УДК 622-1:[658.512.2:331.101.1]

Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели

В.С.ВЕЛИКАНОВ*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия*

В силу того, что нагрузки, возникающие в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов, определяются большим числом случайных факторов, сложно представляемых аналитическими формулами, для оценки и прогнозирования нагрузок необходимо внедрять модели с использованием нестандартных подходов. В настоящем исследовании использована методология теории нечеткой логики и нечетких множеств, позволяющая преодолеть трудности, связанные с неполнотой и расплывчатостью данных при оценке и прогнозировании усилий, возникающих в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов, а также с качественной природой этих данных.

В результате компьютерного моделирования в среде fuzzyTECH для определения уровня нагруженности основных элементов рабочего оборудования карьерных экскаваторов получены сопоставимые с экспериментальными исследованиями данные. На основе репрезентативной выборки произведен статистический анализ данных, вследствие чего получено уравнение линейной множественной регрессии напряжений в рукояти карьерных экскаваторов, которое позволяет составить точный прогноз нагруженности рабочего оборудования экскаватора.

Ключевые слова: карьерный экскаватор; рабочее оборудование; напряжения; прогнозирование; модель; нечеткая логика; адекватность; переменная

Как цитировать эту статью: В.С.Великанов. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 29-36. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29

Введение. Реализация планов по стратегической модернизации экономики Российской Федерации предполагает решение теоретических и прикладных проблем отечественной горнодобывающей отрасли и в значительной мере определяет не только состояние производственных ресурсов государства, но и его научно-технический потенциал. Мировая тенденция развития горных работ в основном определяется добычей сырьевых ресурсов открытым способом, это обусловлено его наилучшими экономическими показателями. Открытый способ обеспечивает 75-80 % общемировой добычи полезных ископаемых. В России 60 % объема угля и 91 % объема железной руды добывается в карьерах. Добыча строительных материалов, цветных металлов и алмазов в РФ почти полностью осуществляется открытым способом [1-7].

К 2035 г. прогнозируется увеличение объема добываемого угля в 1,2 раза по сравнению с показателями 2014 г. (до 423 млн т) [2]:

Максимальный вариант, млн т	500
Умеренный вариант, млн т	423

Открытая разработка месторождений полезных ископаемых в настоящее время характеризуется увеличением объемов перерабатываемой горной массы и коэффициентов вскрыши, совершенствованием производственных процессов за счет передовых технологий, что влечет за собой использование горного оборудования большой единичной мощности. Эффективность и надежность работы такого оборудования обеспечивается его правильной эксплуатацией, минимизацией затрат на содержание и ремонт машин, в частности карьерных экскаваторов типа ЭКГ.

Постановка проблемы. В России и странах СНГ на карьерах железной руды эксплуатируется около 490-500 единиц гидравлических экскаваторов и карьерных мехлопат, 90 % этих машин изготовлены отечественными производителями, входящими в холдинг ОАО «ОМЗ», например ПАО «Уралмашзавод» и ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г.Коробкова». Этот парк экскаваторов на 80 % состоит из мехлопат с объемом ковша 5 м³ и более, изготовленных в 80-х годах XX в. [2]. Производительная работа карьерных экскаваторов составляет порядка 65-70 % общего рабочего времени, 30-35 % времени составляют простои по различным причинам, в том числе 45-50 % времени теряется в результате различного рода неисправностей и аварий [2].

Рис.1. Текущее состояние импорта и потенциал импортозамещения по отдельным видам горного оборудования (%)
1 – импорт; 2 – локализация

В последние годы значительная часть экскаваторного парка достигла физического и морального износа, что вынуждает изменять структуру парка за счет закупки импортного оборудования. На рис.1 представлено текущее состояние импортного оборудования в горнодобывающей отрасли [1, 8, 9, 10, 11].

