислительных методов. Предлагаемые решения по обеспечению эффективности работы вентиляторных и подъемных установок принимаются на основе технико-экономического анализа. Основная идея работы заключается в обосновании мощности электроприводов главных вентиляторных и подъемных установок реконструируемого рудника для повышения энергоэффективности.



Существующая схема проветривания рудника «Молибден»

Рудник «Молибден» разделяется на два участка, имеющих независимые схемы и средства проветривания: Северо-Западный участок и Центральные шахты № 1 и № 2. Для проветривания рудника «Молибден» используются три типа вентиляторных установок: ВОКД-3,0, ВОКД-2,4 и ВОД-21. Вентиляторы ВОКД-3,0 и ВОКД-2,4 предназначены для главного проветривания крупных шахт и рудников. Разработаны они по аэродинамической схеме ЦАГИ-К-06 и выполнены в одном конструктивном исполнении. Периодическое регулирование работы вентилятора производится поворотом лопаток рабочего колеса, а более тонкое регулирование – закрылками промежуточного направляющего аппарата. Для возбуждения синхронных двигателей используются тиристорные возбуждатель-

ные аппараты, оборудованные реверсивным устройством. Реверсивные осевые вентиляторы ВОД предназначены для замены вентиляторов типа ВОК и ВОКД. Они выполнены по аэродинамической схеме К-84. Реверсирование воздушной струи осуществляется изменением направления вращения колеса, при этом лопатки промежуточного аппарата устанавливаются под углом 104° к плоскости вращения рабочего колеса.

Обследование и анализ работы главных вентиляторных установок вентиляционной системы рудника «Молибден» ТВМК

Сводные данные по обследованию и анализу работы главных вентиляторных установок (ГВУ) дают полную картину по их функционированию. В табл. 1 представлены основные сведения о работе вентиляторных установок в системе проветривания рудника.

Таблица 1

Основные сведения о работе вентиляторных установок в системе проветривания рудника

№ п/п	Показатели	Горизонт №4 ГВУ-4	Горизонт №4 ГВУ-1	Горизонт №4 ГВУ-1а	Горизонт №9 ГВУ-3	Горизонт №5 ГВУ-6
1	Тип вентилятора	ВОКД-3,0	ВОКД-2,4	ВОД-21	ВОД-21	ВОКД-3,0
2	Диаметр рабочего колеса, м	3	2,4	2,1	2,1	3,0
3	Число оборотов рабочего колеса, об/мин	600	735	750	750	600
4	Окружная скорость рабочего колеса, м/с	94,2	92,2	82,4	82,4	94,2
5	Расход воздуха через вентилятор, м³/с	90,4	64,7	56,0	76,0	96,7
6	Количество воздуха, подаваемого в рудник, м³/с	73,7	47,9	42,7	61,3	91,4
7	Потери воздуха в вентиляционных установках (ВУ), м³/с;	16,7	16,8	13,3	14,9	5,3
	расход воздуха через вентилятор, %	18,5	25,9	23,8	19,6	5,5
8	Полное давление, развиваемое вентилятором, мм вод. ст.	111,3	29,2	16,4	9,6	191,4
9	Депрессия шахты, мм вод. ст.	90,7	21,0	16,4	10,0	0,9
10	Депрессия естественной тяги, мм вод. ст.	1,2	1,5	–	1,4	2,3
11	Общедействующая депрессия в шахте, мм вод. ст.	91,9	22,5	16,4	11,4	3,2
12	Акустическая текучесть вентиляторной сети, кг·с/м⁵	1,0	0,37	0,29	0,14	6,75
13	Соппротивление сооружений по герметизации в районе ВУ, кПа	0,32	0,074	0,093	0,032	1,6
	нормальное, кПа	1,39	0,9	0,73	0,24	–
14	Соппротивление шахты, кПа	0,0169	0,0114	0,009	0,0029	0,0218
15	Полное сопротивление, на которое работает вентилятор, кПа	0,0138	0,0085	0,0052	–	0,02
16	Эквивалентное отверстие шахты, м²	2,9	3,6	4,0	7,0	2,7
17	Полное эквивалентное отверстие шахты, на которое работает вентилятор, м²	3,3	4,2	5,3	–	2,6
18	Тип электродвигателя вентилятора	СДВ-15-64-10У3	А-13-42-8	СД-2-85-47-8У4	СД-13-42-8	СДВВ-15-39-10
19	Номинальная мощность, кВт	1250	400	500	500	800
20	Мощность, потребляемая из сети, кВт	426,7	210	130	150	360
21	Мощность на валу вентилятора, кВт	393,4	187	116,3	135,5	326,5
22	Статический КПД вентилятора: по электрическим данным; средневзвешенный	0,25	0,09	0,08	0,05	0,55
		0,7	0,7	0,72	0,72	0,7



