

УДК 62-192:519:234:622.06
<http://doi.org/10.18799/24131830/2026/8/5495>
Шифр специальности ВАК: 2.3.3
Научная статья



Влияние среднего дебита на надежность погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания

А.А. Ефремов^{1✉}, М.Д. Носков², А.А. Филипас¹, А.А. Щипков^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Российская Федерация, г. Томск

² Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ», Российская Федерация, г. Северск

✉ alexyefremov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Надёжность скважинных насосных агрегатов, используемых для добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания, в значительной мере определяется работоспособностью погружных электродвигателей. Работа погружного электродвигателя в режимах, отличающихся от номинального, снижает ожидаемый срок службы оборудования. Уточнение вероятностной модели надёжности электродвигателя с учётом его нагрузки, определяемой через средний дебит скважины, приводит к повышению точности расчёта потребности в новых электродвигателях и напрямую влияет на рентабельность производства. **Цель.** Уточнение вероятностной модели надёжности погружного электродвигателя путём определения зависимости её параметров и значения средней наработки до отказа от значения среднего дебита. **Методы.** Статистические методы, анализ выживаемости, проверка статистических гипотез. **Результаты и выводы.** Для полученной ранее вероятностной модели надёжности погружного электродвигателя, основанной на смеси двух распределений Вейбулла, определены значения её параметров для групп электродвигателей, работающих с различной нагрузкой. Определены зависимости пяти параметров модели надёжности от значения среднего дебита в виде кусочно-линейных аппроксимаций; их адекватность подтверждена с использованием непараметрических критериев согласия. На основе уточнённой вероятностной модели надёжности получена зависимость ожидаемой наработки до отказа погружного электродвигателя от среднего дебита скважины. Показано, что работа электродвигателя с дебитами, существенно отличающимися от номинальных, приводит к заметному снижению значения средней наработки до отказа. Полученная уточнённая вероятностная модель надёжности может быть использована в информационно-управляющих системах добычного комплекса для формирования прогноза срока службы погружных электродвигателей, а также для расчета потребности в электродвигателях, необходимых для замены вышедших из строя в горизонте планирования.

Ключевые слова: вероятностная модель надежности, погружной электродвигатель, добыча урана, скважинное подземное выщелачивание, средний дебит, непараметрические критерии согласия

Вклад авторов: А.А. Ефремов – разработка методологии, обработка и анализ данных, написание текста статьи; М.Д. Носков – концептуализация, общее руководство; А.А. Филипас – корректировка методологии, научное руководство; А.А. Щипков – разработка методологии, анализ результатов, финальное редактирование, научное руководство.

Использование средств ИИ: авторы заявляют о том, что при написании данной статьи не применялись средства генеративного искусственного интеллекта.

Для цитирования: Ефремов А.А., Носков М.Д., Филипас А.А., Щипков А.А. Влияние среднего дебита на надежность погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания. *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2026, Т. 337, № 8, С. 200–210. <http://doi.org/10.18799/24131830/2026/8/5495>

Конфликт интересов: отсутствует.

UDC 62-192:519:234:622.06
<http://doi.org/10.18799/24131830/2026/8/5495>
Scientific paper

Average flow rate effect on the reliability of submersible electric motors of borehole pumping units in uranium mining by the in-situ leaching method

A.A. Efremov^{1✉}, M.D. Noskov², A.A. Filipas¹, A.A. Shchipkov^{1,2}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,
Seversk, Russian Federation

✉ alexyefremov@tpu.ru

Abstract. Relevance. The reliability of borehole pumping units used for uranium in-situ leaching mining is largely determined by the performance of submersible electric motors. Operating a submersible electric motor in modes other than its nominal value reduces the expected service life of the equipment. Refining the probabilistic reliability model of electric motor, taking into account its load determined by the average well flow rate, leads to increased accuracy in calculating the need for new electric motors and directly impacts production profitability. **Methods.** Statistical methods, survival analysis, statistical hypothesis testing. **Results and conclusions.** For a previously obtained probabilistic reliability model of a submersible electric motor based on a mixture of two Weibull distributions, the parameter values were determined for groups of electric motors operating under different loads. The dependences of five reliability model parameters on the average flow rate were determined as piecewise linear approximations; their adequacy was confirmed using nonparametric goodness-of-fit tests. Based on the refined probabilistic reliability model, the dependence of the expected mean time to failure of a submersible electric motor on the average well flow rate was obtained. It was shown that operating an electric motor with flow rates significantly different from the nominal ones leads to a noticeable decrease in the mean time to failure. The resulting refined probabilistic reliability model can be used in information and control systems of a production complex to forecast the service life of submersible electric motors, as well as to calculate the need for electric motors required to replace failed ones over the planning horizon.

Keywords: probabilistic reliability model, submersible electrical motor, uranium mining, in-situ leaching, average flow rate, nonparametric goodness-of-fit tests

Authors' contribution: A.A. Efremov - methodology development, data processing and data analysis, preparing the manuscript; M.D. Noskov – concept development, general supervision; A.A. Filipas – methodology refinement, scientific supervision; A.A. Shchipkov – methodology development, analysis of the results, final editing, scientific supervision.

Use of AI: AI was not used.

For citation: Efremov A.A., Noskov M.D., Filipas A.A., Shchipkov A.A. Average flow rate effect on the reliability of submersible electric motors of borehole pumping units in uranium mining by the in-situ leaching method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2026, vol. 337, no. 8, pp. 200–210. <http://doi.org/10.18799/24131830/2026/8/5495>

Conflict of interest: none.

Введение

Скважинное подземное выщелачивание (СПВ) является наиболее эффективным методом добычи урана [1, 2]. Разработка месторождений методом СПВ осуществляется с помощью системы технологических скважин. Через закачные скважины в рудовмещающий горизонт нагнетается выщелачивающий раствор, который растворяет урановые минералы [3, 4]. Содержащий уран продуктивный раствор поднимается на поверхность через откачные скважины с помощью электроцентробежных насосных агрегатов (ЭЦНА). На добычных полигонах

СПВ постоянно работают сотни технологических скважин. Для управления режимами работы скважин применяются автоматизированные информационные системы [5, 6]. Оптимальные расходы растворов для каждой скважины изменяются в процессе отработки запасов урана технологических блоков. Приёмистость закачных скважин регулируется с помощью запорной арматуры. Дебитом откачных скважин управляют путем изменения частоты питающего напряжения, подаваемого на погружной электродвигатель (ПЭД) ЭЦНА, с помощью преобразователя частоты станции управления насосом [3].