Методология. Значимой проблемой в установлении фактических нагрузок, возникающих в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов, представляется наличие большого количества действующих факторов (многие из них являются случайными), которые сложно описать математическими формулами. Оценка и прогнозирование нагрузок

в рабочем оборудовании при управлении карьерным экскаватором часто не поддается традиционным методам анализа и моделирования, что определяет необходимость использования нестандартных подходов [3, 6, 14]. В общем виде постановка задачи исследований представлена на рис.2.

В настоящем исследовании предлагается использовать методологию теории нечеткой логики и нечетких множеств [15, 24]. Это позволит преодолеть затруднения, связанные с расплывчатостью и неполнотой информации в оценке и прогнозировании нагрузок в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов, а также с качественным характером этой информации. Процесс создания нечеткой модели выполняется в четыре этапа: структуризация предметной области и построение нечеткой модели, выполнение вычислительных экспериментов с нечеткой моделью, применение результатов вычислительных экспериментов, коррекция и доработка нечеткой модели.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием специализированной компьютерной программы fuzzyTECH [5], ориентированной на решение задач моделирования с использованием теории нечетких множеств.

Для реализации модели необходимо задать входные и выходные лингвистические переменные, блоки правил, которые оптимизируют анализ данных. Каждая переменная характеризуется своим диапазоном возможных значений, которые разбиты на термы (рис.3), лингвистические переменные описаны в табл.1. В настоящей работе нечеткая модель содержит одиннадцать входных лингвистических переменных (ВЛП), сгруппированных в три блока показателей (BLOCK1-3).

Рис.2. Структурная схема исследований напряжений, возникающих в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов

Рис.3. Принципиальная схема нечеткой модели прогнозирования напряжений в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов

Таблица 1

Перечень лингвистических переменных модели

Принятая интерпретация в модели	Показатели	Термы лингвистических переменных	Область определения термов
dust	Запыленность в кабине экскаватора, мг/м ³	permissible – допустимая high – высокая very_high – очень высокая	0-2 1,5-8,2 7,4-12
illumination	Освещенность в забое, лк	insufficient – недостаточная moderate – умеренная sufficient – достаточная	0-31,4 23,3-56,4 47,2-80
noise_level	Уровень шума в кабине, дБА	low – низкий medium – средний high – высокий	0-38 38-69 69-110
vibration	Вибрация (общая), дБ	low – низкая medium – средняя high – высокая	0-7 7-22 22-30
manoeuvrability	Управляемость, балл	negative – неблагоприятная positive – предпочтительная	0-4,5 0,5-5
serviceability	Обслуживаемость, балл	negative – неблагоприятная positive – предпочтительная	0-4,5 0,5-5
learnability	Освояемость, балл	negative – неблагоприятная positive – предпочтительная	0-4,5 0,5-5
technological_ef	Технологичность, балл	negative – неблагоприятная positive – предпочтительная	0-4,5 0,5-5
density	Плотность экскавируемой горной массы, т/м ³	low – низкая medium – средняя high – высокая	1-2,1 1,9-3,1 2,9-4
experience	Стаж машиниста ЭКГ, лет	little – маленький allowable – допустимый big – большой	0-1,5 0,5-6 4,5-20

Окончание таблицы 1

Принятая интерпретация в модели	Показатели	Термы лингвистических переменных	Область определения термов
mass	Масса рукояти, ковша и экскавируемой горной породы, т	low – низкая medium – средняя high – высокая	18-21 20-30 28-36,5
speed	Скорость подъема ковша, м/с	low – низкая medium – средняя high – высокая	0-0,35 0,25-0,67 0,55-1
comfort	Комфорт (обитаемость), балл	bad – плохой medium – средний good – хороший	0-2 1-4 3-5
ergonomics	Эргономичность, балл	low – низкая medium – средняя high – высокая	0-1,5 1-4 3,5-5
stress	Напряжения, возникающие в рукояти экскаватора, МПа	low – низкие allowable – допустимые high – высокие very_high – очень высокие	40-78 60-180 120-290 245-350

Общая оценка комфорта на рабочем месте машиниста карьерного экскаватора реализована в BLOCK1, для которого выходной лингвистической переменной является *comfort* (комфорт), имеющий три терма: *bad* – плохой, *medium* – средний, *good* – хороший, присваивание термов оценивается по пятибалльной шкале. Соответственно, входными лингвистическими переменными приняты: *dust* (запыленность), *illumination* (освещенность), *noise_level* (уровень шума), *vibration* (вибрация).

