Определение необходимого количества запасных частей в условиях ограниченного объема данных

Defining the required number of spare parts under data constraints

Лейзгольд К.А.[1*], Бочкарев С.В.[1]
Leyzgold K.A.[1*], Bochkarev S.V.[1]
[1] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Российская Федерация, Пермь*
[1] *Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation*
[*] *leizgold_ka@pstu.ru*

Лейзгольд К.А.

Бочкарев С.В.

Резюме. Цель. *Целью работы является сокращение экономических издержек, связанных с простоем оборудования при выходе его из строя. Это особенно актуально для таких отраслей, как нефтедобывающая, в виду территориальной распределенности ремонтируемых объектов и удаленного расположения складов с запасными частями, что приводит к увеличению времени ремонта из-за ожидания нужной запчасти или экземпляра оборудования. В то же время на складе могут быть запчасти, которые в ближайшее время не пригодятся из-за нерационального их состава.* **Методы.** *Управление запасными частями оборудования, как правило, сводится к использованию вероятностных методов и составлению математических моделей для решения оптимизационных задач, однако такие методы требуют данных о техническом состоянии объекта, стоимостных характеристиках и др., что не всегда может быть доступно, поэтому присутствует необходимость в разработке метода без использования такой информации.* **Результаты.** *Предложен метод определения количества запасных экземпляров выходящих из строя объектов с использованием данных о наработках эксплуатируемых однотипных объектов и определения прогнозных вероятностей отказов, позволяющий при отсутствии статистических данных о техническом состоянии объектов свести к минимуму простой оборудования в ожидании запасных частей.*

Abstract. Aim. *The paper aims to reduce the costs associated with the post-failure downtime of equipment. This is especially relevant for industries such as oil production due to the territorial distribution of the maintained facilities and remote location of spare part storage, which leads to increased time to repair due to the wait for the arrival of the right part or piece of equipment. At the same time, there may be spare parts in stock that will not prove to be useful in the near future due to the irrational content of the stock in storage.* **Methods.** *Managing equipment spare parts usually comes down to using probabilistic methods and mathematical models for solving optimization problems, but such methods require data on the technical condition of a facility, cost characteristics, etc., that may not always be available, so a method that does not use such information needs to be developed.* **Results.** *A method is proposed for defining the number of spare items using the times-to-failure of same-type items and identifying the predicted probabilities of failures, which allows, in the absence of statistical data on the technical condition of items, minimising the downtime of equipment while waiting for spare parts.*

Ключевые слова: *ремонт оборудования, эксплуатационные расходы, износ оборудования, запасные части, вероятность отказа.*
Keywords: *equipment repair, operating costs, equipment wear, spare parts, probability of failure.*

Для цитирования: *Лейзгольд К.А., Бочкарев С.В. Определение необходимого количества запасных частей в условиях ограниченного объема данных // Надежность. 2024. №4. С. 20-28. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-20-28*
For citation: *Leyzgold K.A., Bochkarev S.V. Defining the required number of spare parts under data constraints. Dependability 2024;4:20-28. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-20-28*

Поступила: *09.01.2024* / **После доработки:** *29.05.2024* / **К печати:** *18.11.2024*
Received on: *09.01.2024* / **Revised on:** *29.05.2024* / **For printing:** *18.11.2024*

Введение

Согласно распоряжению [1], в рамках реализации межотраслевого проекта «Продукция будущего», входящего в проекты стратегического направления, доля предприятий, использующих технологии предсказательной (предиктивной) аналитики при прогнозировании и проведении послепродажного (сервисного) обслуживания промышленной продукции, к 2030 году должна составлять не менее 75%, а доля предприятий, использующих технологии промышленного интернета вещей, сбора данных и диспетчерского контроля для управления производственными процессами в реальном времени – не менее 95%. Однако на данный момент на предприятиях наблюдается высокая степень износа основных фондов, что ведет к низкой эффективности производственных мощностей, высокой доле брака производства продукции, высоким производственным издержкам и другим негативным последствиям. Проблему усугубляет еще и отсутствие импортозамещающей продукции, а также низкая доля предприятий, использующих ERP и SCM-системы – 21,9% и 14,3% соответственно [2].

