

УДК 004.852

DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-2

**Бондаренко Ю.А.<sup>1</sup>**  
**Явурик О.В.<sup>2</sup>**  
**Ломакин В.В.<sup>2</sup>****ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ПРЕДИКТИВНОЙ  
АНАЛИТИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

- <sup>1</sup>) Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия
- <sup>2</sup>) Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

*e-mail: yavurik@bsu.edu.ru***Аннотация**

Статья представляет результаты исследования в области применения предиктивной аналитики для ремонта крупногабаритного оборудования в индустрии строительных материалов. Новые методы обработки данных и использование искусственного интеллекта, особенно машинного обучения, могут улучшить прогнозирование будущего состояния оборудования. Представлены этапы применения предиктивной аналитики, описана возможность прогнозирования остаточного ресурса и продемонстрировано эффективное применение предиктивной аналитики на примере восстановления цапфы шаровой мельницы. Проанализированы полученные данные, на основе которых делается вывод о необходимости ремонтных работ для увеличения межремонтного ресурса оборудования и снижения экономических потерь. В заключении подчеркивается обоснованность использования предиктивной аналитики для ремонта крупногабаритного оборудования и принятия оптимальных решений. Применение предиктивной аналитики позволяет повысить эффективность ремонта крупногабаритного оборудования за счет увеличения межремонтного ресурса, снижения числа простоев и предотвращения внеплановых поломок. Данный подход является перспективным и практичным решением для предприятий промышленности строительных материалов.

**Ключевые слова:** предиктивная аналитика; методы обработки данных; прогнозирование состояния оборудования

**Для цитирования:** Бондаренко Ю.А., Явурик О.В., Ломакин В.В. Применение инструментов предиктивной аналитики для прогноза восстановления крупногабаритного оборудования // Научный результат. Информационные технологии. – Т.9, №3, 2024. – С. 10-18. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-2

**Bondarenko J.A.<sup>1</sup>**  
**Yavurik O.V.<sup>2</sup>**  
**Lomakin V.V.<sup>2</sup>****THE USE OF PREDICTIVE ANALYTICS TOOLS  
TO PREDICT THE RECOVERY OF LARGE-SIZED EQUIPMENT**

- <sup>1</sup>) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia
- <sup>2</sup>) Belgorod State National Research University,  
85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

*e-mail: yavurik@bsu.edu.ru***Abstract**

The article presents the results of a study in the field of predictive analytics for the repair of large-sized equipment in the building materials industry. New data processing techniques and the use of artificial intelligence, especially machine learning, can improve the prediction of the future state of equipment. The stages of predictive analytics application are presented, the possibility of predicting the residual resource is described and the effective use of predictive analytics is demonstrated using

the example of restoring the trunnion of a ball mill. The data obtained are analyzed, on the basis of which it is concluded that repair work is necessary to increase the inter-repair life of the equipment and reduce economic losses. In conclusion, the validity of the use of predictive analytics for the repair of large-sized equipment and making optimal decisions is emphasized. The use of predictive analytics makes it possible to increase the efficiency of repair of large-sized equipment by increasing the repair life, reducing the number of downtime and preventing unplanned breakdowns. This approach is a promising and practical solution for enterprises in the building materials industry.

**Keywords:** predictive analytics; data processing methods; equipment condition forecasting

**For citation:** Bondarenko J.A., Yavurik O.V., Lomakin V.V. The use of predictive analytics tools to predict the recovery of large-sized equipment // Research result. Information technologies. – Т. 9, №3, 2024. – P. 10-18. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-2

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время внедряемые новые технологии обработки и анализа информации в различных сферах производства является необходимым условием для дальнейшего их развития. В связи с возрастанием объема данных, существующие методы обработки не так эффективны. Инновационным способом применения искусственного интеллекта для углубленного анализа данных является предиктивная или прогнозная аналитика, которая использует машинное обучение при обработке статистических данных об объекте для прогноза его будущего состояния [1].

Согласно [2], применение аналитики в промышленности строительных материалов на данный момент составляет 29 %, при этом планирующих использовать решения предиктивной аналитики в ближайшем будущем составляет около 60% (рисунок 1).



