ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):48-61
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.926.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_48

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

В.С. Шестаков[1], П.Г. Безкоровайный[2], Ю.А. Лагунова[1,3], А.П. Комиссаров[1,3], Р.Р. Абраров[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: yu.lagunova@mail.ru
[2] Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан
[3] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассмотрен вариант совершенствования конструкции одного из основных видов оборудования гидравлического карьерного экскаватора, используемого при добыче полезных ископаемых открытым способом. Исследованиями выявлен недостаток используемых в настоящее время гидравлических экскаваторов – действие силового потока на стрелу, в основном на нижние поверхности, как от усилий гидроцилиндров стрелы, так и от гидроцилиндров рукояти. Такое действие потребовало увеличения толщины листов стрелы и, соответственно, массы. Еще один недостаток существующих экскаваторов – вынесение гидроцилиндров стрелы, имеющих значительную массу, на такое расстояние от оси вращения платформы, которое приводит к увеличению опрокидывающего момента относительно опорно-поворотного круга. Поэтому необходимо увеличивать величину противовеса. Для исключения отмеченных недостатков предложена новая схема рабочего оборудования с заменой гидроцилиндров стрелы механизмом с напорной балкой, располагаемым на надстройке. Второе направление для повышения эффективности гидравлических экскаваторов – это применение рациональных значений параметров при изготовлении рабочего оборудования. Показана на основе использования системы АРМ WinMachine методика определения толщины листов, из которых изготовлены стрела, рукоять и ковш (рабочее оборудование) гидравлического экскаватора. Определены наилучшие параметры рабочего оборудования по условию прочности, с учетом критерия массы.

Ключевые слова: рабочее оборудование гидравлического экскаватора, расчет, модель, напряжение, прочность.

Для цитирования: *Шестаков В. С., Безкоровайный П. Г., Лагунова Ю. А., Комиссаров А. П., Абраров Р. Р.* Совершенствование рабочего оборудования карьерного гидравлического экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 48–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_48.

Improvement of the working equipment of a quarry hydraulic excavator

V.S. Shestakov[1], P.G. Bezkorovayny[2], Yu.A. Lagunova[1,3], A.P. Komissarov[1,3], R.R. Abrarov[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: yu.lagunova@mail.ru
[2] Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan
[3] Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The article considers a variant of improving the design of one of the main types of equipment of a hydraulic quarry excavator used in open-pit mining. The studies revealed a disadvantage of currently used hydraulic excavators – the effect of the power flow on the boom, mainly on the lower surfaces, both from the efforts of the boom hydraulic cylinders and from the handle hydraulic cylinders. This action required an increase in the thickness of the boom sheets and, accordingly, the mass. Another disadvantage of existing excavators is the extension of the boom hydraulic cylinders, which have a significant mass, to such a distance from the platform rotation axis that leads to an increase in the overturning moment relative to the slewing ring. Therefore, it is necessary to increase the value of the counterweight. To eliminate the noted disadvantages, a new scheme of the working equipment is proposed with the replacement of the boom hydraulic cylinders with a mechanism with a pressure beam located on the superstructure. The second direction for increasing the efficiency of hydraulic excavators is the use of rational parameter values in the manufacture of working equipment. The article shows, based on the use of the APM WinMachine system, a method for determining the thickness of sheets from which the boom, handle and bucket (working equipment) of a hydraulic excavator are made. The best parameters of the working equipment are determined according to the strength condition, taking into account the mass criterion.

Key words: working equipment of a hydraulic excavator, calculation, model, stress, strength.

For citation: Shestakov V. S., Bezkorovayny P. G., Lagunova Yu. A., Komissarov A. P., Abrarov R. R. Improvement of the working equipment of a quarry hydraulic excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):48-61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_48.

Введение

Проблемам совершенствования конструкций гидравлических карьерных экскаваторов посвящено большое число научных работ, в которых рассмотрены вопросы проектирования собственно экскаватора с ходовым оборудованием [1 — 7], представлены исследования, относящиеся к рабочему оборудованию [8 — 11], имеются также публикации по эксплуатации гидравлических экскаваторов в реальных горных условиях [12 — 16].

Гидравлические экскаваторы зарубежного производства находятся в эксплуатации на горнодобывающих карьерах России в ограниченном количестве, а гидравлических экскаваторов отечественного производства машиностроительных предприятий «ИЗ-КАРТЭКС» и «Уралмашзавод» — вообще единицы.

В известных конструкциях гидравлических экскаваторов подъем и опускание (поворот) стрелы, а также стопорение стрелы в конкретном положении происходит с помощью гидропривода. Воздействие на стрелу оказывают и рукоять, и ковш, и гидроцилиндры этих элементов. Гидроцилиндры крепятся к нижней поверхности стрелы кронштейнами, поэтому весь силовой поток от гидроцилиндров предается через эту поверхность [1].

Решение задач исследований

Для разделения действия силовых потоков на стрелу и снижения опрокидывающего момента от рабочего оборудования относительно опорного круга разработана схема, приведенная ранее в статье [8].