Описанная выше проблематика распространяется на все отрасли производственной деятельности, в том числе на предприятия нефтедобычи, на которых используется множество типов оборудования. Актуальность задач заключается в определении соответствующих графиков техобслуживания и прогнозировании отказов этого оборудования. Остановка работы скважины связана с огромными расходами и приводит к простою дорогостоящего оборудования, который вызывает перерыв в работе персонала в ожидании замены или ремонта отказавшего оборудования. В случае работы на шельфе расходы при отказах оборудования и сложность доставки заменяющего оборудования еще больше увеличиваются.

Существующие системы обслуживания скважин характеризуются наличием на месте работы избыточного и дополнительного оборудования. Избыточное оборудование повышает стоимость добычи нефти, увеличивает общие затраты, необходимые для поддержания требуемого уровня работоспособности, такие системы не могут служить оптимальным решением в случае нехватки площади, например, при работе на шельфе или в областях с уязвимой природной средой.

В настоящее время системы обслуживания позволяют обнаруживать аномальное состояние отдельной единицы оборудования и/или прогнозировать время возникновения такого отклонения от нормы в данной единице оборудования. Для этого необходимо использование специфического для данного процесса графика техобслуживания, который не предусматривает адаптацию к каждой отдельной единице оборудования, например, учета того, как стареет данное оборудование или его реакции на изменение рабочих циклов из-за использования для различных типов работ или наличие большого числа датчиков, отслеживающих состояние оборудования. Кроме того, обнаружение аномального состояния отдельной единицы оборудования иногда заключается просто в установлении наличия или отсутствия данной единицы оборудования. Однако такое обнаружение не позволяет осуществлять учет взаимодействия между единицами оборудования и формирование картины, отражающей бесперебойное функционирование производственного процесса в целом. Поэтому необходима разработка и проведение мероприятий, позволяющих сократить время простоя оборудования, зависящее не только от времени проведения ремонта, но и от наличия запасных частей.

1. Управление объемом заказа запасных частей

Оптимизация стратегий профилактического обслуживания и заказа запасных частей для современного производственного оборудования является чрезвычайно важной задачей, поскольку она существенно влияет на надежность работы оборудования. Кроме того, управление запасными частями может составлять значительную часть эксплуатационных расходов предприятия, поэтому проблема оптимизации запасов оказывает непосредственное влияние на снижение эксплуатационных расходов, что делает ее значимым направлением исследований [3–6].

Управление запасными частями сводится, как правило, к решению двух задач:

1) управление логистикой или цепочками поставок запасных частей;

2) оптимизация складских запасов.

Решение первой задачи сводится к сокращению времени ожидания, при этом отмечается, что главной проблемой является неопределенность в отношении качества, сроков и объема запасных частей и необходимо создание такого управления, чтобы свести к минимуму негативное влияние задержек и сбоев поставок на производство [6].

Вторая задача затрагивает широкий профиль проблем в управлении запасами запчастей. Здесь следует отметить сложность в точной оценке спроса на запчасти и в определении оптимального количества запчастей, хранящихся на складе [7, 8], кроме того, учитывается и влияние экономической составляющей хранения запасных частей [9].

Перечисленные выше особенности требуют создания автоматизированной системы, позволяющей с наибольшей эффективностью и скоростью проводить технические обслуживания и ремонты, тем самым снижая финансовые затраты и потери от простоя производства.

Исследования в области управления запасами запасных частей в основном сводятся к вероятностным методам и составлению математических моделей для решения оптимизационных задач, при этом в

большинстве случаев решаются задачи минимизации затрат по различным критериям [3, 6, 7, 9, 10, 11, 12]. Например, авторы [6] представляют целевую функцию в общем виде

$$TC = TC_1 + TC_2 + TC_3 + TC_4 \rightarrow \min,$$

где TC – общая стоимость, TC_1 – стоимость установки, TC_2 – общая стоимость хранения, TC_3 – общая стоимость обратного заказа, TC_4 – общая стоимость потерянных продаж.

Аналогичным образом рассматривается целевая функция в работах [9, 12]. При этом приведенные стоимости представляют собой сложные зависимости и учитывают влияние большого перечня параметров – размер партии заказа запасных частей, размер партии заказа на восстановление запасных частей в цикле, время цикла заказа запасных частей производителем, период восстановления запасных частей во время сбоя в цикле, стоимость хранения единицы запасных частей, коэффициент сбора запасных частей, коэффициент спроса на запасные части, размера производственного участка в исходном графике, периода отказа, стоимости обратного заказа на единицу продукции в единицу времени, стоимости наладки повторного производства, восстановления для партии повторного производства в цикле, периода восстановления в цикле восстановления, количества циклов восстановления и др.