Рис. 1. Соотношения применения предиктивной аналитики в промышленности строительных материалов

Fig. 1. Correlations of the application of predictive analytics in the building materials industry

Согласно опросу, прогнозирование событий совместно с принятием решений на производстве способствует увеличению экономических и производственных показателей. Предиктивная аналитика имеет следующие основные этапы внедрения:

1. Анализ технологического процесса.
2. Сбор и анализ полученных данных.
3. Обработка данных.
4. Прогнозирование на основании полученных данных.
5. Получение результатов и принятие решений.

Применение предиктивной аналитики в области ремонта и восстановления крупногабаритного оборудования, используемого при производстве строительных материалов, позволит повлиять на уменьшение простоев и увеличение межремонтного ресурса [3].

На предприятиях строительных материалов основным звеном технологической линии является помольное крупногабаритное оборудование, служащее для измельчения твердых материалов, такие как шаровые мельницы. В связи с большой нагрузкой на ее опорные части – цапфы, шаровая мельница теряет свою работоспособность, что приводит к простоям оборудования. Восстановление рабочей поверхности цапфы производят с применением мобильного оборудования в виде приставного станка для восстановления рабочей поверхности цапфы [4]. Приставной станок позволяет сократить время восстановительных работ, при этом достигаются требуемые показатели точности и качества обработанной поверхности цапфы (таблица 1). Представленные в таблице 1 данные необходимы для исследования нормативных показателей.

Таблица 1

Требуемые нормативные показатели

Table 1

Required regulatory indicators

№ п/п	Типоразмер цапфы, $d \times L$ , мм,	Предельные отклонения, мм	Шероховатость $Ra$ , мкм
1.	$\varnothing 800 \times 400$	-0,12 ... -0,24	1,6
2.	$\varnothing 900 \times 450$	-0,16 ... -0,32	1,6
	$\varnothing 900 \times 480$	-0,18 ... -0,36	1,6
3.	$\varnothing 1200 \times 760$	0 ... -0,3	1,6
	$\varnothing 1200 \times 800$	0 ... -0,4	2,5
4.	$\varnothing 1400 \times 800$	-0,21 ... -0,4	2,5
	$\varnothing 1400 \times 840$	-0,15 ... -0,39	2,5
5.	$\varnothing 1400 \times 920$	-0,19 ... -0,41	2,5
6.	$\varnothing 1400 \times 1000$	-0,21 ... -0,41	2,5
	$\varnothing 1400 \times 1050$	-0,2 ... -0,5	2,5

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Согласно таблице Б.1 [5], шаровая мельница представляет собой объект специального назначения, предназначенный для непрерывного и продолжительного использования, с возможностью ее восстановить и обслуживать. Таким образом, шаровая мельница представляет собой изделие по признакам, которые определяют показатели надежности, характеризующееся показателями долговечности.

В соответствии с таблицей Б.2 [5], показателем ее долговечности являются остаточный ресурс и срок службы, учитываемые в предельном состоянии, где изнашивание и старение происходят одновременно. Необходимо подчеркнуть, что эти показатели являются определяющими для эффективной работы мельницы и ее использования в технических процессах.

Основные факторы, от которых зависит остаточный ресурс цапфы шаровой мельницы: срок эксплуатации, нагруженность цапфы и повреждения поверхности. Прогнозирование остаточного ресурса может осуществляться по различным параметрам, имеющим критерии предельного состояния в числовом выражении [6, 7].

Общий вид алгоритма применения предиктивной аналитики при прогнозировании восстановления крупногабаритного оборудования представлен на рисунке 2.

При сборе данных для прогнозирования будущего восстановления опорных частей крупногабаритного оборудования определен параметр, влияющий на остаточный ресурс – это повреждения рабочей цилиндрической поверхности цапфы, которые характеризуются величиной отклонений от номинального размера. Результаты измеряемой величины на ЗАО «Белгородский

цемент» в 7 сечениях (А – Г) по длине цапф  $\varnothing 1400 \times 840$  мм и  $\varnothing 1400 \times 920$  мм в периоды времени: в настоящее время (Т), через три месяца (Т+0,25) и через полгода (Т+0,5) представлены в таблице 2.