Окончание табл. 1

№ п/п	Показатели	Горизонт №4 ГВУ-4	Горизонт №4 ГВУ-1	Горизонт №4 ГВУ-1а	Горизонт №9 ГВУ-3	Горизонт №5 ГВУ-6
23	Удельный расход мощности в сети, кВт/м³: фактический; нормативный	5,79 1,86	4,74 0,48	3,04 0,25	2,45 0,15	3,94 3,13
24	Удельный расход мощности на валу, кВт/м³: фактический; нормативный	5,33 1,73	4,29 0,45	2,72 0,24	2,21 0,14	3,57 2,95
25	Сверхнормативный расход мощности, кВт	289,6	188,7	119,0	141,0	74,0
26	Время работы вентилятора в году, ч	8570	8570	8570	8570	8570
27	Годовой перерасход электроэнергии ВУ, тыс. кВт·ч	2481,9	1617,2	1208,4	634,2	634,2
28	Стоимость 1 кВт·ч, руб.	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
29	Стоимость годового перерасхода электроэнергии ВУ, тыс. руб.	14891,4	9702	6118,8	7250,4	3805,2

Таблица 2

Параметры вентиляторных установок различных типоразмеров

№ п/п	Параметры	Типоразмеры			
		ВОКД-2,4		ВОКД-3,0	
1	Диаметр рабочего колеса, мм	2400		3000	
2	Скорость вращения колеса, об/мин	600	750	500	600
3	Производительность Q , м³/с	17–133	22–167	42–220	52–265
4	Статическое давление H , кг/м²	300–110	475–170	340–94	450–135
5	Потребляемая мощность, кВт	50–400	100–780	125–825	200–1420
6	Статический КПД η_v	0,6–0,77		0,6–0,77	
7	Маховый момент ротора, кг·м²	4600		14200	
8	Вес вентилятора (без двигателя), кг	18885		32000	
9	Установочные габаритные размеры, мм				
	длина	18340		18535	
	высота	3500		4480	
	ширина	3500		4480	

По данным табл. 1 (п. 23) можно сделать вывод о том, что вентиляторные установки работают неэкономично. Необходимо провести дополнительные исследования и предложить ряд мероприятий по снижению удельного расхода электроэнергии. По данным табл. 1 (пп. 19, 20, 21) установленные мощности двигателей ГВУ-4, 1а, 3, 6 значительно превышают мощности, потребляемые из сети. Необходимо провести проверочный расчет мощностей двигателей вентиляторов главного проветривания.

Проверочный расчет мощностей электродвигателей

главных вентиляторных установок

Мощность электродвигателя для вентиляторных установок:

$$P = \frac{QH}{102\eta_v}, \quad (1)$$

где Q – производительность, м³/с; H – статическое давление, кг/м²; η_v – КПД вентилятора.

Мощность двигателя принимается выше расчетной на 10–15 % из-за возможного снижения напряжения в сети:

$$P_{дв} = k_3 P, \quad (2)$$

где k_3 – коэффициент запаса мощности, $k_3 = 1,1–1,15$.

Значения параметров Q , H , η_v приведены в табл. 2.

В табл. 3 представлены сведения о двигателях ГВУ.

Для ГВУ-4 №1 (вентилятор ВОКД-2,4) поверочный расчет дает следующие результаты:

$P = 170,7–463,9$ кВт; $P_{дв} = 510,3$ кВт.

Установлен двигатель А-13-42-8: $P_n = 400$ кВт.

Аналогичные расчеты проведены и для других вентиляторных установок, результаты сведены в табл. 4.

Расчеты показали, что мощности двигателей вентиляторов № 4, № 1а, № 3 завышены (см. табл. 4). Рационально заменить их на двигатели меньшей мощности. Окончательное решение должно быть принято на основе технико-экономического анализа, элементы которого представлены ниже.



Таблица 3

Основные сведения о работе двигателей ГВУ

Наименование ГВУ	Тип ВУ	Тип приводного двигателя	Количество	Номинальная мощность P_n , кВт	Номинальное напряжение U_n , В	Номинальный ток I_n , А	Номинальная частота вращения n_n , об/мин	Номинальный КПД η_n , %	Коэффициент мощности $\cos \varphi_n$
ГВУ-1	ВОКД-2,4	А-13-42-8	1	400	6000	48	735	92,8	0,85
ГВУ-1а	ВОД-21	СД-2-85-47-8У4	1	500	6000	57	750	95	0,9
ГВУ-3	ВОД-21	СД-13-42-8	2	500	6000	57,1	750	94	0,9
ГВУ-4	ВОКД-3,0	СДВ-15-64-10У3	1	1250	6000	141	600	95,3	0,9
ГВУ-6	ВОКД-3,0	СДВВ-15-39-10	2	800	6000	90,5	600	94,3	0,8