Выбор параметров ПЭД ЭЦНА откачных скважин при проектировании разработки месторождений основан на ожидаемых средних значениях дебита скважин и высоты подъёма растворов. Таким образом, во время разработки месторождения значительная часть ПЭД ЭЦНА откачных скважин может работать в режимах, существенно отличающихся от номинальных. Это приводит к уменьшению времени до отказа ПЭД.

Данная статья посвящена количественной оценке влияния среднего дебита, с которым ЭЦНА работает в течение срока службы, на ожидаемое значение наработки до отказа ПЭД при добыче урана методом СПВ. Актуальность данного исследования связана с задачей снижения себестоимости добычи, в том числе за счет увеличения срока службы ЭЦНА, а также необходимостью планирования потребности предприятия в ПЭД.

Оценка влияния среднего дебита ЭЦНА на параметры вероятностной модели надежности ПЭД

На предыдущем этапе исследований [7] была разработана вероятностная модель надежности (ВМН) погружных ПЭД, применяемых на предприятиях горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом» для добычи урана методом СПВ. Модель позволяет проводить расчет вероятности отказа на предстоящий период времени для используемого на предприятии ПЭД, исходя из текущего времени его наработки. На основе модели было создано проблемно-ориентированное программное обеспечение, позволяющее с достаточной точностью прогнозировать количество двигателей, необходимых для замены отказавших в целом по предприятию [8]. Для обоснования модели использовалась выборка объема $N = 688$ наработок до отказа или до момента цензурирования электродвигателей марки ПЭДТ мощностью 5,5 кВт. Полученная ВМН была представлена в форме закона распределения времени безотказной работы, являющегося двухкомпонентной смесью распределений Вейбулла [9–11], для которой были определены точечные оценки $\hat{\Theta}_{\text{общ}}$ параметров модели:

$$F_{\text{общ}}(x, \Theta) = \theta_5 \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\theta_1} \right)^{\theta_2} \right) \right] + (1 - \theta_5) \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\theta_3} \right)^{\theta_4} \right) \right], \quad (1)$$

где $\Theta = (\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5)^T$, $\theta_i > 0$ – вектор параметров распределения.

В рамках настоящего исследования, используя возможности работающей на горнодобывающих предприятиях информационной системы добычного комплекса (ИСДК) [4], для каждого ПЭД, входящего в рассматриваемую выборку, были определены средние значения дебита откачных скважин за все время его работы. Таким образом, для каждого ПЭД были установлены значения среднего дебита q на момент его отказа или прекращения наблюдения.

Анализ исследуемой выборки показал, что распределение величины q близко к нормальному со средним значением 5,45 м³/ч (рис. 1), что подтверждается рассчитанным значением статистики критерия хи-квадрат.

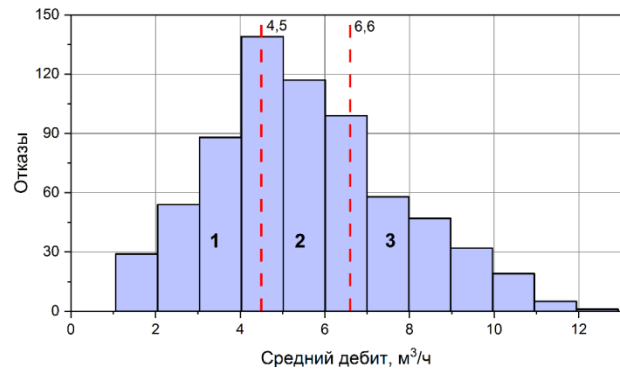


Рис. 1. Распределение значений среднего дебита в анализируемом наборе данных

Fig. 1. Distribution of average flow rate values in the analyzed data set

Основная гипотеза настоящего исследования предполагает, что значение дебита влияет на время до отказа ПЭД, а значит, оказывает значительное влияние на параметры ВМН. Для учёта этого влияния мы будем использовать значения среднего дебита q на момент отказа ПЭД или прекращения наблюдения и определим зависимости значений параметров вероятностной модели (1) от величины этого эксплуатационного параметра.

Данные о наработке и значении среднего дебита i -го электродвигателя представляют собой тройку (x_i, σ_i, q_i) , где x_i – наблюдаемая наработка до отказа или момента правого цензурирования; $\sigma_i = 1$, если i -й двигатель отказал, или $\sigma_i = 0$, если x_i есть наработка i -го двигателя, не отказавшего к текущему моменту времени; q_i – значение среднего дебита.

Разделим диапазон значений величины q на три подинтервала так, чтобы в первом оказались ПЭД с малыми значениями среднего дебита ($q \leq 4,5$ м³/ч), во втором – со средними значениями ($4,5 < q \leq 6,6$ м³/ч), в третьем – с высокими ($q > 6,6$ м³/ч).

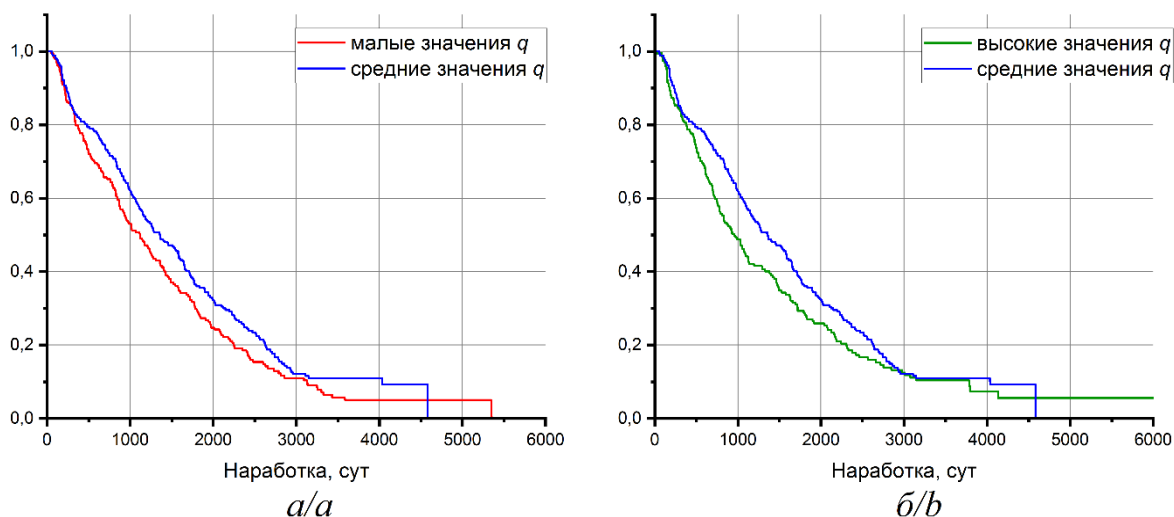


Рис. 2. Оценки Каплана–Мейера для выборок наработок двигателей с разными значениями среднего дебита: а) двигатели с малыми и средними значениями q ; б) двигатели со средними и высокими значениями q