По указанной схеме составлена компьютерная модель рабочего оборудования экскаватора (рис. 1), которая состоит из стрелы *1*, рукояти *2*, механизма

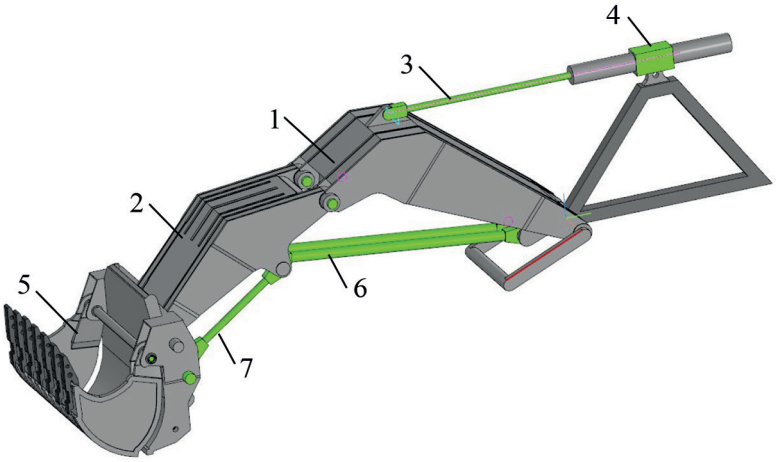

Рис. 1. 3D-модель рабочего оборудования экскаватора ЭГ-110
Fig. 1. 3D model of working equipment of the EG-110 excavator

поворота стрелы с напорной балкой *3*, ковша *5*, гидроцилиндров подъема-опускания рукояти *6* и поворота ковша *7*. Напорная балка установлена в седловом подшипнике *4* на двуногой стойке и шарнирно соединена с верхней частью стрелы *1*.

В предложенной схеме в конструкцию рабочего оборудования включена напорная балка, работающая на растяжение–сжатие. Преимуществом напорной балки является ее меньшая масса по сравнению с гидроцилиндром.

Принцип действия напорной балки аналогичен функционалу напорного механизма карьерного экскаватора типа «механическая лопата», то есть движение напорной балки может осуществляться в седловом подшипнике зубчато-реечного напора или канатным напором.

Если использовать гидроцилиндр, то он должен располагаться на надстройке рядом с осью вращения экскаватора, для того чтобы снизить момент инерции поворотной платформы экскаватора и его опрокидывающий момент.

Рассмотрим принцип действия стрелы, рукояти, ковша и гидроцилиндров согласно схеме на рис. 1. Стрела *1* неподвижна и удерживается напорной балкой. Ковш *5* осуществляет процесс копания с помощью гидроцилиндра *7* за счет поворота ковша относительно оси крепления к рукояти экскаватора, а рукоять в этот момент с помощью гидроцилиндра *6* удерживается в неподвижном положении.

Напорная балка соединяется со стрелой в верхней части стрелы, что практически исключает изгибающий момент. Исключение гидроцилиндров поворота стрелы уменьшит нагрузку на стрелу, что позволит снизить сечение элементов стрелы и соответственно массы. Исключение гидроцилиндров стрелы одновременно уменьшит опрокидывающий момент относительно опорного круга и гусеничного ходового оборудования, а также снизит момент инерции поворотной платформы экскаватора.

В случае снижения момента инерции поворотной платформы появляется возможность либо увеличения вместимости ковша при сохранении неизменным удерживающего момента, либо снижения продолжительности рабочего цикла экскаватора при постоянной вместимости ковша.

Для исследований по доказательству эффективности предлагаемой схемы раз-

работаны математические модели кинематического и силового анализа и выполнен поиск рациональных параметров по критерию массы. Предложения по использованию математического моделирования для расчета параметров известны по публикациям [17 — 20], но в нашем случае моделирование предназначено для решения нескольких задач: определения рабочей зоны, выявления максимально возможных усилий при копании в пределах рабочей зоны, определения нагрузок для выполнения прочностных расчетов. Модели, разработанные для решения определенных вопросов, возникающих при проектировании экскаваторов, представлены в [21], в настоящей статье приведена только модель силового анализа.

Согласно рис. 1, кинематический анализ дает возможность определить текущие координаты и углы наклона соответственно стрелы, рукояти, ковша, координаты осей *A*, *T* и меняющиеся расстояния между *TB*, *FP*, *RD* с учетом размеров рабочего оборудования. Исследования выполнены для гидравлического экскаватора ЭГ-110 с ковшом 5,5 м^3 (рис. 2).

Модель силового анализа должна учитывать особенности рабочего процесса, который оценивает одновременную работу трех механизмов — движения рабочего оборудования (стрелы, рукояти, ковша), и устойчивость экскаватора в момент копания.

При копании ковшом относительно шарнира «рукоять-ковш» (см. рис. 1) энергопотребление имеет минимальное значение.

Касательная составляющая усилия копания на зубьях ковша уменьшается, если возникает повышение давления в системе выше настройки предохранительного клапана, то есть происходит смещение штоков гидроцилиндров стрелы или рукояти; соответственно, их

Рис. 2. Вид экскаватора ЭГ-110
Fig. 2. Type of excavator EG-110

подъем или опускание. Отрыв гусениц от площадки забоя также произойдет при уменьшении усилий копания на зубьях ковша.

Таким образом, принцип функционирования всех механизмов рабочего оборудования (стрелы, рукояти, ковша и гидроцилиндров), а также устойчивость экскаватора в целом зависят от максимального усилия копания на зубьях ковша гидравлического экскаватора.

В известных методиках [16, 21] определение усилий на зубьях ковша производится в расчетных положениях по максимальным усилиям со стороны гидроцилиндров рабочего оборудования. В этих методиках вводятся ограничения о неподвижности стрелы и рукояти при копании поворотом ковша, неподвижности ковша относительно рукояти и неподвижности стрелы при копании поворотом рукояти. В реальном рабочем процессе наполнения ковша при копании поворотом ковша возникает срабатывание предохранительных клапанов в приводах стрелы и рукояти, вызванное повышением давления в гидросистеме выше допустимых значений. Срабатывание клапанов приводит к подъему-опусканию стрелы относительно платформы экскаватора или рукояти относительно стрелы, из-за чего усилие