Запыленность. Известно, что предельно допустимая концентрация пыли в кабине экскаватора составляет $2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Важными факторами пылеобразования является количество осадков в виде снега или дождя. Максимальная зарегистрированная концентрация пыли весной – $2,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, осенью – 3,6, зимой – 3,9 и летом – 8,3. Это позволяет выявить влияние отдельных климатических факторов, таких как температура и влажность воздуха, на запыленность воздуха. Область определения лингвистической переменной 0-12 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Освещенность. В темное время суток в карьере должно быть обеспечено освещение места работы карьерных экскаваторов. Значения терм освещенности составляются с учетом минимальной необходимой освещенности (10 лк) в забое, где происходит экскавация горной массы. Для освещенности в кабине ЭКГ этот показатель составляет 50 лк. Область определения переменной 0-80 лк.

Уровень шума. Шум – беспорядочное сочетание различных по силе и частоте звуков, может оказывать неблагоприятное воздействие на организм. Область определения переменной 0-110 дБА [16-18, 20, 21].

Вибрация. Вредный производственный фактор, представляющий собой механические колебания, которые непосредственно передаются телу человека или его отдельным участкам. Таким образом, вибрация может быть общей, т.е. передающейся всему организму, или местной (локальной), передающейся только на руки или другие ограниченные участки тела. Область определения переменной 0-30 дБ [22, 23, 26].

Комфорт. Благоприятное сочетание параметров микроклимата, отсутствие вредных производственных факторов приводит к тому, что работник находится в состоянии комфорта, которое имеет большое значение для обеспечения производительности труда. Значительное отклонение параметров микроклимата рабочей зоны от оптимальных и наличие вредных производственных факторов приводят к ряду физиологических нарушений в организме человека, снижению работоспособности и к профессиональным заболеваниям [19, 20, 25].

В определенной мере на качество эксплуатации горной машины оказывают влияние эргономические показатели, которые отражают удобство для человека при эксплуатации изделия. Человек взаимодействует с изделием в соответствии со своими психологическими, физиологическими и антропометрическими свойствами. Для учета этих показателей принята выходная лингвистическая переменная *ergonomics* (эргономичность), которая зависит от четырех ВЛП (*manoeuverability* – управляемость, *serviceability* – обслуживаемость, *learnability* – осваиваемость, *technological* – технологичность), входящих в блок BLOCK2.

При прогнозировании напряжений, возникающих в рукояти ЭКГ, в BLOCK3 реализована возможность учета следующих показателей: *density* – плотность горной массы, *experience* – стаж машиниста, *mass* – масса рукояти, ковша и горной массы, которые являются ВЛП. Соответственно выходной лингвистической переменной данного блока принята скорость подъема ковша – *speed*. Область определения переменной 0-1 м/с.

Плотность. Расчетная средняя плотность горной массы является одной из важных характеристик для оценивания напряжений в рукояти экскаватора. Диапазон значений плотности выбираем, исходя из минимальной и максимальной возможных плотностей горных пород.

Стаж машиниста ЭКГ. Установлено, что большое влияние на нагрузки в рабочем оборудовании ЭКГ оказывает стаж машиниста. Так, например, при стаже менее года коэффициент управления составляет 0,2, а при стаже более 10 лет равен 1. Диапазон значений переменной 0-20 лет.

Масса. Масса рукояти, ковша и экскавируемой породы играет важную роль при оценивании напряжений, область определения задается в соответствии с типом экскаватора и его габаритными характеристиками.