Fig. 2. Kaplan–Meier estimates for samples of motor operating times with different values of average flow rate: a) motors with low and medium q values; b) motors with medium and high q values

В результате в категорию ПЭД с малыми значениями среднего дебита попало 233 электродвигателя, со средними значениями – 258 электродвигателей, с высокими – 197. Таким образом получим выборки $V_i = \{(x_j, \sigma_j, q_j)\}$, $j=1..N_i$, где N_i – объем выборки i -й категории, $i=1..3$.

Для каждой категории ПЭД была определена эмпирическая функция вероятности безотказной работы (ВБР) $\hat{P}_i(x)$, $i=1..3$ с использованием множительной оценки Каплана–Мейера [12–14]. На рис. 2 приведены сравнения эмпирических функций ВБР для 1-й и 2-й (рис. 2, а), и 2-й и 3-й (рис. 2, б) категорий ПЭД.

Гипотезы об однородности выборок наработок двигателей с малыми и средними значениями среднего дебита, а также двигателей со средними и высокими значениями среднего дебита проверялись с использованием двухвыборочного логрангового критерия [15, 16]. Полученные значения статистик $LR_{1,2}^\alpha = 4,55$ и $LR_{2,3}^\alpha = 3,94$ для наработок ПЭД из 1-й и 2-й категорий и 2-й и 3-й категорий, соответственно, превышают критическое значение статистики $LR_{крит}^\alpha = 3,84$ для уровня значимости $\alpha=0,05$, что позволило отвергнуть гипотезы об однородности выборок и считать их принадлежащими к разным распределениям.

Определим оценки параметров вероятностной модели надежности электродвигателей для каждой категории, считая, что вид закона распределения вероятности отказа определяется выражением (1), и проведем верификацию полученных результатов с помощью критериев согласия.

Поскольку использование одной и той же выборки для оценки параметров и для проверки согласия приводит к тому, что проверяемая гипотеза становится сложной [17], разделим случайным образом выборки каждой категории на две по возможности равные части (табл. 1): V_i^A – для оценки, V_i^B – для верификации, где $i=1..3$. Данная процедура позволит сформулировать простую гипотезу при использовании критериев согласия.

Таблица 1. Параметры выборок для различных категорий электродвигателей

Table 1. Sample parameters for different categories of electric motors

Категория Category	Выборка Sample	Объем выборки Sample size	Степень цензурирования Censoring level
1	V_1^A	116	0,121
	V_1^B	117	0,128
2	V_2^A	129	0,163
	V_2^B	129	0,163
3	V_3^A	98	0,133
	V_3^B	99	0,131

Точечные оценки параметров $\hat{\Theta}_i$, $i=1..3$ вероятностной модели надежности для электродвигателей в i -й категории определим с использованием метода максимального правдоподобия. Поскольку разделение выборок V_i проводится случайно, с целью повышения точности результатов оценивания проведем $N_{rep}=10000$ случайных разбиений каждой выборки и усредним результаты, получив в итоге векторы точечных оценок $\hat{\Theta}_i = (\hat{\theta}_{1,i} \hat{\theta}_{2,i} \hat{\theta}_{3,i} \hat{\theta}_{4,i} \hat{\theta}_{5,i})^T$ (табл. 2).

Таблица 2. Оценки максимального правдоподобия параметров модели надёжности для электродвигателей из различных категорий

Table 2. Maximum likelihood estimates of reliability model parameters for electric motors from different categories

Категория Category	$q_{срi}, \text{м}^3/\text{ч}$ m^3/h	$\hat{\theta}_1$ сут/day	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\theta}_3$ сут/day	$\hat{\theta}_4$	$\hat{\theta}_5$
1	3,28	199,0	6,4	1615,5	1,252	0,0587
2	5,5	235,8	3,73	2035,7	1,408	0,1013
3	8,26	149,4	50,5	1584,1	1,078	0,0359

Для каждой i -й категории сформулируем простую нулевую гипотезу $H_{0,i}: F_i(x) = F(x, \hat{\Theta}_i)$.

Проверка адекватности полученных результатов будет проводиться с использованием непараметрических критериев согласия Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова и Андерсона–Дарлинга.

Поскольку выборки V_i^B содержат данные с многократным правым цензурированием, для расчёта значений статистик критериев согласия предлагается сформировать из них «псевдополные» выборки $\tilde{V}_i^B$ [18], заменяя в них элементы $(x_j, 0, q_j)$ на элементы вида $(\tilde{x}_j, 1, q_j)$, где $\tilde{x}_j = F^{-1}(\xi_j, \hat{\Theta}_i)$, а ξ_j – случайные числа, распределённые равномерно на интервале $(F^{-1}(x_j, \hat{\Theta}_i); 1)$.

Для каждой из $N_{rep}=10000$ реализаций выборки $\tilde{V}_i^B$ необходимо рассчитать значения статистики Колмогорова с поправкой Большева:

$$S_{K,i} = \frac{6 \cdot N \cdot D_{N,i} + 1}{6\sqrt{N_i}}, \quad (2)$$

статистики критерия ω^2 Крамера–Мизеса–Смирнова:

$$S_{\omega,i} = \frac{1}{12N_i} + \sum_{j=1}^N \left\{ F(x_j, \hat{\Theta}_i) - \frac{2j-1}{2N_i} \right\}^2, \quad (3)$$

статистики критерия Ω^2 Андерсона–Дарлинга:

$$S_{\Omega,i} = -N_i - \left\{ \sum_{j=1}^N \left[\frac{2j-1}{2N_i} \ln F(x_j, \hat{\Theta}_i) + \left(1 - \frac{2j-1}{2N_i} \right) \ln (1 - F(x_j, \hat{\Theta}_i)) \right] \right\}, \quad (4)$$

где N_i – объем выборки V_i^B ,

$$D_{N,i} = \max(D_{N,i}^+, D_{N,i}^-),$$

$$D_{N,i}^+ = \max_{1 \leq j \leq N_i} \left\{ \frac{j}{N_i} - F(x_j, \hat{\Theta}_i) \right\},$$

$$D_{N,i}^- = \max_{1 \leq j \leq N_i} \left\{ F(x_j, \hat{\Theta}_i) - \frac{j-1}{N_i} \right\},$$

$F(x, \hat{\Theta}_i)$ – теоретическая функция распределения, соответствующая i -й категории, $i = 1..3$ [18–20].