Таблица 1

Пример результатов расчета
Example of calculation results

Расстояние между осями, м			Координаты вершины зуба, м		Усилие в балке, штоках гидроцилиндров, кН			Угол ψ, град	Усилие копания P_{01}, кН
TB	*FP*	*RD*	$X_к$	$У_к$	*TB*	*FP*	*RD*		
3,40	3,20	1,55	6,96	3,81	1623	1573	1592	229	249,8
3,40	3,20	1,76	7,41	4,64	2690	2333	1598	254	392,7
3,40	3,20	1,98	7,49	5,37	2880	2439	1593	–86	417,1
3,40	3,20	2,19	7,32	6,05	2438	2216	1597	–67	392,7
3,40	3,20	2,40	6,91	6,70	1587	1756	1597	–47	327,7
3,40	3,87	1,55	7,67	6,62	2029	1684	1592	260	210,6
3,40	3,87	1,76	7,63	7,56	2525	2533	1592	–74	362,4
3,40	3,87	1,98	7,31	8,22	1955	2696	1593	–55	400,7
3,40	3,87	2,19	6,82	8,72	1017	2484	1594	–36	388,8
3,40	3,87	2,40	6,12	9,05	–340	1761	1600	–15	377,2

на зубьях ковша снижается и не может достигнуть значений, пропорциональных максимальным усилиям в гидроцилиндрах поворота ковша.

Ввиду указанных недостатков разработана методика расчета максимально возможных усилий на зубьях ковша, основанная на использовании поиска допустимого решения. Суть методики сводится к тому, что определяется условие равновесия, учитывая максимальное усилие со стороны гидроцилиндров ковша, а оно, в свою очередь, зависит от усилий на зубьях ковша и от усилий в гидроцилиндрах рукояти и стрелы. Если в гидроцилиндрах стрелы и рукояти усилия превышают допустимые значения, то уменьшаются усилия в гидроцилиндре ковша, поэтому расчеты повторяются до обеспечения условия не превышения максимальных значений усилий в гидроцилиндрах. Аналогичная проверка выполняется и для условия исключения отрыва гусениц экскаватора от поверхности забоя. Расчеты по поиску допустимого решения должны выполняться многократно, поэтому разработана компьютерная программа на алгоритмическом языке.

Ниже приведена модель силового анализа.

Вывод результатов силового и кинематического анализа оформлен в виде таблицы (табл. 1), рисунка рабочей зоны ковша (рис. 3, *а*), а также столбиковых диаграмм (рис. 3, *б*).

Анализируя вид диаграмм, констатируем, что касательная и нормальная составляющие усилия копания на зубьях ковша гидравлического экскаватора зависят от максимальных значений усилий на штоках гидроцилиндров, которые показаны на рис. 3 пунктирными линиями. В случае, когда величина усилия копания на зубьях ковша недостаточна для его заполнения, надо решить задачу определения, в каком гидроцилиндре (гидроцилиндр ковша, гидроцилиндр рукояти или гидроцилиндр стрелы) необходимо увеличить максимальное усилие.

Например, по рис. 3, *б* видно, что усилия на штоке гидроцилиндра ковша достигли максимальных значений и ограничили усилие копания, однако гид-

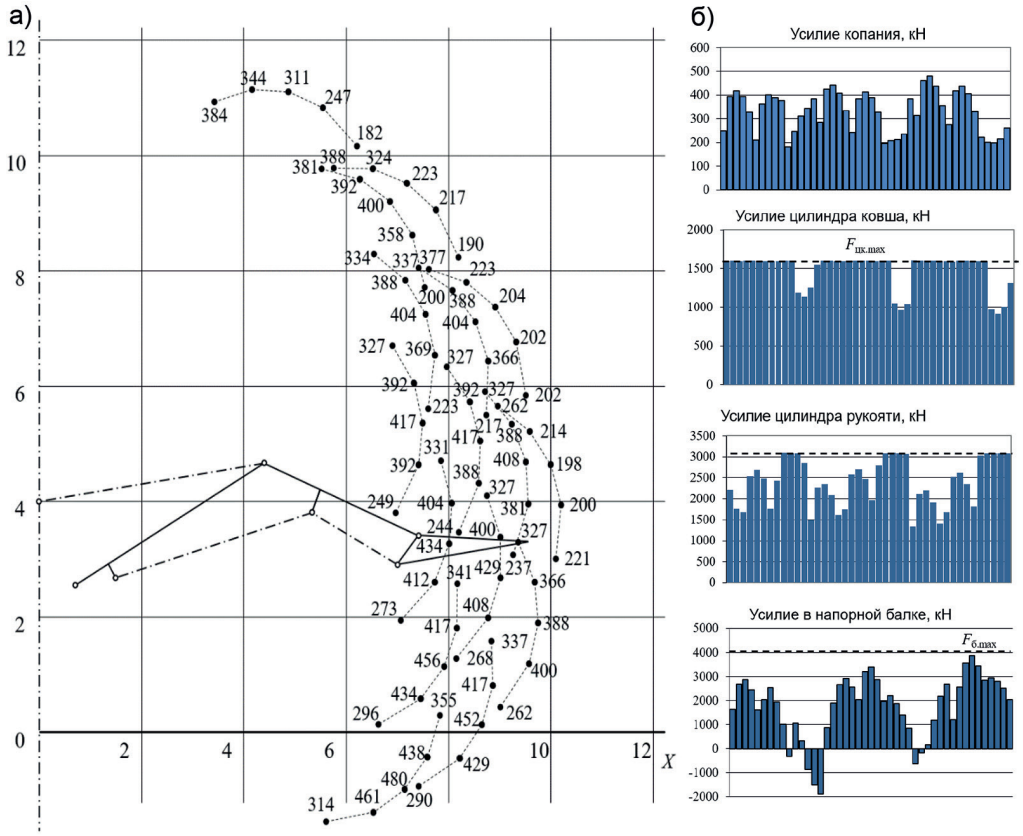

Рис. 3. Результаты расчета: рабочая зона с усилиями на зубьях ковша (а); диаграммы усилий (б)
Fig. 3. Calculation results: working area with forces on bucket teeth (a); force diagrams (b)

роцилиндр движения рукояти имеет некоторый запас по усилию. Если же гидравлический экскаватор уже находится в эксплуатации, то для повышения усилий на штоках гидроцилиндров рабочего оборудования необходимо увеличить давление в системе, а при проектировании новых моделей следует изменить конструкцию гидроцилиндров, например, увеличить диаметры или изменить положения кронштейнов крепления.