С другой стороны, в целевой функции могут учитываться также и временные характеристики. В [13] при минимизации затрат учитывается стоимость единицы времени простоя объекта, среднее время амортизации запасного объекта, в [10] оптимизируются затраты в единицу времени, в [3, 14] – время заказа и период пополнения склада.

Также решаются задачи по определению оптимального размера партии запасных частей и по предельному запасу [14, 15]:

$$S_1 = \sqrt{\frac{2\mu g}{S}};$$

$$q^* = \sqrt{2C_0 D},$$

где S_1 – оптимальный предельный запас, когда дефицит запчастей не допускается; μ – постоянство интенсивности спроса запчастей в единицу времени; g – фиксированные издержки; S – переменный запас; q^* – размер партии запасных частей; C_0 – суммарные затраты; D – параметр модели.

В работе [16] описан подход с точки зрения минимизации риска принятия неверного решения, учитывающего стоимость плановых и неплановых заказов, стоимость хранения и обслуживания детали на складе, стоимость нахождения машины в неработоспособном состоянии.

Применение вероятностных методов для управления запасными частями может сводиться к нахождению вероятностей возникновения дефицита деталей [17], вероятности спроса в случае отказа [8, 18], вероятности состояний оборудования [13], вероятности отказов [15, 19], либо к нахождению рисков [5]. В таких исследованиях все решения принимаются на основе количественной оценки вероятности событий, однако точность принятых решений напрямую зависит от количества накопленной статистической информации, кроме того, вероятностные модели представляют собой еще более сложные математические зависимости.

Приведенные выше способы управления запасными частями основываются на достаточно сложных математических подходах и требуют наличия большого объема информации в качестве исходных данных, поэтому возникает необходимость в разработке подхода, не требующего сложных вычислительных мощностей, учитывающего неопределенность информации и позволяющего снизить простои производственных мощностей из-за отсутствия запасного комплекта оборудования. Такой подход описан в [20].

2. Определение необходимых запасных единиц оборудования

Целью применения предложенного подхода является сокращение времени простоя при ремонте оборудования, и, как следствие, сокращение ущербов от простоя, выражающихся в недоборах нефти, недовыпусках продукции и т.п. Подход заключается в определении точечных оценок вероятностей отказа, оценочных значений наработки на начало и конец периода заказа оборудования, прогнозной функции распределения наработки до отказа объектов и на ее основе определения количества необходимых к закупке запасных единиц оборудования. При применении такого способа важно не оптимальное определение количества запасных объектов, а сведение к минимуму простоя оборудования. Стоит отметить, что такое определение необходимого количества запасных единиц оборудования учитывает только невосстанавливаемые объекты, которые при выходе из строя будут заменяться на новые.

Рассмотрим совокупность однотипных невосстанавливаемых объектов. Для таких объектов при наличии данных наблюдений об отказах (данные эксплуатации, обратной связи) для n невосстанавливаемых объектов из однородной совокупности точечная оценка вероятности безотказной работы $\hat{R}(t_i)$ согласно [21] определится как отношение количества объектов $n_s(t)$, функционирующих в момент времени t_i, к общему числу объектов n:

$$\hat{R}(t_i) = \frac{n_s(t_i)}{n},$$

где $n_s(t_i)$ – количество невосстанавливаемых объектов, которые функционируют в момент времени t_i, n – общее количество элементов в однотипной совокупности.

Тогда точечная оценка вероятности отказа $\hat{F}(t_i)$ в момент времени t_i определится

$$\hat{F}(t_i) = 1 - \hat{R}(t_i) = 1 - \frac{n_s(t_i)}{n}.$$

Общее количество элементов в однотипной совокупности будет являться суммой количества отказавших к моменту времени t_i объектов $n_{отк}(t_i)$ и количества функционирующих в момент времени t_i объектов $n_s(t_i)$:

$$n = n_{отк}(t_i) + n_s(t_i).$$

Тогда точечная оценка вероятности отказа для одного объекта в момент времени t_i будет равна

$$\hat{F}_i(t_i) = \frac{n_{отк}(t_i)}{n_{отк}(t_i) + n_s(t_i)}. \quad (1)$$

Исходя из точечных оценок вероятностей отказов, вычисленных для каждого объекта, выбирается вид функции распределения, для которой будут определяться оценки параметров распределения и рассчитываться прогнозное значение функции распределения наработки до отказа каждого объекта. Наиболее применяемыми функциями при определении отказов являются нормальное распределение, логарифмически нормальное распределение, экспоненциальное распределение и распределение Вейбулла [22]. В зависимости от выбранного вида функции оценки параметров распределения будут варьироваться.