Усредненные значения статистик, рассчитанных по формулам (2)–(4) для каждой категории, приведены в табл. 3. При этом анализ распределений значений статистик показывает, что доля значений, превышающих критические для каждого критерия и уровня значимости $\alpha=0,05$, составляет не более 1,5 % (рис. 3), что не дает оснований отклонить нулевые гипотезы, сформулированные для каждой категории электродвигателей.

Таблица 3. Усредненные значения статистик непараметрических критериев согласия

Table 3. Average values of nonparametric goodness-of-fit tests statistics

Категория Category	$\bar{S}_K$	$\bar{S}_\omega$	$\bar{S}_\Omega$
1	0,663	0,087	0,556
2	0,691	0,092	0,595
3	0,784	0,12	0,766

Значения параметров вероятностных моделей надёжности, приведенные в табл. 2 для электродвигателей из различных категорий, демонстрируют существенную зависимость от значения среднего расхода.

Далее получим функциональные зависимости $\theta_j(q)$, $j=1..5$ параметров ВМН от значения среднего расхода. Для этого проведем кусочно-линейную аппроксимацию результатов оценивания параметров из табл. 2 (рис. 4).

В соответствии с полученными результатами ВМН электродвигателей погружных скважинных насосов с учетом значения среднего дебита примет вид

$$F(x, \Theta(q)) = \theta_5(q) \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\theta_1(q)}\right)^{\theta_2(q)}} \right] + (1 - \theta_5(q)) \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\theta_3(q)}\right)^{\theta_4(q)}} \right], \quad (5)$$

где q – значение среднего дебита, $\text{м}^3/\text{ч}$; $\theta_j(q)$ – кусочно-линейная аппроксимация для j -го параметра ВМН, $j=1..5$.

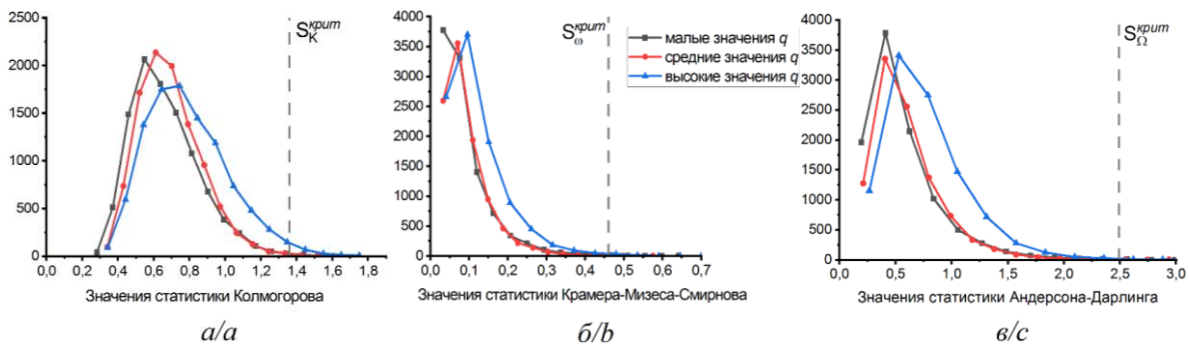


Рис. 3. Распределение значений статистик непараметрических критериев согласия для двигателей с разными значениями среднего дебита: а) критерий Колмогорова; б) критерий Крамера–Мизеса–Смирнова; в) критерий Андерсона–Дарлингга

Fig. 3. Distribution of the values of statistics of nonparametric goodness-of-fit tests for motors with different values of average flow rate: а) Kolmogorov test; б) Cramer–Mises–Smirnov test; в) Anderson–Darling test

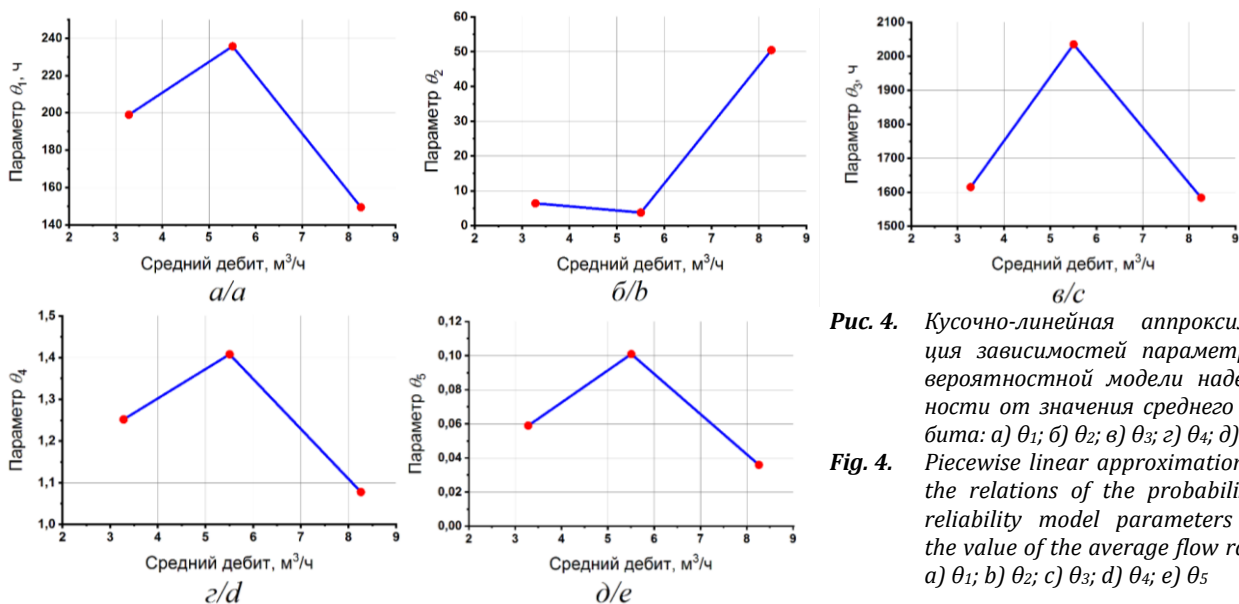


Рис. 4. Кусочно-линейная аппроксимация зависимостей параметров вероятностной модели надёжности от значения среднего дебита: а) θ_1 ; б) θ_2 ; в) θ_3 ; г) θ_4 ; д) θ_5