Таблица 4

Сводная таблица проверочного расчета мощности электродвигателей

Наименование ГВУ	Диапазон изменения мощности, кВт	Расчетная мощность двигателя, кВт	Установленная мощность двигателя, кВт	Рекомендуемая замена двигателя
ГВУ-1	170,7–463,9	510,3	400	–
ГВУ-1а	142,9–201,0	221,1	500	Двигатель типа СДВ-15-34-12, $P_n = 400$ кВт
ГВУ-3	142,9–201,0	221,1	500	
ГВУ-4	382,3–584,5	642,9	1250	Двигатель типа СДВВ-15-39-10, $P_n = 800$ кВт
ГВУ-6	382,3–584,5	642,9	800	–

Таблица 5

**Краткое описание
и технические характеристики
подъемных установок
рудника «Молибден»**

На руднике «Молибден» находятся в эксплуатации две подъемные установки шахт «Капитальная» и «Северо-Западная». На шахте «Капитальная» применяется простая одноканатная подъемная система, где подъемная машина типа ШПМ 4×36 оснащена барабаном. Однако такие конструкции имеют низкую производительность и статический баланс, а также другие недостатки. Для повышения эффективности и надежности подъемных систем на современных горнодобывающих предприятиях широко применяются многоканатные подъемные установки с уравновешенной конструкцией, которые обеспечивают более высокую производительность, снижают вибрацию.

Назначение подъемной машины – спуск-подъем людей и грузов с 12-го по 4-й горизонты в двухэтажной клетки типа 2УКН-3,6-1. Технические данные подъемной установки шахты «Капитальная» приведены в табл. 5.

На шахте «Северо-Западная» установлена многоканатная подъемная машина типа МК-2,25×4. Машина имеет однодвигательный привод по системе «генератор–двигатель». Назначение: спуск-подъем людей и грузов с 4-го по 1-й горизонты. Система статически уравновешена двумя плоскопрядными хвостовыми канатами. Подъемная машина с противовесом. Машина МК-2,25×4 изготавливается с редуктором. Соединение редуктора с валом электродвигателя осуществляется зубчатыми удлиненными муфтами специальной конструкции. Технические данные подъемной установки приведены в табл. 6.

**Технические данные подъемной установки
шахты «Капитальная»**

№ п/п	Параметры	Значение
1	Глубина ствола до нижнего горизонта, м	597
2	Угол наклона ствола, град	90
3	Тип подъемной машины	ШПМ 4×36
4	Высота подъема, м	600
5	Высота копра, м	18
6	Диаметр копрового шкива, мм	3000
7	Количество обслуживаемых горизонтов	8
8	Средняя скорость подъема, м/с	11
9	Количество циклов в сутки	14
10	Высота переподъема, м	18
11	Тип клетки	2УКН-3.6-1
12	Тип каната	ПК-РО(6×36)+(7×71)
13	Редуктор	Одноступенчатый
14	Передаточное число (отношение)	9,5
15	Количество барабанов	1 (сварен из двух)
16	Диаметр барабана, мм	4000
17	Ширина барабана, мм	3500
18	Число слоев навивки	1
19	Тип ограничителя скорости	PCO-5912
20	Статическое натяжение канатов, Н	175000
21	Разность статических натяжений, Н	117600
22	Масса подъемного сосуда, кг	4412
23	Масса наибольшего расчетного груза, кг	3700
24	Масса противовеса, кг	6250
25	Количество подземных рабочих в смену	276



Таблица 6

**Технические данные подъемной установки
МК-2,25×4 шахты «Северо-Западная»**

№ п/п	Параметры	Значение
1	Глубина ствола до нижнего горизонта, м	597
2	Угол наклона ствола, град	90
3	Тип подъемной машины	МК 2,25×4
4	Высота подъема, м	300
5	Количество обслуживаемых горизонтов	4
6	Средняя скорость подъема, м/с	9,5
7	Диаметр шкива, мм	2250
8	Высота переподъема, м	7
9	Число циклов в час	18,2
10	Тип клетки	ТКП-4,5
11	Футовка шкива	ПП-45
12	Число канатов	4
13	Диаметр каната, мм	21,5
14	Концевая нагрузка, т: при подъеме груза; при подъеме людей	14,6 10
15	Вес противовеса, т	10
16	Число хвостовых канатов	2
17	Редуктор	ЦДН-130
18	Передаточное отношение	7,35
19	Масса подъемного сосуда, т	7,6
20	Расчетная грузоподъемность, т	7,0
21	Количество подземных рабочих в смене	276