Для итоговой оценки и прогнозирования напряжений в рукояти экскаватора в модели реализован блок RB4, для которого используются три входные лингвистические переменные – *comfort*, *speed*, *ergonomics*, выходной переменной в конечном итоге будет *stress* (напряжения). При задании термов выходной переменной руководствовались допустимыми напряжениями – $[\sigma] = 153$ МПа, превышение которых приводит к нарушению прочности элемента; пределом текучести: $\sigma_T = 260$ МПа, превышение которого приводит к проявлению усталостных трещин. Область определения переменной 0-350 МПа.

Обсуждение. На рис.4 приведены треугольные функции принадлежности нечетких множеств соответствующих термов лингвистических переменных, которые характеризуют показатели BLOCK1.

С целью оценки адекватности предложенной нечеткой модели прогнозирования нагрузок автором произведена выборка данных $n = 130$ (табл.2). Под адекватностью модели понимается степень соответствия результатов, которые получены по разработанной модели, данным эксперимента.

Исследованиями [12] доказано, что максимальная скорость подъема ковша в период черпания горной массы не должна превышать 0,55 м/с, а допустимые напряжения в рукояти карьерного экскаватора – 153 МПа (рис.5). Причем, в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации карьерных экскаваторов большой единичной мощности (более 15 м³), опыт работы машиниста на подобном оборудовании с ковшом вместимостью более 4 м³ должен быть не менее 5 лет [10, 14]. При превышении конструктивного ресурса на эквивалентное число циклов нагружения, на которое рассчитана и физически способна конструкция, нормальная базовая работа экскаватора будет обеспечена при управлении машинистом с опытом работы более 10 лет [13] (рис.6).

Рис.4. Функции принадлежности нечетких множеств соответствующих термов лингвистических переменных, характеризующих показатели: а – вибрация; б – уровень шума

Таблица 2

Результаты статистического анализа выборки данных

Показатель	b^*	Std.Err.	b	Std.Err.	$t(122)$	p -value
Intercept			-40,1151	15,6998	-2,55513	0,011844
density x_1	0,269449	0,052664	17,896	0,34977	5,11643	0,000001
experience x_3	-0,14138	0,040322	-1,2607	0,35954	-3,50628	0,000637
manoeuvrability x_6	0,141613	0,053275	5,5895	2,10274	2,65818	0,008909
mass x_7	0,175005	0,054958	1,4922	0,46861	3,18431	0,001842
noise_level x_8	0,37219	0,04103	0,7528	0,08298	9,0711	0
vibration x_{11}	0,346477	0,045311	2,9163	0,38139	7,64666	0
speed x_{12}	0,289182	0,056711	73,5853	14,43057	5,09926	0,000001

Рис.5. Напряжения в рукояти карьерного экскаваторов при черпании скальных пород

1 – результаты моделирования;
2 – эксперименты по тензометрическому измерению напряжений в металлоконструкции рукояти

а

б

Рис.6. Результаты моделирования напряжений в рукояти карьерного экскаваторов при черпании скальных пород:

а – скорость подъема ковша; б – стаж машиниста

В дальнейшем для определения степени влияния на напряжения в рукояти нескольких факторов используется множественная регрессия

$$stress = F(speed, vibration, \dots, x_i), \quad (1)$$

где x_1 – density, x_2 – dust, x_3 – experience, x_4 – illumination, x_5 – learnability, x_6 – manoeuvrability, x_7 – mass, x_8 – noise_level, x_9 – serviceability, x_{10} – techological_ef, x_{11} – vibration, x_{12} – speed.

Целью использования множественной регрессии является разработка математической модели, включающей большое число факторов, и установление степени влияния каждого из факторов по отдельности, а также их совокупного воздействия на итоговый показатель.