За счет изменения конструкции и перемещения центра некоторых элементов масс ближе к оси вращения возможно увеличение вместимости ковша при обеспечении уравновешенности предлагаемой конструкции экскаватора такой же, как у базовой.

$$M_{\text{опр.б}} = M_{\text{опр.н}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{опр.б}}$, $M_{\text{опр.н}}$ — доля опрокидывающего момента от рабочего оборудования базовой и новой модели экскаватора.

Для определения возможного увеличения вместимости ковша в условие равновесия можно включать только изменяемые элементы новой модели

$$M_{\text{опр.б}} = m_{\text{к.б}} \cdot R_{\text{к.б}} + m_{\text{р.б}} \cdot R_{\text{р.б}} + m_{\text{с.б}} \cdot R_{\text{с.б}} + m_{\text{гц.с.б}} \cdot R_{\text{гц.с.б}}, \quad (2)$$

$$M_{\text{опр.н}} = m_{\text{к.н}} \cdot R_{\text{к.н}} + m_{\text{р.н}} \cdot R_{\text{р.н}} + m_{\text{с.н}} \cdot R_{\text{с.н}} + m_{\text{м.с.н}} \cdot R_{\text{м.с.н}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{к.б}}$, $m_{\text{к.н}}$, $m_{\text{р.б}}$, $m_{\text{р.н}}$, $m_{\text{с.б}}$, $m_{\text{с.н}}$, $m_{\text{гц.с.б}}$, $m_{\text{м.с.н}}$ — массы рабочего оборудования (ковша, рукояти, стрелы, гидроцилиндра стрелы), механизма поворота стрелы

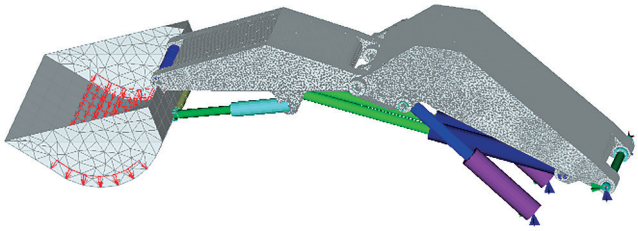

Рис. 4. Расчетная модель
Fig. 4. Calculation model

базовой и новой модели; $R_{к.б}$, $R_{к.н}$, $R_{р.б}$, $R_{р.н}$, $R_{с.б}$, $R_{с.н}$, $R_{гц.с.б}$, $R_{м.с.н}$ — расстояние от опорного круга до центров тяжести рабочего оборудования (ковша, рукояти, стрелы, гидроцилиндра стрелы), механизма поворота стрелы базовой и новой модели.

Изменение конструктивной модели стрелы, рукояти, ковша и их взаимосвязей приводит к перераспределению силовых потоков на стреле. Это дает возможность снизить сечения листов, из которых изготовляется стрела, уменьшить массу и опрокидывающий момент, как следствие, появляется возможность увеличения вместимости ковша.

Рациональные значения толщины листов определяются расчетами с использованием программных продуктов исследования напряженно-деформированного состояния.

Исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций рабочего оборудования гидравлического экскаватора, а также выбор наилучших его параметров выполняются согласно традиционным методам [22, 23] и в соответствующей последовательности.

В качестве примера составим модель конструкции по фактическим чертежам экскаватора ЭГ-110. В модели рабочее оборудование (стрела, рукоять и ковш) реализованы пластинчатыми конечными элементами, втулки — объемными элементами, гидроцилиндры и напорная балка — стержневыми.

Параметры стрелы. Толщина нижних и верхних листов — 20 мм; толщина стенок продольных вертикальных наружных и внутренних имеет среднюю величину 80 мм; остальные элементы: области у проушин соединения с рукоятью и платформой — 40 мм, области в средней части — 20 мм; трубы внутренние — 25 мм.

Задаем толщины листов для базовой модели рукояти. Листы нижние (под проушинами до втулок соединения со стрелой — 40 мм, остальные области — 20 мм); листы верхние — 20 мм; стенки наружные и внутренние продольные вертикальные (средняя — 60 мм), остальные: области у проушин соединения с рукоятью и платформой — 40 мм, области в средней части — 20 мм; трубы внутренние — 25 мм.

Полученная модель конструкции рабочего оборудования приведена на рис. 4. Цель исследований — доказательство эффективности разработанной конструкции рабочего оборудования при исключении гидроцилиндров стрелы, а также применение рациональных значений толщины листов стрелы и рукояти, поэтому при расчетах использована упрощенная модель ковша, толщина листов в нем подобрана таким образом, чтобы масса совпадала с массой ковша реальной модели. Суммарная масса стрелы и рукояти у созданной модели составила 13,98 т (по чертежам ЭГ-110 масса 13,57 т), координата центра масс относительно осей крепления к платформе 3,3 м.

Принимаем нагрузку на зубьях ковша 400 кН для нескольких вариантов выполнения рабочего оборудования (стрелы и рукояти), как для базовой модели с гидроцилиндрами стрелы (рис. 5), так и для предлагаемой конструкции с напорной балкой (рис. 6) и проводим исследования.

Анализ результатов: получены избыточные запасы прочности в верхних и вертикальных листах стрелы и рукояти, а также в трубах, используемых для повышения жесткости, однако нижние листы стрелы имеют допустимые уровни напряжений.

Эти результаты дали возможность изменить конструкцию рабочего оборудования для перемещения части силового потока с нижней поверхности стрелы на ее верхнюю область, в результате разработана схема по рис. 1.

Для исследований по предлагаемому рабочему оборудованию составлена расчетная модель, аналогичная модели на рис. 4, на основе параметров базовой модели.