**Проверочный расчет мощности
электродвигателя подъемной машины**

На шахте «Капитальная» установлены подъемные машины: с электродвигателем типа ДА-170/29-12 мощностью $P = 670$ кВт; с электродвигателем типа ПЭ-172-5К мощностью $P = 630$ кВт с электроприводом по системе «генератор–двигатель». Ориентировочная мощность приводного электродвигателя шахты «Капитальная»:

$$P_o = \rho \frac{k}{\eta_p} P_{\text{пол}}, \quad (3)$$

где ρ – коэффициент, определяемый по характеристике динамического режима и зависящий от момента инерции подъемной машины, степени ее неуравновешенности и множителя скорости; k – коэффициент, учитывающий увеличение нагрузки за счет сопротивлений; η_p – КПД редуктора подъемной машины; $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность электродвигателя (без учета потерь), затрачиваемая на подъем полезного груза с массой m_r .

Для установки с одним сосудом и противовесом:

$$P_{\text{пол}} = \frac{(1 - \psi) g m_r v_{\text{cp}}}{1000}, \quad (4)$$

где ψ – коэффициент, учитывающий степень уравнивания массы груза m_r массой противовеса; v_{cp} – средняя скорость движения сосуда, м/с.

Коэффициент ψ можно получить из следующего выражения:

$$\psi = \frac{m_{\text{пр}} - m_c}{m_r}, \quad (5)$$

где $m_{\text{пр}}$ – масса противовеса, кг; m_c – масса сосуда, кг; m_r – масса груза, кг.

Мощность двигателя принимается больше расчетной на 10–15 % с учетом возможного падения напряжения в электрической сети:

$$P_{\text{дв}} = (1,1 - 1,15) P_o. \quad (6)$$

Для подъемной установки шахты «Капитальная» (см. табл. 5): $m_{\text{пр}} = 6250$ кг; $m_c = 4412$ кг; $m_r = 3700$ кг.

В табл. 7 представлены полученные значения проверочного расчета мощности электродвигателя подъемной машины.

Таблица 7

**Значения проверочного расчета мощности
электродвигателя подъемной машины**

Параметры	Значение
Коэффициент ψ	0,497
Полезная мощность электродвигателя $P_{\text{пол}}$, кВт	200,6
Ориентировочная мощность приводного электродвигателя P_o , кВт	453,12
Коэффициент ρ	1,6
Коэффициент k , учитывающий увеличение нагрузки за счет сопротивлений	1,2
КПД редуктора подъемной машины η_p	0,88
Мощность двигателя $P_{\text{дв}}$, кВт	521,1

Расчетная мощность двигателя удовлетворяет мощности двигателя, установленного на подъемной машине шахты «Капитальная».

**Методика определения экономического
эффекта за счет рациональной загрузки
технологического оборудования**

Исследование зависимости между потреблением электроэнергии и объемами добываемой руды на руднике «Молибден» показало, что удельный расход электроэнергии в значительной степени зависит от суточной производительности рудника. Анализ данных за 8-летний период показал, что корреляция между месячными объемами добычи руды и энергопотреблением варьируется в пределах от 0,309 до 0,730. Это означает, что при увеличении объема добываемой руды удельное потребление энергии имеет тенденцию к снижению.

Анализ массива данных по добыче руды выявил, что он характеризуется значительным разбросом значений, что подтверждается высоким среднеквадратичным отклонением. Также наблюдаются асимметрия и эксцесс, что говорит о неравномерном распределении значений. Около 50 % значений в массиве оказывалась заметно ниже среднего уровня, что свидетельствует о преобладании периодов с относительно низкой производительностью. Таким образом, для снижения удельного расхода энергии на руднике «Молибден» необходимо сократить время работы с низкими значениями производительности и обеспечить максимально возможную загрузку оборудования.



Таблица 8

Результаты расчета параметров добычи руды исходного Q и усеченного Q' массивов данных

Год	Параметры исходного Q массива данных				Параметры усеченного Q' массива данных				$P(Q \geq m_Q)$
	Математическое ожидание m_Q	Среднеквадратическое отклонение σ_Q	Асимметрия A_Q	Экспесс E_Q	Математическое ожидание $m_{Q'}$	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{Q'}$	Асимметрия $A_{Q'}$	Экспесс $E_{Q'}$	
1	316654	17684,7	0,0242	-0,884	331276	10110,2	0,515	1,81	0,498
2	321507	19443	0,628	-0,149	338543	13826,6	1,09	3,93	0,458
3	307690	26296	-0,11	-1,333	329750	14257	0,252	1,15	0,509
4	293556	29153	0,453	-0,708	319041	19075,5	0,853	3,25	0,47
5	313330	17720	1,25	1,57	329176	15817,6	1,303	3,84	0,417
6	324532	16496	1,05	0,129	339753	13151,6	1,106	3,69	0,43
7	327409	13743	0,146	0,084	338556	8708,1	1,111	4,25	0,49
8	324966	12102	0,512	-0,959	335743	7900	0,761	2,93	0,466