Fig. 4. Piecewise linear approximation of the relations of the probabilistic reliability model parameters on the value of the average flow rate: а) θ_1 ; б) θ_2 ; в) θ_3 ; г) θ_4 ; е) θ_5

Для верификации полученных зависимостей параметров адаптивной ВМН от значения среднего расхода необходимо убедиться в том, что модель будет адекватно описывать произвольную выборку наработок со средним значением параметра q , $q_{ср1} \leq q \leq q_{ср3}$, где $q_{ср1}$, $q_{ср3}$ – средние значения крайних подынтервалов диапазона изменения среднего дебита. Для этого из общей выборки данных $V = \{(t_i, \sigma_i, q_i)\}$, упорядоченной по возрастанию значений q_i , $i = 1..N$ по принципу «скользящего окна» формируется набор выборок $W_i = \{(t_j, \sigma_j, q_j)\}$ объема $M = 197$, $i = 1..N - M$, $j = i..i + M - 1$.

Обозначим среднее значение параметра q в выборке W_i как $\bar{q}_i$. Для каждой выборки W_i сформулируем простую нулевую гипотезу $H_{0,i} : F_i(x) = F(x, \Theta(\bar{q}_i))$. Используя ту же процедуру проверки статистических гипотез, что и при верификации ВМН для каждой категории ПЭД, рассчитаем значения статистик $S_{K,i,n}$, $S_{\omega,i,n}$, $S_{\Omega,i,n}$ ($n = 1..N_{rep}$) критериев согласия по форму-

лам (2)–(4) и определим их средние значения $\bar{S}_{K,i}$, $\bar{S}_{\omega,i}$, $\bar{S}_{\Omega,i}$ по всем реализациям «псевдополных» выборок W_i^+ . Также для выбранного уровня значимости $\alpha = 0.05$ найдем значения 0,95-квантиля этих же статистик: $S_{K,i}^{0.95}$, $S_{\omega,i}^{0.95}$, $S_{\Omega,i}^{0.95}$. Введем дополнительное условие: гипотеза $H_{0,i}$ отклоняется при заданном уровне значимости α , если значение квантиля уровня $(1 - \alpha)$ хотя бы одной статистики превышает критическое значение этой статистики для уровня α , т. е. если условие $(S_{K,i}^{1-\alpha} \geq S_{K,i}^{\alpha}) \vee (S_{\omega,i}^{1-\alpha} \geq S_{\omega,i}^{\alpha}) \vee (S_{\Omega,i}^{1-\alpha} \geq S_{\Omega,i}^{\alpha})$ истинно.

На рис. 5 приведены как средние значения статистик критериев Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова и Андерсона–Дарлингга для выборок W_i^+ , так и значения их 0,95-квантилей, полученных по N_{rep} реализациям. Видно, что для всех выборок указанные значения не превышают соответствующие критические.

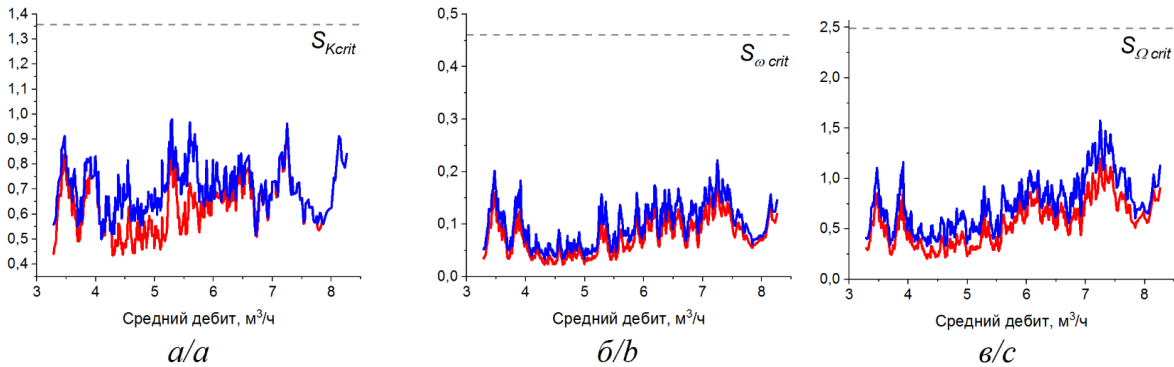


Рис. 5. Средние значения (красные линии) и 0,95-квантили (синие линии) для статистик непараметрических критериев согласия: а) критерий Колмогорова; б) критерий Крамера-Мизеса-Смирнова; в) критерий Андерсона-Дарлинга

Fig. 5. Mean values (red lines) and 0,95-quantiles (blue lines) for nonparametric goodness-of-fit statistics: a) Kolmogorov test; б) Cramer-Mises-Smirnov test; в) Anderson-Darling test

Результаты верификации позволяют утверждать, что полученные уравнения кусочно-линейной аппроксимации могут быть использованы для описания зависимостей параметров ВМН электродвигателя от значения среднего дебита раствора с достаточной точностью.

Анализ влияния среднего дебита на надежность ПЭД

Полученные зависимости параметров ВМН ПЭД от среднего дебита позволяют количественно оценить влияние среднего дебита на надежность ПЭД.