Анализируя данные таблицы 2 и сопоставляя их с нормативными значениями из таблицы 3, сделан вывод о том, что изменения отклонения от диаметра имеют отрицательную динамику, при этом в определенный момент времени значение показателя превышает допустимое (рисунок 3). Данный факт пагубно влияет на опорные части мельницы – возникают вибрации, вся система становится неустойчивой в целом. Это влечет за собой ремонтные простои всего оборудования, приводящие к экономическим убыткам.

Для определения точного момента времени восстановления приставным станком на месте эксплуатации требуется расчет остаточного ресурса по полученным данным параметра. Уровень достоверности полученных данных в данном исследовании определяется на основе требуемого количества измерений [8].

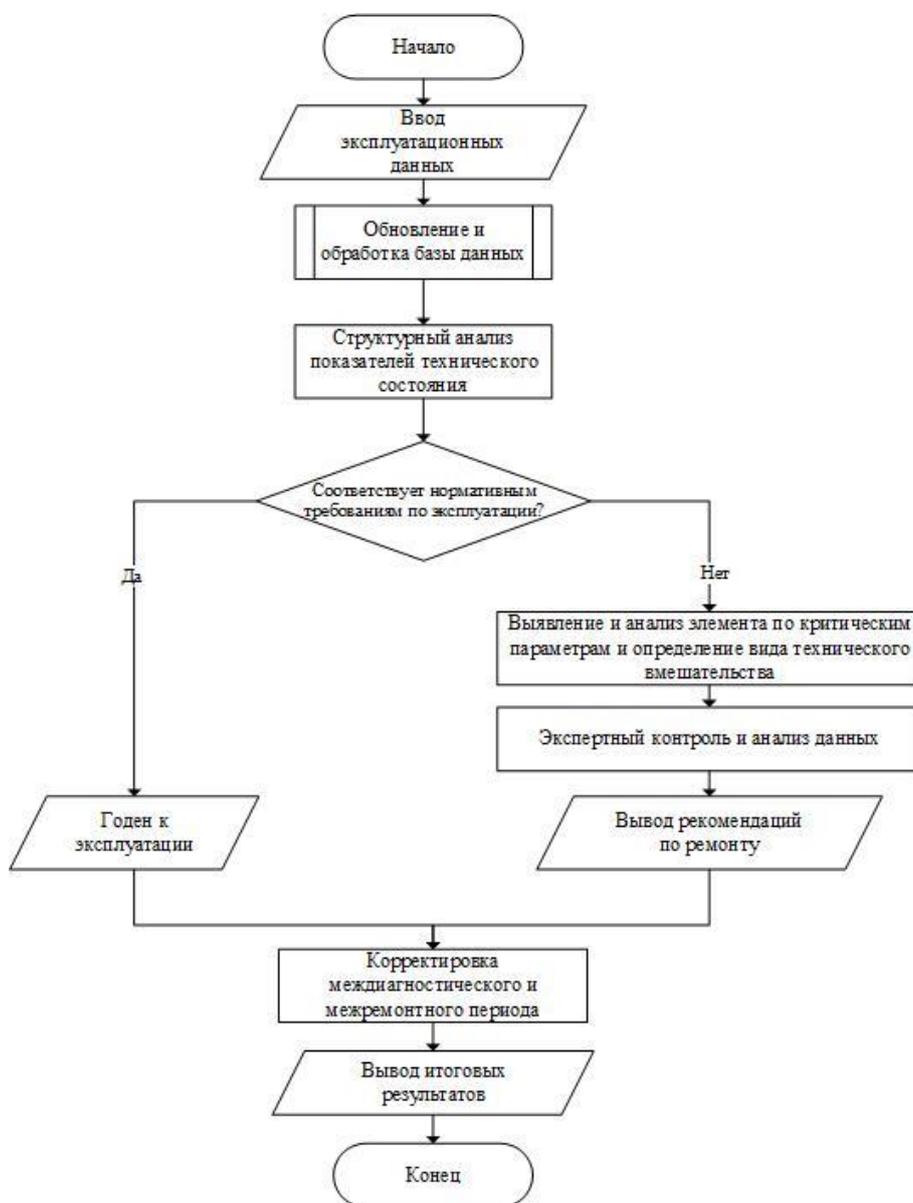


Рис. 2. Алгоритм применения решений предиктивной аналитики при восстановлении крупногабаритного оборудования