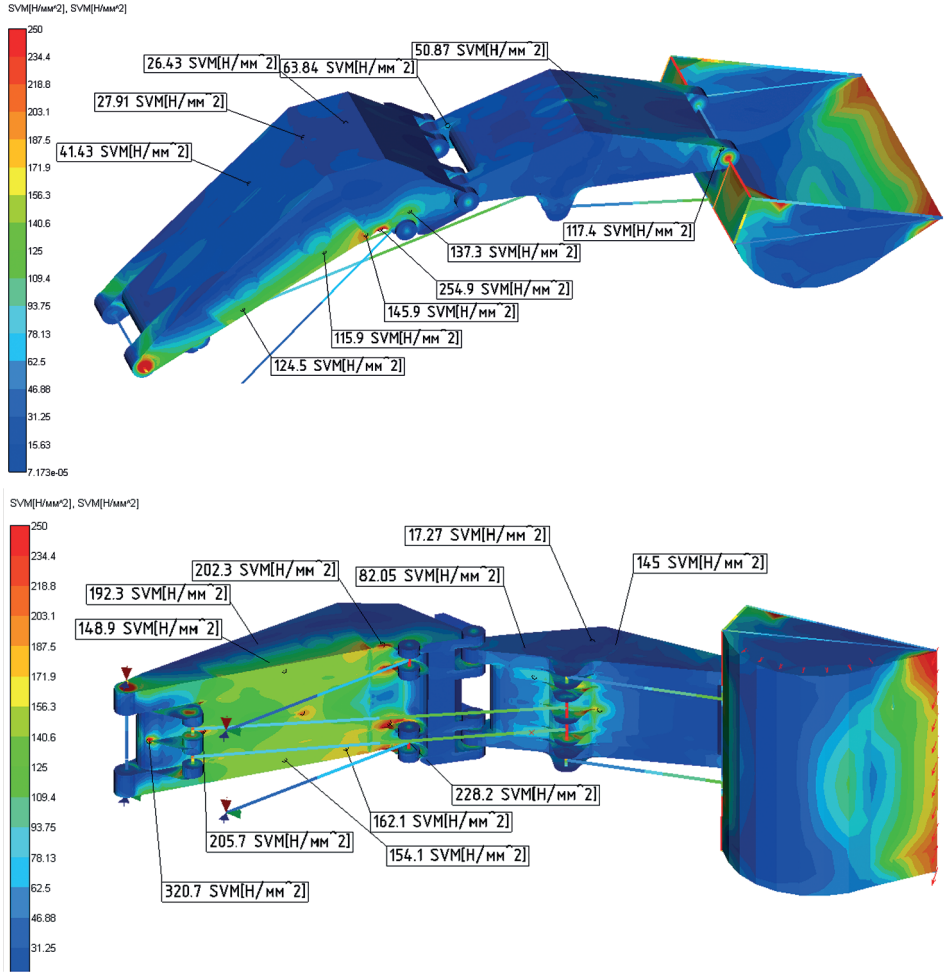

Рис. 5. Карта напряжений рабочего оборудования базовой модели
Fig. 5. Voltage map of the working equipment of the basic model

Выполнены следующие изменения.

Стрела. Нижние листы 20 мм; верхние листы 10 мм; стенки наружные и внутренние продольные вертикальные: средняя величина 40 мм, для остальных стенок области у проушин соединения с рукоятью и платформой 20 мм, области в средней части 20 мм; трубы внутренние 25 мм.

Рукоять. Листы нижние: под проушинами до втулок соединения со стрелой — 40 мм, остальные области 20 мм; листы верхние 20 мм; стенки наружные и внутренние продольные вертикальные (средняя 60 мм, для остальных стенок — области у проушин соединения с рукоятью и платформой 40 мм, области в средней части 20 мм); трубы внутренние 25 мм.

Суммарная масса стрелы и рукояти у созданной модели — 12,02 т (снижение примерно на 2 т по сравнению с базовой моделью), координата центра масс относительно осей крепления к платформе — 3,3 м. Создав новую схему рабочего оборудования с напорной балкой, проводим расчет производительности экскаватора.

Используя методику определения значений параметров на основе исследования напряженно-деформированного состояния металлоконструкций рабочего оборудования для предлагаемой новой схемы, определяем производительность