Таблица 9

Результаты расчета изменения удельного расхода электроэнергии $\Delta\omega$, потери электроэнергии ΔW

Год	$\Delta\omega$, кВт·ч/т	$\Delta\omega$, %	ΔW , кВт·ч
1	0,061	0,315	231135
2	1,063	5,75	4101347
3	1,043	5,11	3852665
4	0,471	2,41	1660842
5	0,757	3,88	2847939
6	0,119	0,636	465320
7	1,09	5,63	4265685
8	0,238	1,32	928772

Для более полного понимания влияния загрузки оборудования на энергопотребление необходимо также проанализировать структуру потребления электроэнергии на руднике. Разделить её на отдельные процессы (например, бурение, взрывные работы, транспортировку, дробление, обогащение) и изучить зависимость энергопотребления для каждого технологического процесса, что позволит выявить наиболее энергоёмкие процессы, операции и определить рациональные режимы их реализации [18–20]. Кроме того, необходимо рассмотреть возможность использования автоматизированных систем управления производством, которые могут помочь поддерживать стабильную и высокую загрузку оборудования, а также минимизировать потери энергии, возникающие из-за неэффективных режимов работы.

В табл. 8 представлены результаты статистического анализа массива данных, характеризующего параметры добычи руды. Анализировался как исходный массив данных, включающий все зарегистрированные значения, так и усеченный, в котором были исключены значения, оказавшиеся ниже математического ожидания. Это было сделано для оценки влияния исключения низких показателей производительности на общие статистические характеристики распределения массы руды.

Статистические параметры усечённого массива данных рассчитаны теоретическим методом, основанным на распределении Грамма–Шарлье. Начальный момент S случайной величины $Q \geq m_Q$ определяется как:

$$d_s = \frac{1}{P(Q \geq m_Q)} \int_{m_Q}^{\infty} Q^s f(Q) dQ, \quad (7)$$

где $P(Q \geq m_Q)$ – вероятность того, что значения Q усеченного массива данных превысят значения математического ожидания m_Q исходного массива:

$$P(Q \geq m_Q) = \int_{m_Q}^{\infty} f(Q) dQ; \quad (8)$$

$f(Q)$ – теоретический дифференциальный закон распределения случайной величины Q .

При повышении математического ожидания добытой руды на величину

$$\Delta m_Q = m'_Q - m_Q \quad (9)$$

удельный расход электроэнергии уменьшается на величину $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = (a_2 m_Q + b_2) - (a_2 m'_Q + b_2) = a_2 \Delta m_Q, \quad (10)$$

где a_2 , b_2 – коэффициенты уравнения регрессии: $\omega = a_2 Q + b_2$ (см. табл. 1);

$$\Delta\omega\% = \frac{\Delta\omega}{m_Q} \cdot 100\%, \quad (11)$$

здесь m_Q – математическое ожидание удельного расхода электроэнергии.

Экономия электроэнергии за счет более полной загрузки оборудования за год:

$$\Delta W = \Delta\omega m_Q \cdot 12. \quad (12)$$

В табл. 9 приведены результаты расчетов за 8 лет.

На рис. 1 приведены зависимости изменения математического ожидания массы добытой руды и экономии электроэнергии, а также соответствующие аппроксимирующие зависимости.

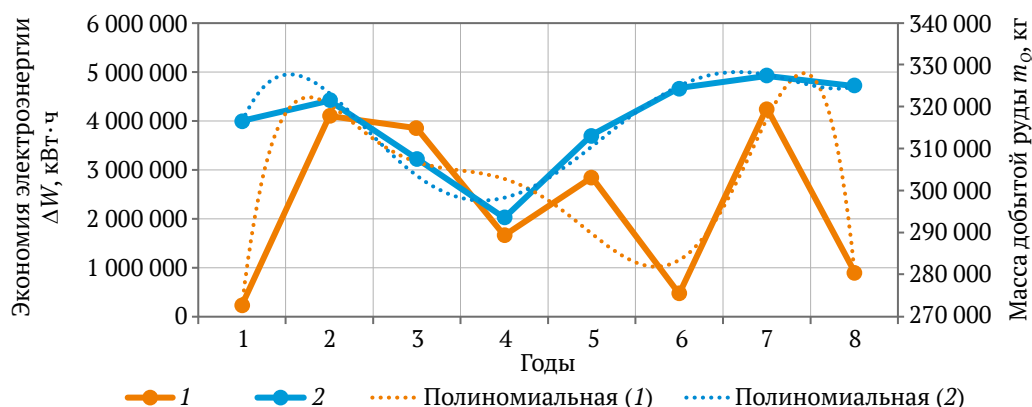


Рис. 1. Экономия электроэнергии и объем выработанной руды, а также соответствующие аппроксимирующие зависимости: 1 – изменение экономии электроэнергии по годам; 2 – изменение массы добытой руды по годам; линии трендов для зависимостей: (1) и (2) – полиномиальные модели аппроксимирующих зависимостей

Ожидаемая экономия электроэнергии определяется как математическое ожидание ΔW :

$$m_{\Delta W} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta W}{n}, \quad (13)$$

где $m_{\Delta W} = 2\,294\,213$ кВт·ч.