Fig. 2. Algorithm of application of predictive analytics solutions in the restoration of large-sized equipment

Таблица 2

Отклонения от номинального диаметра поверхности цапфы в разные моменты времени, мм

Table 2

Deviations from the nominal diameter of the axle surface at different points in time, mm

	A	B	C	D	E	F	G
<b>Цапфа загрузочная <math>\varnothing 1400 \times 840</math></b>							
В момент времени, г.: -Т	0,085	0,109	0,131	0,158	0,201	0,229	0,281
-Т+0,25	0,097	0,128	0,163	0,202	0,227	0,271	0,378
-Т+0,5	0,116	0,195	0,237	0,295	0,357	0,389	0,416
<b>Цапфа загрузочная <math>\varnothing 1400 \times 920</math></b>							
В момент времени, г.: -Т	0,088	0,113	0,137	0,164	0,217	0,241	0,292
-Т+0,25	0,117	0,137	0,195	0,263	0,352	0,416	0,524
-Т+0,5	0,134	0,218	0,295	0,328	0,418	0,507	0,593
<b>Цапфа разгрузочная <math>\varnothing 1400 \times 840</math></b>							
В момент времени, г.: -Т	0,113	0,204	0,266	0,349	0,434	0,543	0,623
-Т+0,25	0,134	0,236	0,342	0,431	0,549	0,658	0,728
-Т+0,5	0,156	0,264	0,447	0,487	0,682	0,733	0,797
<b>Цапфа разгрузочная <math>\varnothing 1400 \times 920</math></b>							
В момент времени, г.: -Т	0,117	0,208	0,27	0,353	0,438	0,547	0,627
-Т+0,25	0,138	0,24	0,346	0,435	0,553	0,662	0,732
-Т+0,5	0,16	0,268	0,451	0,491	0,686	0,737	0,801

При учете стандартной доверительной вероятности  $\gamma$ , равной 0,95, а также максимально допустимой относительной ошибки величиной  $S$ , равной 0,05721, и коэффициента вариации  $V$ , равного 14,87299%, мы можем сделать вывод о необходимом объеме выборки. Согласно таблице 3 [9], табличное значение требуемого количества измерений составляет  $N_{\text{табл}} = 50$ .

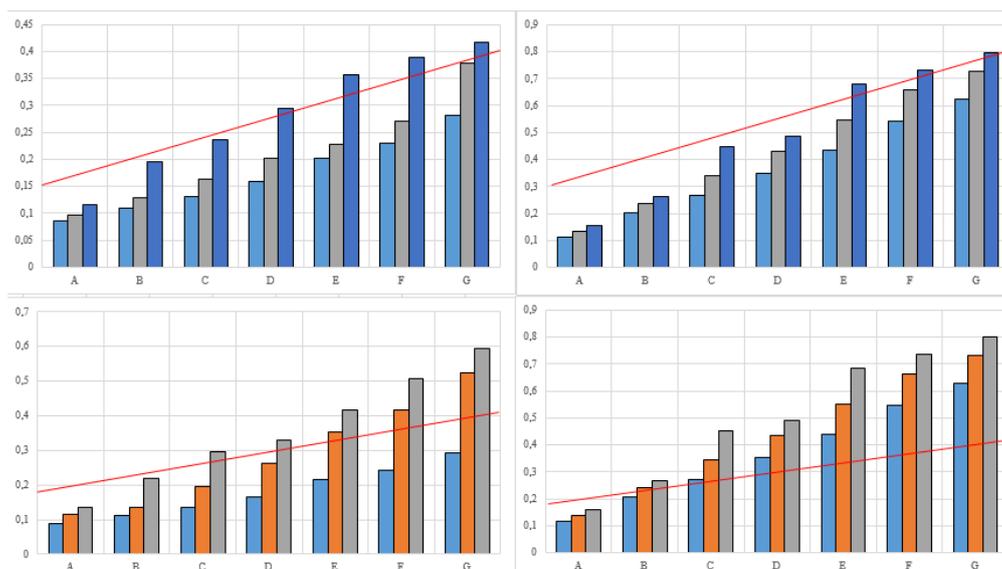


Рис. 3. Динамика изменения отклонения от номинального диаметра поверхности цапфы

Fig. 3. Dynamics of variation of deviation from the nominal diameter of the axle surface