Если за рассматриваемый период происходит только один отказ, то оценки параметров находятся один раз в этот момент отказа и остаются неизменными, однако при каждом последующем отказе необходимо заново рассчитать точечные оценки вероятности отказов объектов и уточнить (заново определить) значения оценок параметров распределения. Учитывая, что при каждом новом отказе будет произведен перерасчет оценок параметров распределения, значения или прогнозной функции распределения также необходимо будет пересчитать. В частности, для логнормального распределения прогнозная функция распределения $F(t)$ наработки t до отказа запишется в виде

$$F(t) = \int_{T_1}^{T_2} f(t, \mu, \sigma)\, dt =$$

$$= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt, \quad (2)$$

где μ, σ – оценки параметров распределения при логнормальном распределении, t – время работы оборудования.

За времена T_1 и T_2 в формуле (2) предлагается принимать оценочные значения наработок на начало $T_{ij}^{нач}$ и конец $T_{ij}^{кон}$ текущего периода заказа запасных единиц объектов для каждого объекта. Текущий период заказа обозначается порядковым номером j, где в качестве первого периода брать дату введения совокупности однотипных объектов в эксплуатацию. Конец периода зависит от числа дней r между регламентными заказами объектов. В качестве r может быть заявлен любой предполагаемый срок, который предприятие использует для формирования заказа на запасные объекты, и этот срок может варьироваться по требованиям предприятия. Оценочные значения наработок на начало $T_{ij}^{нач}$ и конец $T_{ij}^{кон}$ текущего периода заказа отражают предполагаемую наработку в часах или днях каждого работающего объекта совокупности при отказе одного из них. На текущий момент времени t, в который происходит отказ одного из объектов совокупности, оценочные значения наработок на начало $T_{ij}^{нач}$ и конец $T_{ij}^{кон}$ определятся:

$$T_{ij}^{нач} = \frac{t_i}{T_k} \cdot r \cdot (j-1); \quad (3)$$

$$T_{ij}^{кон} = \frac{t_i}{T_k} \cdot r \cdot j, \quad (4)$$

где t_i – наработка i-м техническим объектом на текущий момент события отказа, сут.; T_k – число дней эксплуатации отказавшего k-го технического объекта; r – число дней между регламентными заказами объектов; j – номер периода поставки запасных единиц объектов.

Полученные значения $T_{ij}^{нач}$ и $T_{ij}^{кон}$ необходимы для определения прогнозных значений функции распределения наработки до отказа $F_{ij}(t_i)$ в конце текущего периода поставки по формуле (2):

$$F_{ij}(t_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{T_{ij}^{кон}}^{T_{ij}^{нач}} \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt. \quad (5)$$

Значение функции распределения наработки до отказа объекта говорит о вероятности выхода из строя этого объекта, при этом каждое значение вероятности говорит о выходе из строя только одного объекта, то есть в худшем случае для каждого объекта совокупности эта вероятность может быть равна единице, тогда в регламентный заказ придется заказать ровно столько объектов, сколько было введено в эксплуатацию изначально. В общем случае вероятности выхода из строя объекта могут принимать значения от 0 до 1 включительно, поэтому объем заказа партии запасных объектов можно определить через сумму этих вероятностей, так как в таком случае будут учтены объекты как с большой вероятностью отказа, так и с малой. Учитывая вышеизложенное объем заказа партии запасных объектов определится следующим образом

$$N_j = \sum_{i=1}^{n} F_{ij}(t_i), \quad (6)$$

где N_j – объем заказа запасных единиц оборудования; n – количество эксплуатируемых однотипных единиц оборудования, j – номер периода заказа.

Табл. 1. Статистика остановки скважин за 2010-2015 гг.