Стоимость электроэнергии по двухставочному тарифу, руб.:

$$C = P_{\max} a + Wb. \quad (14)$$

Экономия денежных средств, руб.:

$$\Delta C = C_1 - C_2, \quad (15)$$

где C_1 – стоимость электроэнергии по существующему расходу электроэнергии: $C_1 = P_{\max} a + W_1 b$.

Стоимость электроэнергии при полной загрузке технологического оборудования:

$$C_2 = P_{\max} a + W_2 b.$$

где $a = 4300$ руб/кВт; $b = 6,0$ руб/кВт·ч.

Получаем:

$$\Delta C = (W_1 - W_2)b = \Delta Wb. \quad (16)$$

Экономический эффект от замены электродвигателей вентиляторных установок

По результатам расчетов (см. табл. 4) было отмечено, что электродвигатели вентиляторных установок ГВУ-4, ГВУ-1а, ГВУ-3 не соответствуют нагрузке и имеют завышенную мощность. Например, ГВУ-4: $P_{\text{расч}} = 642,9$ кВт; $P_{\text{н.дв}} = 1250$ кВт; ГВУ-1а и ГВУ-3: $P_{\text{расч}} = 221,1$ кВт; $P_{\text{н.дв}} = 500$ кВт. Предлагается замена электродвигателей ГВУ-4 на двигатель типа СДВВ-15-39-10, $P_{\text{н}} = 800$ кВт; ГВУ-1а и ГВУ-3 на двигатель типа СДВ-15-34-12, $P_{\text{н}} = 400$ кВт.

Экономический эффект от замены электродвигателей:

$$\Delta Z = 0,12\Delta K + \Delta C_w, \quad (17)$$

где

$$\Delta K = K_1 - K_2,$$

здесь K_1 – стоимость установленных двигателей, $K_1 = 8,47$ млн руб.; K_2 – стоимость предлагаемых к замене двигателей, $K_2 = 8,2$ млн руб.; $\Delta K = 0,27$ млн руб. Значения стоимости электродвигателей приведены в табл. 10.

Таблица 10

Стоимость электродвигателей

Тип двигателей	Стоимость двигателей, млн руб.
СДВ-15-64-10У3	5,51
СД-2-85-47-8У4 СД-13-42-8	0,99
СДВВ-15-39-10	4,0
СДВ-15-34-12	1,4

Стоимость сэкономленной электроэнергии рассчитываем по двухставочному тарифу C .

Потери мощности в двигателе, кВт:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2, \quad (18)$$

где $\Delta P_1, \Delta P_2$ – потери мощности в старом и новом двигателях.

Потери электроэнергии, кВт·ч:

$$\Delta W = \Delta P T, \quad (19)$$

где T – время работы вентиляторов в году, $T = 8570$ ч.

Основные электрические потери в обмотке статора, кВт:

$$P_{\Sigma 1} = m I_{\text{н.ср}}^2 r_1 10^{-3}, \quad (20)$$

где r_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом,

$$r_1 = \frac{\rho_v \omega_1 l_{\text{ср}}}{n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} a}, \quad (21)$$

здесь ρ_v – удельное сопротивление проводника, приведенное к расчетной температуре 75 и 130°: $\rho_{v(75)} = (1/47) \cdot 10^{-6}$, Ом·м; $\rho_{v(130)} = (1/39) \cdot 10^{-6}$, Ом·м; ω_1 – число витков обмотки; $l_{\text{ср}} = 2(l_1 + l_2)$ – средняя длина витка обмотки статора; $n_{\text{эл}} q_{\text{эл}}$ – сечение эффектив-



ного проводника, мм²; a – число параллельных ветвей обмотки.

Потери на возбуждение, кВт:

$$P_{\text{в}} = \frac{(I_{\text{вн}}^2 r_{\text{в}} + 2 \Delta U_{\text{шк}} I_{\text{вн}}) \cdot 10^3}{\eta_{\text{в}}}, \quad (22)$$

где $\Delta U_{\text{шк}}$ – переходное падение напряжения в щеточном контакте, $\Delta U_{\text{шк}} = 1$ В; $\eta_{\text{в}}$ – КПД возбудителя, $\eta_{\text{в}} = 0,8-0,85$; $r_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом,

$$r_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} \frac{2 p \omega_1 l_{\text{ср}}}{q_l}. \quad (23)$$

Механические потери, равные сумме потерь в подшипниках и на вентиляцию, кВт:

$$P_{\text{мех}} = 3,68 p \left(\frac{v_p}{40} \right)^3 \sqrt{l_1}, \quad (24)$$

где v_p – окружная скорость ротора, м/с; l_1 – полная длина статора, м.