Таким образом, полученное число измерений  $N = 84$  достаточно для получения достоверных результатов. Коэффициенты вариации каждой выборки данных  $V_n \leq 33\%$ , что подтверждает качественно однородную вариацию.

Таблица 3

Расчеты достоверности полученных данных\*

Table 3

Calculations of the reliability of the data obtained

	A	B	C	D	E	F	G
$S_{13}(T)$	0,00607	0,00779	0,00936	0,01129	0,01436	0,01636	0,02007
$S_{13}(T+0.25)$	0,00683	0,00912	0,01166	0,01445	0,01623	0,01938	0,02701
$S_{13}(T+0.5)$	0,00829	0,01393	0,01693	0,02107	0,02550	0,02779	0,02971
M			0,02971	S			0,00104
$ \Delta $			0,01587	V			6,56780
$S_{23}(T)$	0,00629	0,00807	0,00979	0,01171	0,01550	0,01721	0,02086
$S_{23}(T+0.25)$	0,00836	0,00979	0,01393	0,01879	0,02514	0,02971	0,03743
$S_{23}(T+0.5)$	0,00957	0,01557	0,02107	0,02343	0,02986	0,03621	0,04236
M			0,04236	S			0,00223
$ \Delta $			0,01955	V			11,41382
$S_{1p}(T)$	0,00807	0,01457	0,01900	0,02493	0,03100	0,03879	0,04450
$S_{1p}(T+0.25)$	0,00957	0,01686	0,02443	0,03079	0,03921	0,04700	0,05200
$S_{1p}(T+0.5)$	0,01114	0,01886	0,03193	0,03479	0,04871	0,05236	0,05693
M			0,05693	S			0,00468
$ \Delta $			0,03121	V			15,00914
$S_{2p}(T)$	0,00836	0,01486	0,01929	0,02521	0,03129	0,03907	0,04479
$S_{2p}(T+0.25)$	0,00986	0,01714	0,02471	0,03107	0,03950	0,04729	0,05229
$S_{2p}(T+0.5)$	0,01143	0,01914	0,03221	0,03507	0,04900	0,05264	0,05721
M			0,05721	S			0,00468
$ \Delta $			0,03150	V			14,87299

\*M – наибольшее значение,  $|\Delta|$  – среднее значение, S – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации

Оценка математического ожидания дисперсии измеряемого параметра с проверкой однородности производится с применением критерия Кохрена, так как выборка имеет одинаковый объем. Его табличное значение при следующих показателях: число измерений  $k=4$ , уровень значимости  $\gamma = 0,05$ , число степеней свободы  $n = 6$ ; составит  $G(0,05;6;4) = 0,5598[10]$ .

Тогда рассчитанное значение критерия Кохрена:

$$G = \frac{\sigma_{max}^2}{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2} \frac{0,6855703^2}{0,6111676^2 + 0,6114588^2 + 0,6829477^2 + 0,6855703^2} = 0,279129.$$

В таблице 4 представлена предварительная обработка статистических данных со следующими параметрами: средние значения приращения параметра технического состояния за интервал наработки  $\Delta t_i$  ( $\Delta Y_i$ ), средняя скорость изменения отклонения (W) и среднее квадратическое отклонение скорости ( $\sigma$ ).