Скважина	Первый запуск			Второй запуск			Третий запуск		
	Дата пуска скважины	Дата остановки скважины	Наработка, суток	Дата пуска скважины	Дата остановки скважины	Наработка, суток	Дата пуска скважины	Дата остановки скважины	Наработка, суток
259	28.08.10	28.12.10	122	24.11.11	30.11.11	6	27.06.13	28.11.15	884
295	20.02.10	11.04.11	415	21.05.11	08.07.13	779	15.07.13	31.07.15	746
317	08.10.10	27.06.11	262	30.07.11	08.09.11	40	18.07.12	25.09.12	69
118	09.01.10	16.10.11	645						
93	08.05.10	31.10.11	541	04.11.11	07.11.11	3	16.01.12	09.07.12	175
261	18.12.10	11.11.11	328	25.05.14	27.05.14	2	27.03.15	03.10.15	190
241	10.05.10	28.12.11	597						
279	07.04.10	14.01.12	647	19.01.12	27.03.13	433			
98	13.05.10	12.02.12	640						
414	26.04.10	29.06.12	795						
601	16.07.10	03.07.12	718						
225	30.05.10	06.07.12	768	08.07.12	26.09.14	810			
572	17.01.10	12.07.12	907	27.10.12	19.12.12	53			
537	29.03.10	26.07.12	850						
221	15.11.10	02.12.12	748						
599	18.08.10	21.12.12	856	21.06.13	13.11.19	2336			
356	16.03.10	04.06.14	1541						
646	12.02.10	13.02.15	1827						

Полученная величина может иметь дробное значение, поэтому для формирования объема поставки партии запасных объектов ее необходимо округлить в сторону ближайшего большего целого.

Применение предложенного подхода проиллюстрировано расчетами количества необходимых единиц погружных электродвигателей для одного из месторождений нефти в Пермском крае. Двигатели мощностью 32 кВт рассчитаны на напряжение 1000 В и используются на нефтяных скважинах, оборудованных установками электроцентробежных насосов. Для этого использовалась выборка данных за 2010–2015 гг. по вы-

Табл. 2. Расчет количества необходимых запасных двигателей в первый период поставки

Скважина	Наработка t_i, сут.	Точечные оценки функции распределения наработки до отказа для каждого объекта, $\hat{F}_i(t_i)$	Оценочное значение наработки на конец текущего периода заказа $T_i^{кон}$, сут.	Прогнозная функция распределения наработки до отказа каждой единицы оборудования на текущий период заказа, F_{ij}
1	*2*	*3*	*4*	*5*
261	10	0,0000	29,92	$2{,}04\cdot10^{-13}$
221	43	0,0000	128,65	0,0009
317	81	0,0000	242,34	0,0895
259	122	0,0667	365,00	0,4259
599	132	0,0667	394,92	0,5143
601	165	0,0714	493,65	0,7473
225	212	0,0769	634,26	0,9153
98	229	0,0833	685,12	0,9443
241	232	0,0909	694,10	0,9483
93	234	0,1000	700,08	0,9508
414	246	0,1111	735,98	0,9636
279	265	0,1250	792,83	0,9775
537	274	0,1429	819,75	0,9821
356	287	0,1667	858,65	0,9871
295	311	0,2000	930,45	0,9930
646	319	0,2500	954,39	0,9943
572	345	0,3333	1032,17	0,9970
118	353	0,5000	1056,11	0,9976

ходам из строя двигателей такого типа на 18 скважинах. В данной выборке на конец 2010 года все двигатели уже были введены в работу (табл. 1).

За указанный период некоторые из скважин были остановлены несколько раз, что отмечено в табл. 1 (первый, второй, третий запуски). Этот факт учитывался в расчетах заменой даты ввода в эксплуатацию и пересчетом количества дней наработки.

За период заказа запасных единиц принимался один год (r = 365 суток) и для удобства расчетов принято, что заказ осуществляется в конце года. Следует отметить, что предлагаемый подход не ограничивает выбор дней периода между заказами и даты заказов запасных частей.

В отличие от предложенной в [20] методики, где предполагается одновременный ввод однотипных объектов в эксплуатацию, что в действительности маловероятно, предлагается учесть различные сроки ввода оборудования в эксплуатацию. Кроме того, часто происходят расширения или сокращения производственных мощностей, а, следовательно, и количество однотипных объектов будет всегда варьироваться во времени. Учесть такие изменения возможно расширением или сокращением выборки объектов.

Ввод объектов в эксплуатацию производился в течение всего 2010 года, поэтому первой датой поставки запасных двигателей будет считаться конец 2010 года, соответственно весь 2010 год будет являться первым периодом заказа (j = 1). Учитывая, что первый отказ двигателя из выборки произошел 28 декабря 2010 г., произведем расчет количества запасных двигателей на эту дату при выходе из строя двигателя на скважине 259.