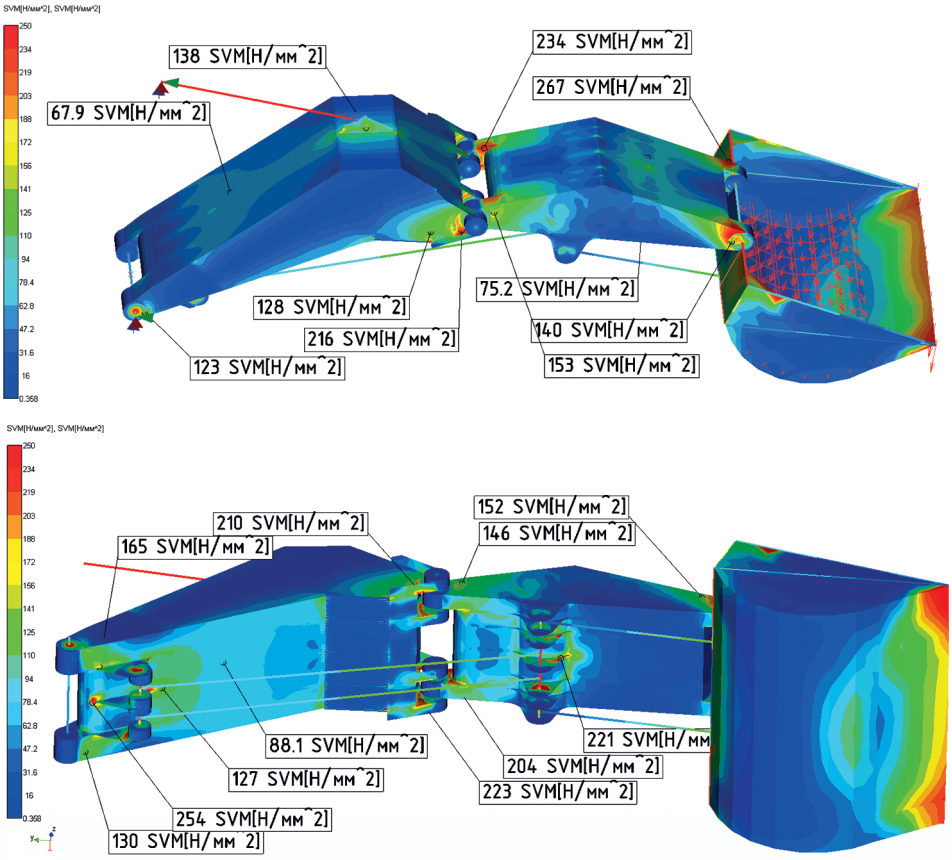

Рис. 6. Карта напряжений рабочего оборудования новой модели
Fig. 6. Voltage map of the working equipment of the new model

Таблица 2

Оценка результатов расчета
Evaluation of calculation results

Базовая модель ЭГ-110			Новая схема рабочего оборудования		
толщины верхних листов стрелы, мм	**доля опрокидывающего момента, кНм**	*** вместимость ковша, м³**	**толщины верхних листов стрелы, мм**	**доля опрокидывающего момента, кНм**	*** вместимость ковша, м³**
20	158	5,5	10	61	5,839
* При плотности породы $\gamma_п$ = 2 т / м³					

по известным зависимостям и получаем, что за счет увеличения объема ковша повышается и производительность экскаватора ЭГ-110 по условию сохранения величины опрокидывающего момента ($M_{опр}$ = 5740 кНм).

Приведем результаты расчета в табличной форме (табл. 2).

Заключение

1. При сохранении продолжительности цикла, массы противовеса, как у базовой модели, относительное увеличение производительности соответственно увеличению вместимости ковша составит 6%, что доказывает правильность новой конструктивной схемы рабочего оборудования гидравлического экскаватора и подтверждает оригинальность методики выбора оптимальных параметров на основе метода конечных элементов.

2. Наряду с повышением производительности за счет снижения массы стрелы и рукояти имеется возможность увеличения вместимости ковша за счет расположения напорного механизма на надстройке и исключения гидроцилиндров стрелы, однако точное значение такого увеличения может быть определено только после выполнения конструкторской проработки.

3. Увеличение производительности за счет совершенствования рабочего оборудования не потребует повышения мощности приводов, массы противовеса и, как следствие, приведет к сокращению времени цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лагунова Ю. А.*, *Макарова В. В.*, *Быков Д. В.*, *Адамков А. В.* Оценка технического состояния редуктора хода карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. — 2024. — № 1 (171). — С. 40 — 49.

2. *Побегайло П. А.* Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. — М.: Ленанд, 2014. — 296 с.

3. *Казаков В. А.*, *Окороков Ю. В.* Новые гидравлические экскаваторы ЭГ-110 и ЭГО-110 // Горное оборудование и электромеханика. — 2007. — № 12. — С. 46 — 50.

4. *Пудов Е. Ю.*, *Занг К. К.*, *Кузин Е. Г.*, *Кривенко А. Е.* Оценка влияния условий эксплуатации на производительность работы системы охлаждения рабочей жидкости гидравлического карьерного экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 1(153). — С. 51 — 58. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-1-51-58.

5. *Зыков П. А.* Методика оптимального выбора модели карьерного одноковшового гидравлического экскаватора под заданные горно-геологические и технические условия // Горное оборудование и электромеханика. — 2014. — № 1. — С. 37 — 42.

6. *Xu G., Feng Z., Wang W., Ding H.* Constrained multiobjective optimization design for ordinary shovel attachment of hydraulic excavator based on evolutionary algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024, vol. 135, article 108839. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108839.

7. *Mishra S. K., Goyal N. K., Mukherjee A.* Reliability analysis and life cycle cost optimization of hydraulic excavator // Journal of Reliability and Statistical Studies. 2024, pp. 297 — 328. DOI: 10.13052/jrss0974-8024.1626.

8. *Shestakov V., Babenkov P., Horoshavin S.* Features of designing hydraulic excavator in APM WinMachine // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 224, article 02046. DOI: 10.1051/matecconf/201822402046.

9. *Lee S. J., Chang P. H.* Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012, vol. 26, no. 1, pp. 195 — 204. DOI: 10.1007/s12206-011-0938-2.

10. *Xu Gongyue, Feng Zemin Erkuo Guo* Many-objective optimization design for trirocker working mechanism of face-shovel hydraulic excavator // Jixie Gongcheng Xuebao. 2023, vol. 59, no. 3, article 54. DOI: 10.3901/jme.2023.03.054.

11. *Chen J., Qing F., Pang X.* Mechanism optimal design of backhoe hydraulic excavator working device based on digging paths // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014, vol. 28, no. 1, pp. 213 — 222. DOI: 10.1007/s12206-013-0955-4.

12. *Нилов В. А., Жулай В. А., Тюнин В. Л., Федоров Е. В.* Разгрузка металлоконструкции стрелы гидравлического экскаватора от силового воздействия на забой // Строительные и дорожные машины. — 2023. — № 11. — С. 30 — 32.

13. *Салихов Р. Ф., Пермяков В. Б.* Исследование влияния динамики технических параметров на эксплуатационную производительность гидравлических одноковшовых экскаваторов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2024. — Т. 21. — № 4(98). — С. 540 — 560. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560.

14. *Бураков А. М., Панишев С. В., Алькова Е. Л., Хосоев Д. В.* Опыт применения гидравлических экскаваторов в сложных горно-геологических и климатических условиях // Горная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 90 — 96. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.