Линейная модель является самой простой из моделей множественной регрессии

$$y = \alpha' + \beta'_1 x_1 + \beta'_2 x_2 + \dots + \beta'_j x_j + \epsilon, \quad (2)$$

где коэффициенты β' равны частным производным результативного признака y по соответствующим факторам

$$\beta'_1 = \frac{\partial y}{\partial x_1}, \quad \beta'_2 = \frac{\partial y}{\partial x_2}, \dots, \quad \beta'_j = \frac{\partial y}{\partial x_j}.$$

Свободный член α определяет значение y в случае, когда все объясняющие переменные равны нулю, однако, как и в случае парной регрессии, факторы часто не могут принимать нулевых значений: величина ϵ представляет собой случайную ошибку регрессионной зависимости.

Для статистического анализа данных использована программа Statistika.

Итоговое уравнение линейной множественной регрессии имеет вид

$$y = -40,12 + 17,89x_1 - 1,26x_3 + 5,59x_6 + 1,49x_7 + 0,75x_8 + 2,92x_{11} + 73,59x_{12}.$$

Заключение. Определено, что базовая составляющая выемочно-погрузочного оборудования на большинстве горнодобывающих предприятий Российской Федерации – отечественные карьерные канатные экскаваторы с ковшами вместимостью 5-10 м³. Парк этих машин изношен на 70-90 %. Эксплуатация карьерных экскаваторов в таком состоянии приводит к росту затрат на их обслуживание, что в конечном итоге влияет на увеличение себестоимости добычи и переработки продукции горнодобывающей отрасли.

В исследовании реализована возможность использования методологии теории нечеткой логики и нечетких множеств в оценке и прогнозировании нагрузок в рабочем оборудовании карьерных экскаваторов. Доказана сопоставимость результатов моделирования и экспериментальных данных по тензометрическому измерению напряжений в металлоконструкции рукояти.

Полученное уравнение линейной множественной регрессии напряжений в рукояти карьерных экскаваторов позволит реализовать возможность прогнозирования нагруженности основных элементов рабочего оборудования экскаваторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анистратов К.Ю. Разработка стратегии технического перевооружения карьеров // Горная промышленность. 2012. № 4. С. 90-97.
2. Великанов В.С. Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко-множественного подхода: Монография / В.С.Великанов, М.Ю.Гуров. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, 2018. 217 с.
3. Князькина В.И. Систематизация причин отказов карьерных экскаваторов и повышение долговечности ресурсопределяющих элементов их трансмиссий организацией системы смазки / В.И.Князькина, С.Л.Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р.Кубачека». Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. С. 400-403.
4. Комиссаров А.П. Карьерные экскаваторы – эффективность и безопасность / А.П.Комиссаров, О.А.Лукашук, И.В.Телиман // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования: Сборник научных трудов. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2016. С. 65-71.
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
6. Лобур И.А. Об эксплуатационной надежности электромеханических систем карьерных гусеничных экскаваторов / И.А.Лобур, Н.М.Шаулева, А.Г.Захарова // III Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2017. С. 312 (1-8).
7. Маттис А.Р. К вопросу выбора экскаваторов для разработки крепких горных пород на карьерах России / А.Р.Маттис, В.И.Ческидов, В.Н.Лабути // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 124-132.
8. Плакиткина Л.С. Оценка импортозависимости российских угольных компаний от закупок зарубежного оборудования / Л.С.Плакиткина, Ю.А.Плакиткин, К.И.Дьяченко // Горная промышленность. 2018. № 3. С. 35-39.
9. Подэрни Р.Ю. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой / Р.Ю.Подэрни, П.Булес // Горный журнал. 2015. № 1. С. 55-61.
10. Совершенствование стратегии технического сервиса карьерных экскаваторов введением в систему Total Productivity Maintenance / Д.А.Шибанов, С.Л.Иванов, А.С.Фокин, И.Е.Звонарев // Записки Горного института. 2014. № 209. С. 109-115.
11. Твердов А.А. Проблемы и перспективы импортозамещения в горной отрасли / А.А.Твердов, С.Б.Никишичев, В.Н.Захаров // Горная промышленность. 2015. № 5. С. 54-58.
12. Шарипов Р.Х. Изучение влияния скорости подъема ковша на долговечность рукояти экскаваторов с зубчаторежущим напором: на примере ЭКГ-5А: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2011. 131 с.
13. Шибанов Д.А. Влияние факторов эксплуатации карьерных экскаваторов на их техническое состояние / Д.А.Шибанов, С.Л.Иванов, И.Е.Звонарев // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Сборник научных трудов 9-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Т. 1. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2013. С. 430-433.
14. Шибанов Д.А. Оценка эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов / Д.А.Шибанов, С.Л.Иванов, П.В.Иванова // Наука и образование в жизни современного общества: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 декабря 2014 г. Ч. 3. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. С. 158-160.
15. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2001. 756 с.
16. A new method for calculating saddle seat height with an emphasis on optimal posture based on trigonometric relations / H.Babaei, M.Razeghi, A.Choobineh, H.Pakshir, A.Rajaeifard, J.Rezaian // International journal of occupational safety and ergonomics. 2016. Vol. 22. Iss. 4. P. 565-571. DOI: 10.1080/10803548.2016.1191223