Используя данные табл. 1, по формулам (1), (3) и (4) определим значения наработок каждого двигателя из выборки к дате выхода из строя двигателя на скважине 259, точечные оценки функции распределения наработки до отказа для каждого объекта $\hat{F}_i\left(t_i\right)$ в эту дату, оценочные значения наработок на начало $T_{ij}^{нач}$ и конец $T_{ij}^{кон}$ первого периода заказа и сведем в табл. 2. Порядок скважин в табл. 2 выстроен по возрастанию дней наработки двигателей на скважинах к дате отказа двигателя на скважине 259.

Согласно табл. 1, наработка на отказ для двигателя скважины 259 составила 122 суток, для остальных скважин значения наработок t_i вычислялись как разница в сутках между днем введения в эксплуатацию и днем выхода из строя двигателя скважины 259. Оценочное значение наработки на начало текущего периода приравнивается к нулю для первого периода поставки запасных экземпляров (j = 1, $T_{ij}^{нач}$ = 0). Для поиска оценок параметров распределения было выбрано логарифмически нормальное распределение. Оценки параметров распределения были найдены с помощью оператора нахождения решений *Minerr* ПО *MathCad*. Такой метод позволяет найти приближенные решения системы уравнений, приводящие к минимальной ошибке, и позволяет говорить об эффективности найденных оценок параметров распределения, так как оценки параметров в данном случае имеют наименьшую возможную дисперсию [23]. Оценки параметров распределения получились равными μ = 5,966, σ = 0,354. С учетом найденных оценок параметров распределения прогнозная функция распределения наработки до отказа каждой единицы оборудования на текущий период заказа согласно формуле (5) будет иметь вид

$$F_{ij}\left(t_i\right)=\frac{1}{0,354\cdot\sqrt{2\pi}}\int_0^{T_{ij}^{кон}}\frac{1}{t}\exp\left[-\frac{\left(\ln t-5,966\right)^2}{2\cdot 0,354^2}\right]dt.$$

Рассчитанные для каждого двигателя значения прогнозной функции распределения наработки до отказа занесены в столбец 5 (см. табл. 2). Складывая все полученные значения согласно (6) и округляя результат в большую сторону до целого, получаем необходимое количество запасных единиц оборудования на конец первого периода – N_1 = 14 штук.

Аналогичным образом было рассчитано количество запасных частей на конец второго N_2 и третьего N_3 периода поставки: для конца второго периода количество необходимых к закупке двигателей составило N_2 = 10 единиц, на конец третьего – N_3 = 5.

Стоит отметить, что согласно данным табл. 1, за второй период эксплуатации (за 2011 г.) вышло из строя 9 единиц (двигатели на скважинах 317, 93 – дважды, на скважинах 259, 295, 118, 261, 241 – один раз). При заказанных N_1 = 14 осталось $N_{ост1}$ = 14 – 9 = 5 двигателей неиспользованными. В третьем периоде (за 2012 г.) вышло из строя 12 двигателей (на скважинах 279, 98, 414, 601, 225, 537, 221, 599, 317, 93 – один раз, на скважине 572 – дважды). Расчет показал необходимость в заказе N_2 = 10 единиц, однако с учетом оставшихся 5 единиц из первого заказа количество запасных единиц оказалось достаточным, три двигателя осталось в запасе на следующий год $N_{ост2}$ = 5 + 10 – 12 = 3. Учитывая, что скважины переводили на другие параметры добычи, и, как следствие, происходила смена типоразмера двигателей и насосов и такие двигатели уже не могли учитываться в общем расчете однотипных единиц оборудования, для последующих периодов заказа партий запасных двигателей (2013–2015 гг.) расчетное количество запасных единиц и выходов из строя заметно снизилось.