Наиболее наглядным показателем надежности является наработка (время) до отказа, среднее значение которой можно найти, используя кусочно-линейную аппроксимацию параметров ВМН при различных значениях среднего дебита. В работе [7] сделан вывод, что компонента, определяемая параметрами модели θ_1 , θ_2 , описывает надежность группы ПЭД с ранними отказами, а их общее количество в рассматриваемой выборке характеризуется весовым коэффициентом θ_5 . Надежность основной группы ПЭД определяется параметрами θ_3 , θ_4 . Используя формулу (5), можно получить выражение для зависимости средней наработки до отказа всех ПЭД от среднего дебита (рис. 6):

$$T_{cp}(q) = \theta_5(q)T_{cp1}(q) + (1 - \theta_5(q))T_{cp2}(q), \quad (6)$$

где $T_{cp1}(q) = \theta_1(q) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\theta_2(q)}\right)$ – средняя наработка ПЭД с ранними отказами;
 $T_{cp2}(q) = \theta_3(q) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\theta_4(q)}\right)$ – средняя наработка основной группы ПЭД; $\Gamma(z)$ – гамма-функция.

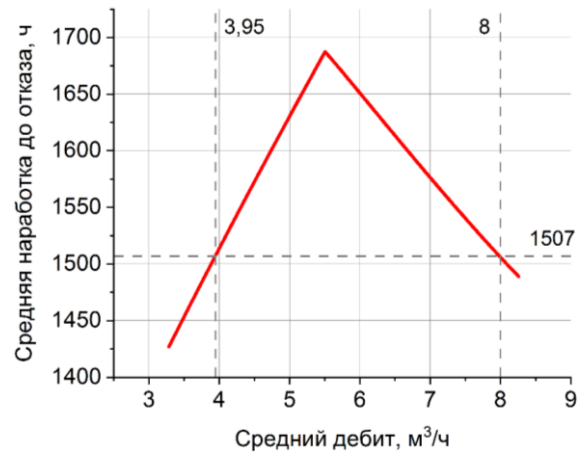


Рис. 6. Зависимость средней наработки до отказа от значения среднего дебита

Fig. 6. Relationship between mean time to failure and average flow rate

Анализ графика на рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что наибольшее значение среднего времени до отказа T_{cp} (около 1700 суток) имеют ПЭД, работающие со средним дебитом 5,5 м³/ч, близким к номинальному (6 м³/ч). Среднее время до отказа для категорий ПЭД с меньшим и большим значениями среднего дебита уменьшается, причем наименьшая надежность имеет место при малых дебитах. Если бы все ПЭД работали со средним дебитом, близким к номинальному, приращение T_{cp} составило бы около 180 суток (12 %) относительно средней наработки (1507 суток), рассчитанной в соответствии с ВМН, полученной в работе [7].

Основной причиной уменьшения времени до отказа ПЭД при работе откачной скважины с дебитом выше номинального, вероятно, является длительный перегрев, связанный с повышенным тепловыделением обмоток при перегрузке электродвигателя.

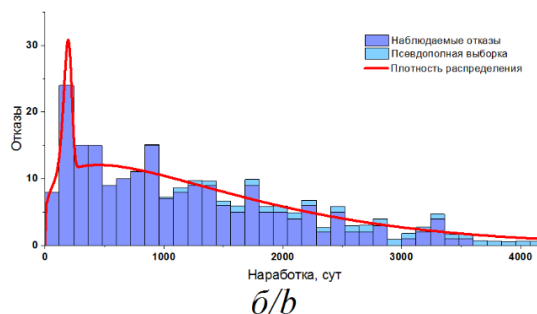
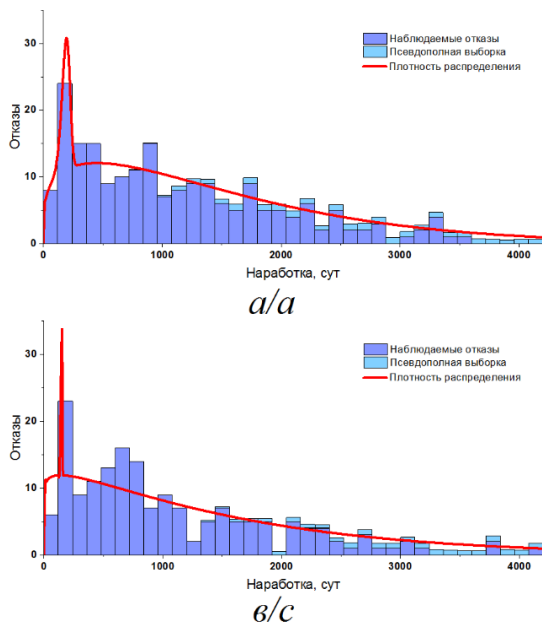


Рис. 7. Гистограммы распределений наработок до отказа для электродвигателей из разных категорий со значениями q : а) меньше номинального; б) близки к номинальному; в) выше номинального

Fig. 7. Distribution histograms of time to failure for electric motors from different categories: а) with q values less than the nominal; б) with nominal values of q ; в) with q values higher than the nominal

Это усугубляется ускоренным износом уплотнений и подшипников, связанным с повышенной частотой вращения вала ПЭД. Уменьшение времени до отказа электродвигателей ЭЦНА, работающих с дебитом ниже номинального значения, скорее всего, связано также с перегревом вследствие ухудшения условий охлаждения из-за уменьшения скорости движения раствора, который является охлаждающей средой для ПЭД. Причем характер зависимости на рис. 6 показывает, что уменьшение скорости охлаждаемой среды соответствует наиболее тяжелому режиму работы ПЭД.

Отдельно следует обратить внимание на надежность группы ПЭД с ранними отказами. Наличие этой группы во всем диапазоне изменения среднего дебита наглядно иллюстрируется на рис. 7, где представлены функции плотности ВМН и гистограммы распределения наработок до отказа для всех категорий ПЭД.

Характер зависимости средней наработки до отказа $T_{ср1}$ от среднего дебита для ПЭД этой группы (рис. 8) аналогичен $T_{ср}(q)$: наибольшее значение соответствует категории с номинальным средним дебитом. Однако минимум наработки смещается в диапазон больших дебитов. Если принять гипотезу, высказанную в [7], о том, что наличие этой группы связано со скрытыми дефектами ПЭД, то можно предположить, что эти дефекты в первую очередь связаны с подшипниковыми узлами и уплотнениями, так как минимальное значение $T_{ср1}(q)$ лежит в области больших дебитов, что соответствует увеличенным скоростям вращения ротора. Большая частота вращения способствует ускоренному развитию таких дефектов и быстрому выходу из строя ПЭД.