Добавочные потери при нагрузке, кВт:

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_{\text{н}}. \quad (25)$$

Суммарные потери в двигателе, кВт:

$$\Delta P_1 = P_{\text{э}} + P_{\text{в}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}. \quad (26)$$

Результаты расчетов потерь мощности для всех двигателей представлены в табл. 11.

Значения суммарных потерь электроэнергии и экономического эффекта приведены в табл. 12.

Заключение

1. Вентиляторные установки главного проветривания рассматриваемого рудника «Молибден» работают с завышенным удельным расходом электроэнергии. Обследование вентиляторных установок рудника выявило значительное превышение фактического удельного расхода электроэнергии по сравнению с нормативными значениями (например, для ГВУ-4 фактический расход составил 5,79 кВт/м³ против нормативного 1,86 кВт/м³). Проверочные расчеты мощности электродвигателей показали, что установленные двигатели имеют завышенную мощность (например, для ГВУ-4 1250 кВт по сравнению с расчетной 642,9 кВт). Предложена замена двигателей на более подходящие (например, для ГВУ-4 – двигатель мощностью 800 кВт вместо 1250 кВт), что снизит энергопотребление и эксплуатационные затраты. Ожидаемый экономический эффект от замены двигателей – 4,9 млн руб. в год за счет сокращения потерь электроэнергии.

2. Анализ данных за 8 лет показал обратную корреляцию между объемом добычи руды и удельным расходом электроэнергии. Увеличение производительности на 10–15 % снижает удельный расход энергии на 2–5 %. Исключение периодов низкой загрузки оборудования и внедрение автоматизированных систем управления позволят минимизировать энергопотери. Расчетная годовая экономия электроэнергии составляет 4,87 млн руб.

3. На шахте «Капитальная» используется устаревшая одноканатная система (ШПМ 4×36) с низкой производительностью и неуравновешенная. Рекомендовано внедрение современных многоканатных

Таблица 11

Результаты расчетов потерь мощности для всех двигателей

Тип двигателя	Электрические потери в обмотке статора $P_{\text{э}}$, кВт	Потери на возбуждение $P_{\text{в}}$, кВт	Механические потери $P_{\text{мех}}$, кВт	Добавочные потери при нагрузке $P_{\text{доб}}$, кВт	Суммарные потери в двигателе ΣP , кВт
СДВ-15-64-10У3	90,66	16,1	16,4	6,25	129,4
СД-2-85-47-8У4 СД-13-42-8	10,1	14,5	2,07	2,5	29,17
СДВВ-15-39-10	32,98	20,8	7,83	4	65,6
СДВ-15-34-12	6,28	10,82	2,21	2	21,3

Таблица 12

Значения суммарных потерь электроэнергии и экономического эффекта

Параметры	Значение
Суммарные потери в первом двигателе ΔP_1 , кВт	216,91
Суммарные потери во втором двигателе ΔP_2 , кВт	129,5
Разность потерь ΔP , кВт	87,4
Потери электроэнергии ΔW , кВт·ч	749 018
Экономия денежных средств ΔC , млн руб.	4,87
Экономический эффект от замены электродвигателей ΔZ , млн руб.	4,9



установок (например, МК-2,25×4), которые обеспечивают более высокую производительность, снижение вибраций и статическую уравновешенность. Проверочные расчеты подтвердили соответствие мощности установленных двигателей подъемных машин (670 кВт) расчетным требованиям, в то же время модернизация систем управления может дополнительно повысить эффективность.

4. Предложен алгоритм усечения массива статистических данных на основе закона Грамма–Шарлье. Получены зависимости для расчета и прогнозирования объема выработанной руды и изменения экономики электроэнергетики.

5. Реализация предложенных мероприятий не только повысит энергоэффективность, но и улучшит экологические показатели за счет снижения выбросов. Результаты исследования могут быть использованы для горнодобывающих предприятий с аналогичными условиями эксплуатации.

6. Дальнейшая работа может быть направлена на интеграцию искусственного интеллекта для прогнозирования режимов работы оборудования и оптимизации энергопотребления в реальном времени. Требуется детальный анализ структуры энергозатрат по отдельным процессам (дробление, транспортировка) для точечной оптимизации.