15. *Рубцов С. К., Шлыков А. Г., Кочегаров Е. Н., Шеметов П. А., Мальгин В. О.* Опыт применения гидравлических и канатных экскаваторов на карьере Мурунтау // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — № 3. — С. 268 — 276.

16. *Хорешок А. А., Пудов Е. Ю.* Проектирование перспективного конструктивного исполнения ковша гидравлического экскаватора схемы «обратная лопата» // Горное оборудование и электромеханика. — 2014. — № 8(105). — С. 37 — 44.

17. *Шестаков В. С., Телиман И. В., Безкоровайный П. Г.* Исследование нагруженности рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. — 2024. — № 1 (171). — С. 18 — 23. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23.

18. *Побегайло П. А.* Создание методологии автоматизированного проектирования горных и строительных роботов-манипуляторов (на примере одноковшовых гидравлических экскаваторов) / Аналитическая механика, устойчивость и управление: труды XI Международной Четаевской конференции. Т. 4. Секция 4. Компьютерные технологии в науке, образовании, управлении производством. — Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. — С. 168 — 177.

19. *Даньярова А. С., Тогизбаева Б. Б., Балабеков К. Г., Кенесбек А. Б.* Выбор метода расчета усилий копания и нагрузок, действующих на элементы рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. — 2023. — Т. 145. — № 4. — С. 188 — 203. DOI: 10.32523/2616-7263-2023-145-4-188-203.

20. *Веревочкин Н. Г.* Повышение эффективности проектирования стрелы гидравлического экскаватора с применением современных методов оптимизации // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2024. — № 29. — С. 156 — 162. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-29-156-161.

21. *Нилов В. А., Жулай В. А., Тюнин В. Л., Федоров Е. В.* Напряженно-деформированное состояние стрелы гидравлического экскаватора при работе с управляемой опорой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 7. — С. 508 — 512. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-508-509.

22. *Безкоровайный П. Г.*, *Шестаков В. С.* Определение рациональных параметров рабочего оборудования гидравлического экскаватора с напорным звеном // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 25—35. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35.

23. *Шелофаст В. В.*, *Ростовцев М. Ю.*, *Абдулкеримов И. Д.* Анализ методов расчета конструкций на выносливость при стационарных эксплуатационных режимах переменного нагружения с целью валидации отечественной CAE-системы APM StructFEM // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2021. — № 8(737). — С. 27—38. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-8-27-38. ГИАБ

REFERENCES

1. Lagunova Yu. A., Makarova V. V., Bykov D. V., Adamkov A. V. Assessment of the technical condition of the travel gearbox of a quarry excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024, no. 1 (171), pp. 40—49. [In Russ].

2. Pobegaylo P. A. *Moshchnye odnokovshovye gidravlicheskie ekskavatory: Vybor osnovnykh geometricheskikh parametrov rabochego oborudovaniya na rannikh stadiyakh proektirovaniya* [Powerful single-bucket hydraulic excavators: Selection of the main geometric parameters of the working equipment at the early stages of design], Moscow, Lenand, 2014, 296 p.

3. Kazakov V. A., Okorokov Yu. V. New hydraulic excavators EG-110 and EGO-110. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2007, no. 12, pp. 46—50. [In Russ].

4. Pudov E. Yu., Zhang K. K., Kuzin E. G., Krivenko A. E. Evaluation of the influence of operating conditions on the performance of the working fluid cooling system of a hydraulic mining excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021, no. 1(153), pp. 51—58. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-1-51-58.

5. Zykov P. A. Methodology for the optimal selection of a model of a quarry single-bucket hydraulic excavator for given mining, geological and technical conditions. *Mining Equipment and Electromechanics.* 2014, no. 1. pp. 37—42. [In Russ].

6. Xu G., Feng Z., Wang W., Ding H. Constrained multiobjective optimization design for ordinary shovel attachment of hydraulic excavator based on evolutionary algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024, vol. 135, article 108839. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108839.

7. Mishra S. K., Goyal N. K., Mukherjee A. Reliability analysis and life cycle cost optimization of hydraulic excavator. *Journal of Reliability and Statistical Studies*. 2024, pp. 297—328. DOI: 10.13052/jrss0974-8024.1626.

8. Shestakov V., Babenkov P., Horoshavin S. Features of designing hydraulic excavator in APM WinMachine. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 224, article 02046. DOI: 10.1051/matecconf/201822402046.

9. Lee S. J., Chang P. H. Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012, vol. 26, no. 1, pp. 195—204. DOI: 10.1007/s12206-011-0938-2.

10. Xu Gongyue, Feng Zemin Erkuo Guo Many-objective optimization design for trirocker working mechanism of face-shovel hydraulic excavator. *Jixie Gongcheng Xuebao*. 2023, vol. 59, no. 3, article 54. DOI: 10.3901/jme.2023.03.054.

11. Chen J., Qing F., Pang X. Mechanism optimal design of backhoe hydraulic excavator working device based on digging paths. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, vol. 28, no. 1, pp. 213—222. DOI: 10.1007/s12206-013-0955-4.

12. Nilov V. A., Zhulai V. A., Tyunin V. L., Fedorov E. V. Unloading the metal structure of the hydraulic excavator boom from the force impact on the face. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2023, no. 11, pp. 30—32. [In Russ].

13. Salikhov R. F., Permyakov V. B. Study of the influence of the dynamics of technical parameters on the operational performance of hydraulic single-bucket excavators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024, vol. 21, no. 4(98), pp. 540—560. [In Russ]. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560.

14. Burakov A. M., Panishev S. V., Alkova E. L., Khosoev D. V. Experience in using hydraulic excavators in difficult mining, geological and climatic conditions. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 2, pp. 90—96. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.

15. Rubtsov S. K., Shlykov A. G., Kochegarov E. N., Shemetov P. A., Mal'gin V. O. Experience in using hydraulic and rope excavators in the Muruntau quarry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2006, no. 3, pp. 268 — 276. [In Russ].