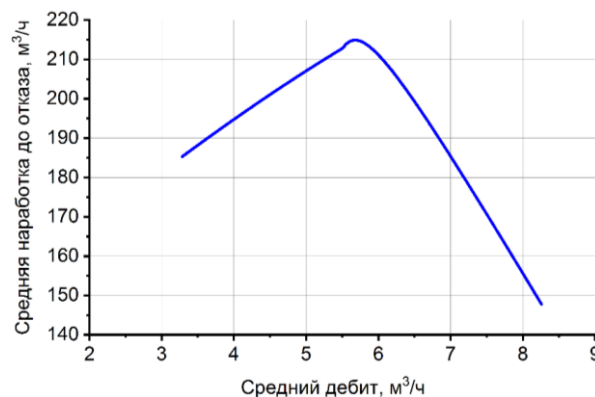


Рис. 8. Зависимость средней наработки до отказа группы ПЭД с ранними отказами от значения среднего дебита

Fig. 8. Relationship between mean time to failure of a group of submersible electric motors with early failures and average flow rate

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Значение среднего дебита откачной скважины существенно влияет на параметры ВМН ПЭД, входящих в состав ЭЦНА. Отклонение среднего дебита, с которым работал ПЭД, от номинального приводит к снижению времени наработки до отказа.
2. При проектировании геотехнологических полигонов СПВ урана необходимо учитывать прогнозируемые дебиты откачных скважин и высоту подъема и на основе этого определять требуемые паспортные мощности ПЭД, обеспечивая

тем самым их работу преимущественно в режимах, близких к номинальному. Это позволит увеличить продолжительность их работы, что будет способствовать повышению экономической эффективности добычи урана методом СПВ.

3. В случае необходимости работы со средними дебитами, значительно отличающимися от номинальных (как в меньшую, так и в большую сторону), целесообразно использовать законы управления ПЭД, чтобы минимизировать тепловыделение в обмотках. Это позволит уменьшить риск перегрева ПЭД и увеличит время его работы до отказа.
4. Во всем диапазоне изменения среднего дебита фиксируется существенное количество ПЭД с

низкими значениями наработок до отказа. Вероятнее всего, это связано с влиянием на надежность электродвигателя скрытых дефектов, которые не были выявлены при испытаниях перед установкой ЭЦНА в скважину. В связи с этим при проведении таких испытаний ПЭД целесообразно использовать выявляющие подобные дефекты методы диагностики.

5. Полученная уточнённая ВМН, учитывающая зависимость параметров модели от среднего дебита, может быть использована в информационно-управляющих системах добычного комплекса для формирования прогноза срока службы ПЭД, а также для расчета потребности в ПЭД, необходимых для замены вышедших из строя в горизонте планирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Святецкий В.С., Солодов И.Н. Стратегия технологического развития уранодобывающей отрасли России. *Горный журнал*, 2015, № 7, С. 68–77.
2. Sreenivas T., Kalburgi A.K., Sahu M.L., Roy S.B. Exploration, mining, milling and processing of uranium. *Nuclear Fuel Cycle*. Eds. B.S. Tomar, P.R.V. Rao, S.B. Roy, J.P. Panakkal, K. Raj, A.N. Nandakumar. Singapore: Springer, 2023. P. 17–79. DOI: 10.1007/978-981-99-0949-0_2.
3. *Геотехнология урана (российский опыт): монография*. Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. М.: КДУ «Университетская книга», 2017. 576 с.
4. Zeng S., Sun J., Sun B. et al. Experimental investigation on the influence of surfactant to the seepage characteristics of acid leaching solution during in-situ leaching of uranium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, Vol. 332, P. 3651–3660. DOI: 10.1007/s10967-023-09038-5.
5. Истомин А.Д., Бабкин А.С., Носков М.Д., Чеглоков А.А., Попонин Н.А. Технологическая информационная система для контроля и управления добычным комплексом предприятия по добыче урана методом подземного выщелачивания. *Цветные металлы*, 2012, № 1/3, С. 16–22.
6. Валитов С.Н., Истомин А.Д., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Программный модуль учета, контроля и анализа работы насосного оборудования на предприятии, ведущем добычу урана методом скважинного подземного выщелачивания. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2017, Т. 60, № 9/2, С. 18–23.
7. Ефремов А.А., Кадыров К.К., Носков М.Д. и др. Вероятностная модель надежности погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2024, Т. 335, № 10, С. 253–264. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721.
8. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662512 Российская Федерация. "Программное обеспечение для предсказательной аналитики работы погружных насосных агрегатов геотехнологического предприятия АО "Далур": № 2024661457: заявл. 20.05.2024; опубл. 29.05.2024.*
9. *ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных*. М.: Стандартинформ, 2020. 62 с. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=218209> (дата обращения: 20.12.2025).
10. Kumar S., Jain M. Shifted mixture model using weibull, lognormal, and gamma distributions. *National Academy Science Letters*, 2023, № 46, P. 539–545. DOI: 10.1007/s40009-023-01287-y.
11. Wu Y., Lu Z., Wu J. et al. Reliability evaluation of components with multiple failure modes based on mixture Weibull distribution using expectation maximization algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2024, Vol. 38, P. 649–660. DOI: 10.1007/s12206-024-0113-1.
12. Lee H. Methods for censored survival time data. *Foundations of Applied Statistical Methods*. Cham: Springer, 2023. P. 141–145. DOI: 10.1007/978-3-031-42296-6_7.
13. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R., Taylor J. Survival analysis and censored data. *An Introduction to Statistical Learning. Springer Texts in Statistics*. Cham: Springer, 2023. P. 469–502. DOI: 10.1007/978-3-031-38747-0_11.
14. Kvam P., Lu J.C. Statistics for reliability modeling. *Springer Handbook of Engineering Statistics*. Eds. H. Pham. London: Springer, 2023. P. 53–65. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_3.
15. Джеймс Г., Уиттон Д., Хасты Т., Тибширани Р. *Введение в статистическое обучение с примерами на Python: руководство*. Пер. с англ. А. Ю. Гинько. М.: ДМК Пресс, 2024. 846 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/464258> (дата обращения: 26.12.2025).
16. Janssen P., Veraverbeke N. Nonparametric estimation of univariate and bivariate survival functions under right censoring: a survey. *Metrika*, 2024, Vol. 87, P. 211–245. DOI: 10.1007/s00184-023-00911-7
17. Лемешко Б.Ю. О проблемах и ошибках применения критериев согласия. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, 2023, № 64, С. 74–90. DOI: 10.17223/19988605/64/8.