Список литературы / References

1. Баловцев С.В. Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах. *Горные науки и технологии*. 2022;7(4):310–319. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>
Balovtsev S.V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):310–319. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>
2. Пелипенко М.В., Баловцев С.В., Айнбиндер И.И. К вопросу комплексной оценки рисков аварий на рудниках. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(11):180–192. <https://doi.org/25018/0236-1493-2019-11-0-180-192>
Pelipenko M.V., Balovtsev S.V., Aynbinder I.I. Integrated accident risk assessment in mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(11):180–192. (In Russ.) <https://doi.org/25018/0236-1493-2019-11-0-180-192>
3. Liu J., Ma Q., Wang W. et al. Risk level assessment and co prediction of underground mines for poisoning and asphyxiation accidents. *Sustainability (Switzerland)*. 2022;14(24):16640. <https://doi.org/10.3390/su142416640>
4. Brigida V.S., Zinchenko N.N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. *Journal of Mining Science*. 2014;50:60–64. <https://doi.org/10.1134/S1062739114010098>
5. Dzhioeva A.K., Brigida V.S. Spatial non-linearity of methane release dynamics in underground boreholes for sustainable mining. *Journal of Mining Institute*. 2020;245:522–530. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.3>
6. Semin M., Kormshchikov D. Application of artificial intelligence in mine ventilation: a brief review. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2024;7:1402555. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1402555>
7. Du D., Lei W., Li X., Li Z. Research on simulation and optimization of complex ventilation system in multiple level of Shaxi copper mine. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2024;27(10):3283–3293. [https://doi.org/10.6180/jase.202410_27\(10\).0002](https://doi.org/10.6180/jase.202410_27(10).0002)
8. Wang J., Xiao J., Xue Y. et al. Optimization of airflow distribution in mine ventilation networks using the modified sooty tern optimization algorithm. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2024;41(1):239–257. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00895-y>
9. Семин М.А., Попов М.Д. Теоретический анализ влияния распределенных тепловых источников на устойчивость течения воздуха в наклонных горных выработках. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16;3(61):1374–1383. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1374-1383>
Semin M.A., Popov M.D. Theoretical analysis of the influence of distributed heat sources on the stability of air flow in inclined mine workings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16;3(61):1374–1383. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1374-1383>
10. Босиков И.И., Ключев Р.В., Силаев И.В., Стась Г.В. Комплексная оценка трудноформализуемых вентиляционно-технологических процессов на угольных шахтах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):516–527. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-516-527>
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V., Stas G.V. Comprehensive assessment of formalized ventilation difficulty and technological processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):516–527. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-516-527>
11. Li S., Huang Y., Qiu G. et al. Research and application of dust removal performance optimization of exhaust ventilation system in fully-mechanized excavation rock tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025;155:106160. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106160>
12. Chen J., Zhi Y. Experimental study on the dust control performance of rotating fog curtain under the perturbation of long-pressure and short-pumping ventilation. *Scientific Reports*. 2024;14(1):29844. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81560-2>



13. Босиков И.И., Клюев Р.В., Майер А.В., Стась Г.В. Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):97–106. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106>
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Mayer A.V., Stas G.V. Development of a method for analyzing and evaluating the optimal state of aerogasodynamic processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):97–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106>
14. Валиев Н.Г., Голик В.И., Габараев О.З., Лебзин М.С. Алгоритм определения эффективности комбинирования технологий добычи металлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11–2):52–62. https://doi.org/10.25018/0_236_1493_2022_112_0_52
Valiev N.G., Golik V.I., Gabaraev O.Z., Lebzin M.S. Algorithm for determining the efficiency of combining metamining technologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11–2):52–62. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0_236_1493_2022_112_0_52
15. Nevskaya M.A., Raikhlin S.M., Chanysheva A.F. Assessment of energy efficiency projects at Russian mining enterprises within the framework of sustainable development. *Sustainability (Switzerland)*. 2024;16(17):7478. <https://doi.org/10.3390/su16177478>
16. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(2):169–180. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_169
Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(2):169–180. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_169
17. Giraud L., Galy B. Fault tree analysis and risk mitigation strategies for mine hoists. *Safety Science*. 2018;110(Part A):222–234. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.010>
18. Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O. et al. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021;1258:262–271. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_24
19. Shchemeleva Y.B., Sokolov A.A., Labazanova S.H. Development of hardware and a system for analyzing energy parameters based on simulation in SimInTech. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;012082. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2176/1/012082>
20. Pervuhin D.A., Trushnikov V.E., Abramkin S.E. et al. Development of methods to improve stability of underground structures operation. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025;38(2):472–487. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.02b.20>

Информация об авторе

Роман Владимирович Клюев – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и управление», Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Information about the author

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Поступила в редакцию 04.10.2024
Поступила после рецензирования 07.02.2025
Принята к публикации 14.02.2025

Received 04.10.2024
Revised 07.02.2025
Accepted 14.02.2025