17. *Balaji K.* Computer-aided human factors analysis of the industrial vehicle driver cabin to improve occupational health / K.Balaji, M.S.Alphin // International journal of injury control and safety promotion. 2014. Vol. 23. Iss. 3. P. 240-248. DOI: 10.1080/17457300.2014.992351
18. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters / D.H.Lee, Y.J.Kim, C.H.Choi, S.O.Chung, Y.S.Nam, J.H.So // International journal of agricultural and biological engineering. 2016. Vol. 9. № 4. p. 33-44.
19. Improving mining equipment safety through human-centered design / T.Horberry, R.Burgess-Limerick, T.Cooke, L.Steiner // Ergonomics in design: The Quarterly of human factors applications. 2016. Vol. 24, Iss. 3. P. 29-34. DOI: 10.1177/1064804616636299
20. *Karlinski J.* Protective structures for construction and mining machine operators / J.Karlinski, E.Rusinski, T.Smolnicki // Automation in construction. 2008. Vol.17. Iss. 3. P. 232-244. DOI: 10.1016/j.autoon.2007.05.008
21. *Kushwaha D.K.* Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry / D.K.Kushwaha, P.V.Kane // International journal of industrial ergonomics. 2015. Vol. 52. P. 29-39. DOI: 10.1016/j.ergon.2015.08.003
22. *Mayton A.G.* Comparison of whole-body vibration exposures on older and newer haulage trucks at an aggregate stone quarry operation. A.G.Mayton, C.C.Jobes, R.E.Miller / Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. New York. 2008. DOI: 10.1115/DETC2008-50120
23. *Mayton A.G.* Assessment of whole-body vibration exposures and influencing factors for quarry haul truck drivers and loader operators / A.G.Mayton, C.C.Jobes, S.Gallagher // International of Heavy Vehicle Systems. 2014. Vol. 21. № 3. P. 241-261. DOI: 10.1504/IHVS.2014.066080
24. *Merigó J.M.* An overview of fuzzy research with bibliometric indicators / J.M.Merigó, A.M.Gil-Lafuente, R.R.Yager // Applied Soft Computing. 2015. Vol. 27. P. 420-433. DOI: 10.1016/j.asoc.2014.10.035
25. *Schutte P.C.* Practical ergonomics in mechanized mining / P.C.Schutte, J.R.Smith // Journal of the South African institute of mining and metallurgy. 2002. Vol.102. Iss.3. P. 145-149.
26. Vibration analysis on drivers seat of agricultural tractors during tillage tests / T.Gialamas, I.Gravalos, D.Kateris, P.Xyradakis, C.Dimitriadis // Spanish journal of agricultural research. 2016. Vol. 14. Iss. 4. e0210. DOI: 10.5424/sjar/2016144-9664

Автор В.С.Великанов, канд. техн. наук, доцент, *rizhik_00@mail.ru* (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова, Магнитогорск, Россия).

Статья поступила в редакцию 30.08.2019.

Статья принята к публикации 21.11.2019.