18. Chimitova E., Nikulin M., Lemeshko B. et al. Nonparametric goodness-of-fit tests for censored data. *Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods and Applications*. Beijing, 20–24 June 2011. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. P. 817–823.
19. Лемешко Б.Ю. *Непараметрические критерии согласия: руководство по применению*. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2014. 163 с.
20. Лемешко Б.Ю., Горбунова А.А., Лемешко С.Б., Рогожников А.П. *О решении проблем применения некоторых непараметрических критериев согласия*. Автометрия, 2014, Т. 50, № 1, С. 26–43.

Информация об авторах

Александр Александрович Ефремов, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; alexeyefremov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8149-3641>

Михаил Дмитриевич Носков, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Северского технологического института, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; MDNoskov@mephi.ru

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой – руководитель отделения автоматизации и робототехники на правах кафедры Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Александр Андреевич Щипков, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Северского технологического института, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65; доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; AAShchipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Поступила в редакцию: 09.02.2026

Поступила после рецензирования: 10.04.2026

Принята к публикации: 04.08.2026

REFERENCES

1. Svyatetsky V.S., Solodov I.N. Technological advancement strategy of uranium mining industry in Russia. *Mining Journal*, 2015, no. 7, pp. 68–77. (In Russ.)
2. Sreenivas T., Kalburgi A.K., Sahu M.L., Roy S.B. Exploration, mining, milling and processing of uranium. *Nuclear Fuel Cycle*. Eds. Tomar B.S., Rao P.R.V., Roy S.B., Panakkal J.P., Raj K., Nandakumar A.N. Singapore, Springer, 2023. pp. 17–79. DOI: 10.1007/978-981-99-0949-0_2.
3. *Geotechnology of uranium (Russian experience): monograph*. Ed. by I.N. Solodov, E.N. Kamnev. Moscow, KDU, Universitetskaya Kniga Publ., 2017. 576 p. (In Russ.)
4. Zeng S., Sun J., Sun B. Experimental investigation on the influence of surfactant to the seepage characteristics of acid leaching solution during in-situ leaching of uranium. *J Radioanal Nucl Chem*, 2023, vol. 332, pp. 3651–3660. DOI: 10.1007/s10967-023-09038-5.
5. Istomin A.D., Babkin A.S., Noskov M.D., Cheglov A.A., Poponin N.A. Technological information system for monitoring and managing the mining complex of an enterprise for the extraction of uranium using the in-situ leaching method. *Non-Ferrous Metals*, 2012, no. 1/3, pp. 16–22. (In Russ.)
6. Valitov S.N., Istomin A.D., Noskov M.D., Cheglov A.A. Program module for accounting, control and analysis of pumping equipment at uranium mining enterprise. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, no. 9/2, pp. 18–23. (In Russ.)
7. Efremov A.A., Kadyrov K.K., Noskov M.D., Filipas A.A., Shchipkov A.A. Probabilistic reliability model of electrical motors in submersible well pumping units used in the uranium mining by in-situ leaching. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 253–264. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721.
8. Gutsul M.V., Noskov M.D., Sakirko G.K. *Software for predictive analytics of the operation of submersible pumping units of the geotechnical enterprise JSC Dalur*. Certificate of State Registration of a Computer Program, no. 2024662512, Russian Federation, 2024. (In Russ.)
9. SS R 50779.27-2017 *Statistical methods. Weibull distribution. Data analysis*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 62 p. (In Russ.) Available at: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=218209> (accessed 23 January 2024).
10. Kumar S., Jain M. Shifted Mixture Model Using Weibull, Lognormal, and Gamma Distributions. *National Academy Science Letters*, 2023, no. 46, pp. 539–545. DOI: 10.1007/s40009-023-01287-y.
11. Wu Y., Lu Z., Wu J. Reliability evaluation of components with multiple failure modes based on mixture Weibull distribution using expectation maximization algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2024, vol. 38, pp. 649–660. DOI: 10.1007/s12206-024-0113-1
12. Lee H. Methods for censored survival time data. *Foundations of Applied Statistical Methods*. Cham, Springer, 2023. pp. 141–145. DOI: 10.1007/978-3-031-42296-6_7
13. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R., Taylor J. Survival analysis and censored data. *An Introduction to Statistical Learning. Springer Texts in Statistics*. Cham, Springer, 2023. pp. 469–502. DOI: 10.1007/978-3-031-38747-0_11.

14. Kvam P., Lu J.C. Statistics for reliability modeling. *Springer Handbook of Engineering Statistics*. Ed. by H. Pham. London, Springer, 2023. pp. 53–65. DOI: 10.1007/978-1-4471-7503-2_3.
15. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *Introduction to statistical learning with applications in Python*. Moscow, DMK Press, 2024. 846 p. (In Russ.) Available at: <https://e.lanbook.com/book/464258> (accessed 26 December 2025).
16. Janssen P., Veraverbeke N. Nonparametric estimation of univariate and bivariate survival functions under right censoring: a survey. *Metrika*, 2024, vol. 87, pp. 211–245. DOI: 10.1007/s00184-023-00911-7
17. Lemesko B.Yu. On problems and errors in applying goodness-of-fit tests. *Bulletin of Tomsk State University. Control, Computing and Information Science*, 2023, no. 64, pp. 74–90. (In Russ.)
18. Chimitova E., Nikulin M., Lemesko B. Nonparametric goodness-of-fit tests for censored data. *Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability Theory, Methods and Applications*. Beijing, 2011. pp. 817–823.
19. Lemesko B.Yu. *Nonparametric goodness-of-fit tests: application guide*. Moscow, Scientific Publishing Center INFRA-M Ltd, 2014. 163 p. (In Russ.)
20. Lemesko B.Yu., Gorbunova A.A., Lemesko S.B., Rogozhnikov A.P. On solving the problems of applying some nonparametric goodness-of-fit tests. *Autometry*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 26–43. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander A. Efremov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; alexyefremov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8149-3641>

Mikhail D. Noskov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; MDNoskov@mephi.ru

Alexander A. Filipas, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Automation and Robotics Division, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Alexander A. Shchipkov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University «MEPhI», 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation; Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; AAShipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Received: 09.02.2026

Revised: 10.04.2026

Accepted: 04.08.2026