Таблица 4

Предварительная обработка статистических данных

Table 4

Preliminary processing of statistical data

Оборудование	Период времени	$\Delta Y_i$ , мм	$\Delta t_i$ , лет	$W$	$\sigma$
Цапфа загрузочная ø 1400 x 840	T	0,851	0	0,2833	0,6111676
	T+0,25	0,990	0,25	0,2640	
	T+0,5	1,0683	0,5	0,2374	
Цапфа загрузочная ø 1400 x 920	T	0,853	0	0,2843	0,6114588
	T+0,25	0,9867	0,25	0,2631	
	T+0,5	1,0633	0,5	0,2363	
Цапфа разгрузочная ø 1400 x 840	T	0,854	0	0,2278	0,6829477
	T+0,25	0,995	0,25	0,2653	
	T+0,5	1,0683	0,5	0,2849	
Цапфа разгрузочная ø 1400 x 920	T	0,855	0	0,2280	0,6855703
	T+0,25	0,998	0,25	0,2661	
	T+0,5	1,0685	0,5	0,2849	

Таким образом, рассчитанное значение не превышает табличного, дисперсии являются однородными и расчет остаточного ресурса, используя данные выборки значения параметра технического состояния, становится возможным.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Оценка остаточного ресурса производится согласно [11]: определение суммарных величин наработки ( $Y_1, Y_2, X_1, X_2$ ), точечная и гарантированная оценка коэффициентов линейного закона ( $C_1, C_2, C_{11}, C_{22}$ ) и среднего квадратичного отклонения ( $\sigma_i$ ), определение среднего ожидаемого и гарантированного остаточного ресурса  $T_{cp}, T_{\gamma}$ .

Результаты расчета остаточного ресурса загрузочной и разгрузочной цапфы шаровых мельниц типоразмеров ø 1400 x 840 и ø 1400 x 920 представлены в таблице 5.

Анализируя полученные данные, остаточный ресурс разгрузочной цапфы имеет меньшее значение ввиду большего износа, поэтому остаточный ресурс шаровой мельницы в целом будет принимать данное значение:

$$T_{\gamma} (\text{ø } 1400 \times 840) = 5,7296 \text{ мес.}; T_{\gamma} (\text{ø } 1400 \times 920) = 5,6929 \text{ мес.}$$

Таблица 5

Результаты расчета остаточного ресурса

Table 5

The results of calculating the remaining resource

Параметр	Оборудование				
	Цапфа загрузочная ø 1400 x 840	Цапфа загрузочная ø 1400 x 920	Цапфа разгрузочная ø 1400 x 840	Цапфа разгрузочная ø 1400 x 920	
Величины наработки	$Y_1$	4,665	5,749	9,176	0,3321
	$Y_2$	6,034	7,4965	11,7285	0,431
	$X_1$	3,75			
	$X_2$	4,8125			
	$C_1$	-0,059	-0,0753	-0,11	-0,042

Коэффициенты линейного закона	$C_2$	0,865948	1,06456	1,709358	0,06185
Среднее квадратическое отклонение	$\sigma$	1,5287	0,5468	0,5844	0,5251
	$\sigma_1$	0,3174	0,1135	0,1213	0,1092
	$\sigma_2$	0,7511	0,2687	0,2871	0,2584
Оценка коэффициентов	$C_{11}$	0,4662	0,1126	0,0908	0,1762
	$C_{22}$	2,1089	0,3693	0,3652	0,4227
Остаточный ресурс, мес.	$T_{cp}$	6,5101	6,3824	6,7725	6,3977
	$T_{\gamma}$	5,8241	5,9416	5,7296	5,6929

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом рассчитанных значений, рекомендуется проводить текущий ремонт шаровых мельниц в течение первых шести месяцев с момента начала эксплуатации, чтобы избежать неожиданной поломки оборудования. Это позволит снизить число простоев оборудования, подготовиться к ремонтному обслуживанию и увеличить межремонтный ресурс.

Полученные результаты доказывают обоснованность применения предиктивной аналитики для ремонта крупногабаритного оборудования. Статистические инструменты выявления закономерности изменений контрольных показателей могут использоваться при прогнозировании будущей эксплуатации оборудования с целью принятия оптимальных решений.