16. Khoreshok A. A., Pudov E. Yu. Design of a promising design of a hydraulic excavator bucket of the «reverse shovel» type. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2014, no. 8(105), pp. 37 — 44. [In Russ].

17. Shestakov V. S., Teliman I. V., Bezkorovayny P. G. Study of the workload of the working equipment of a hydraulic excavator. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024, no. 1 (171), pp. 18 — 23. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23.

18. Pobegaylo P. A. Creation of a methodology for the automated design of mining and construction robotic manipulators (using single-bucket hydraulic excavators as an example). *Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost' i upravlenie: trudy XI Mezhdunarodnoy Chetaevskoy konferentsii, T. 4. Sektsiya 4. Komp'yuternye tekhnologii v nauke, obrazovanii, upravlenii proizvodstvom* [Analytical mechanics, stability and control: Proceedings of the XI International Chetayev Conference. Vol. 4. Section 4. Computer technologies in science, education, production management], Kazan, 2017, pp. 168 — 177. [In Russ].

19. Danyarova A. S., Togizbaeva B. B., Balabaykov K. G., Kenesbek A. B. Selecting a method for calculating digging forces and loads acting on the elements of the working equipment of a hydraulic excavator. *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series*. 2023, vol. 145, no. 4, pp. 188 — 203. [In Russ]. DOI: 10.32523/2616-7263-2023-145-4-188-203.

20. Verevochkin N. G. Improving the efficiency of hydraulic excavator boom design using modern optimization methods. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024, no. 29, pp. 156 — 162. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-29-156-161.

21. Nilov V. A., Zhulai V. A., Tyunin V. L., Fedorov E. V. Stress-strain state of the hydraulic excavator boom when working with a controlled support. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2024, no. 7, pp. 508 — 512. [In Russ]. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-508-509.

22. Bezkorovayny P. G., Shestakov V. S. Determination of rational parameters of the working equipment of a hydraulic excavator with a pressure link. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 1, pp. 25 — 35. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35.

23. Shelofast V. V., Rostovtsev M. Yu., Abdulkerimov I. D. Analysis of methods for calculating structures for fatigue under steady-state operating conditions of variable loading in order to validate the domestic CAE system APM StructFEM. *Proceedings of Higher educational institutions. Machine building*. 2021, no. 8(737), pp. 27 — 38. [In Russ]. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-8-27-38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шестаков Виктор Степанович[1] — канд. техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: shestakov.v.s@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9468-6696,
Безкоровайный Павел Геннадьевич — канд. техн. наук,
старший преподаватель, Карагандинский технический
университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан,
e-mail: bpg82_karlion@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-0945-1232,
Лагунова Юлия Андреевна[1,2] — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: yu.lagunova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3828-434X,
Комиссаров Анатолий Павлович[1,2] — д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: Anatoliy.Komissarov@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4320-8111,
Абраров Руслан Рашитович[1] — ассистент кафедры,
e-mail: 202726@m.ursmu.ru,
[1] Уральский государственный горный университет,
[2] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.
Для контактов: Лагунова Ю.А., e-mail: yu.lagunova@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.S. Shestakov[1], Cand. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: shestakov.v.s@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9468-6696,
P.G. Bezkorovayny, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,
Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
100027, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: bpg82_karlion@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0005-0945-1232,
Yu.A. Lagunova[1,2], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: yu.lagunova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3828-434X,
A.P. Komissarov[1,2], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,
e-mail: Anatoliy.Komissarov@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4320-8111,
R.R. Abrarov[1], Assistant of Chair, e-mail: 202726@m.ursmu.ru,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia,
[2] Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
620002, Ekaterinburg, Russia
Corresponding author: Yu.A. Lagunova, e-mail: yu.lagunova@mail.ru.

Получена редакцией 11.07.2025; получена после рецензии 13.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 11.07.2025; received after the review 13.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(2025, № 10, СВ 17, 36 с.)

Тертычная С. В., Чавкина Л. Ю., Кузнецов Д. В., Серянина А. В., Дунаев В. А., Овчинникова Т. И., Филин А. Э., Курносов И. Ю., Разетдинова А. А., Миронова А. Д.

Горнодобывающие регионы отличаются высоким уровнем техногенного воздействия на окружающую среду, что создает предпосылки для более глубокого изучения процессов загрязнения атмосферы. Для выявления зависимости рассеивания выбросов техногенного происхождения от климатических факторов выполнен сравнительный анализ изменений температуры в отопительный период, разницы температур помещения и окружающей среды, относительной влажности воздуха и уровня атмосферного давления. Результаты исследований установили корреляционную зависимость между колебаниями уровней эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу и основными метеорологическими параметрами, а также особенностями функционирования автономных источников теплоснабжения.

Ключевые слова: горнодобывающая отрасль, добыча полезных ископаемых, загрязнение атмосферного воздуха, выбросы загрязняющих веществ, промышленные города, рассеивание загрязнения.

ENVIRONMENTAL SAFETY

Tertychnaya S. V., Chavkina L. Yu., Kuznetsov D. V., Seryanina A. V., Dunaev V. A., Ovchinnikova T. I., Filin A. E., Kurnosov I. Yu., Razetdinova A. A., Mironova A. D.

Mining regions are characterized by a high level of anthropogenic impact on the environment, which creates prerequisites for a deeper study of atmospheric pollution processes. To identify the dependence of the dispersion of man-made emissions on climatic factors, a comparative analysis of temperature changes during the heating period, the temperature difference between the room and the environment, relative humidity and atmospheric pressure was performed. The research results have established a correlation between fluctuations in the levels of pollutants into the atmosphere and the main meteorological parameters, as well as the functioning of autonomous heat supply sources.

Key words: mining industry, mining, atmospheric air pollution, pollutant emissions, industrial cities, pollution dispersion