### Список литературы

1. Веревкин А.П. Предиктивная аналитика. Уфа: УГНТУ, 2021. 86 с.
2. Камаева Ю. В. Перспективы использования предиктивной аналитики в строительстве / Ю.В. Камаева, Л. А. Адамцевич // Строительство и архитектура, 2023. №. 2. С. 12-22.
3. Бестужева О.В. Снижение временных затрат на капитальный ремонт мельницы в условиях эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технологического университета, 2018. № 12. С. 14-20.
4. Станок для обработки цапф помольных мельниц: пат. 166615 Российская Федерация, МПК В23В 5/00 / О.В. Бестужева, Ю.А. Бондаренко, М.А. Федоренко, Ю.Г. Липчанская; заявитель и патентообладатель – Бестужева Ольга Васильевна. № 2016104065/02; заявл. 09.02.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 30. 1 с.: ил.
5. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требования по надежности. М.: Стандартинформ, 2017. 23 с.
6. Несвижский, О.А. Долговечность быстроизнашивающихся деталей цементного оборудования. М.: Машиностроение, 1968. 223 с.
7. Проников А.С. Надежность и долговечность машин и оборудования. Опыт и теоретические исследования. М: Издательство стандартов, 1972. 314 с.
8. РД 50–690–89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. М., 1989. 35 с.
9. РД 26.260.004–91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. М., 1992. 28 с.
10. Гржибовский А. М. Выбор статистического критерия для проверки гипотез // Экология человека, 2008. №11. С. 48-57.
11. Равин А.А. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования / А.А. Равин, О.В. Хруцкий // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология, 2018. №1. С. 33-47.
12. Identification of Critical States of Technological Processes Based on Predictive Analytics Methods / S.M. Kovalev, I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov, K. I. Kornienko // Automation and Remote Control. 2023. Vol. 84, No. 4. P. 424-433.

### References

1. Verevkin A.P. Predictive analytics. Ufa: USPTU, 2021. 86 p.

2. Kamaeva Yu. V. Prospects for the use of predictive analytics in construction / Yu. V. Kamaeva, L.A. Adamtsevich // Construction and Architecture, 2023. No. 2. pp. 12-22.
3. Bestuzheva O.V. Reduction of time costs for capital repairs of a mill in operating conditions // Bulletin of the Irkutsk State Technological University, 2018. No. 12. Pp. 14-20.
4. Machine for processing trunnions of grinding mills: pat. 166615 Russian Federation, MPK B23B 5/00 / O.V. Bestuzheva, Yu.A. Bondarenko, M.A. Fedorenko, Yu.G. Lipchanskaya; applicant and patent holder – Bestuzheva Olga Vasilyevna. No. 2016104065/02; application 09.02.2016; publ. 10.12.2016, Bul. No. 30. 1 p.: ill.
5. GOST 27.003–2016. Reliability in technology. Composition and general rules for setting reliability requirements. Moscow: Standartinform, 2017. 23 p.
6. Nesvizh, O.A. Durability of wear-resistant parts of cement equipment. M.: Mechanical engineering, 1968. 223 p.
7. Pronikov A.S. Reliability and durability of machinery and equipment. Experience and theoretical research. Moscow: Publishing House of Standards, 1972. 314 p.
8. RD 50-690-89. Reliability in technology. Methods for evaluating reliability indicators based on experimental data. M., 1989. 35 p.
9. RD 26.260.004–91. Forecasting the residual life of equipment by changing the parameters of its technical condition during operation. M., 1992. 28 p.
10. Grzybowski A.M. The choice of a statistical criterion for testing hypotheses // Human Ecology, 2008. No.11. pp. 48-57.
11. Ravin A.A. Engineering methods for forecasting the residual life of equipment / A.A. Ravin, O.V. Khrutsky // Bulletin of the ASTU. Series: Marine Engineering and Technology, 2018. No.1. pp. 33-47.
12. Identification of Critical States of Technological Processes Based on Predictive Analytics Methods / S. M. Kovalev, I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov, K. I. Kornienko // Automation and Remote Control. 2023. Vol. 84, No. 4. P. 424-433.

**Бондаренко Юлия Анатольевна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения  
**Явурик Ольга Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий  
**Ломакин Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной информатики и информационных технологий

**Bondarenko Julia Anatolyevna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering  
**Yavurik Olga Vasilyevna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies  
**Lomakin Vladimir Vasilyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Informatics and Information Technology