Заключение

В работе были проанализированы методы управления объемом заказа запасных частей. Анализ показал, что зачастую для наиболее точной оценки необходимого количества запасных частей требуется большой объем статистических данных о работе оборудования и сложный математических аппарат для их обработки, поэтому был предложен подход, не требующий большого объема информации и сложной обработки данных. Однако применение предлагаемой методики возможно

только для групп однотипных объектов, которые могут быть взаимозаменяемы. Для определения количества запасных частей собираются данные о наработках однотипных объектов. По количеству дней наработок для каждого объекта определяется точечная оценка вероятности отказа, оценочные значения наработки на начало и конец текущего периода заказа для каждого объекта. Определены оценки параметров прогнозной функции распределения и рассчитаны значения этой функции для каждой единицы оборудования с учетом оценочных значений наработки на начало и конец текущего периода заказа, что позволило в итоге определить количество единиц оборудования, необходимых к заказу в следующую поставку оборудования. Предлагаемая методика может использоваться как самостоятельный инструмент планирования закупок запасных частей и оборудования или в качестве первой ступени в системах предиктивной аналитики по управлению техническим обслуживанием и ремонтом оборудования.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства РФ от 7 ноября 2023 года №3113-р Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://static.government.ru/media/files/OwFdjc3nMWk3BqAUbjqdJImPl3NxqRIS.pdf (дата обращения: 18.09.2023).

2. Федеральная служба государственной статистики. Официальная статистика. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/science (дата обращения: 18.09.2023).

3. He Y., Gao Z. Joint Optimization of Preventive Maintenance and Spare Parts Ordering Considering Imperfect Detection // Systems 2023, 11, 445. DOI: 10.3390/systems11090445

4. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review // Sustainability 2021, 13, 2460. DOI: 10.3390/su13052460

5. Durán O., Afonso P., Jiménez V. et al. Cost of Ownership of Spare Parts under Uncertainty: Integrating Reliability and Costs // Mathematics 2023, 11, 3316. DOI: 10.3390/math11153316

6. Mat Ropi N., Hishamuddin H., Wahab D.A. et al. Optimal Lot-Sizing Decisions for a Remanufacturing Production System under Spare Parts Supply Disruption // Mathematics. 2023. Vol. 11. P. 4053. DOI: 10.3390/math11194053

7. Pacheco-Velázquez E.A., Robles-Cárdenas M., Juárez Ordóñez S. et al. A Heuristic Model for Spare Parts Stocking Based on Markov Chains // Mathematics. 2023. Vol. 11. P. 3550. DOI: 10.3390/math11163550

8. Makarova I., Buyvol P., Gabsalikhova L. et al. Decision Making under Conditions of Uncertainty and Risk in the Formation of Warehouse Stock of an Automotive Service Enterprise // Algorithms. 2023. Vol. 16. P. 388. DOI: 10.3390/a16080388

9. Barriere C., Alberto M. Determining Inventory Base Stock Levels of Expendable Spare Parts Under Service Level Agreement for On-Time Delivery [Электронный ресурс] URL: http://hdl.handle.net/11244/45153 (дата обращения: 10.10.2023).

10. Саливоник А.В. Методика расчета оптимальной поставки многономенклатурного комплекта запасных частей // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 14. С. 46-49.

11. Паньковский Б.Е. Адаптированная методика многокритеральной оптимизации для комплектов запасных частей и инструментов // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, Москва, 18–28 февраля 2019 года. М.: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2019. С. 85-86.

12. Guo Y., Shi Q., Guo C. Multi-Period Spare Parts Supply Chain Network Optimization under (T, s, S) Inventory Control Policy with Improved Dynamic Particle Swarm Optimization // Electronics. 2022. Vol. 11. P. 3454. DOI: 10.3390/electronics11213454

13. Херсонский Н.С., Большедворская Л.Г. Определение необходимого количества запасных частей для поддержания работоспособности приборов // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 3. С. 6-21. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_3_6

14. Керимов М.А. Вероятностная модель управления запасами запасных частей на предприятиях АПК // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции: в 2-х томах, Санкт-Петербург, 29–30 июня 2017 года. Vol. 2. С-Пб: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2017. С. 346-352.

15. Булатов С.В. Повышение эффективности управления запасными частями на автотранспортном предприятии при наличии страхового запаса // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 9(106). С. 43-48. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-43-48

16. Оптимизация заказа запасных частей на автотранспортных предприятиях / И.Ф. Воронина, Ф.М. Судак, В.С. Перов [и др.] // Вести Автомобильно-дорожного института. 2021. № 1(36). С. 50-55.

17. Зарницин В.П., Чернышев В.Л. Определение показателей достаточности запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) комплексов вооружения // Известия ТРТУ. 2004. № 8(43). С. 307-309.

18. Patriarca R., Hu T., Costantino F. et al. A System-Approach for Recoverable Spare Parts Management Using the Discrete Weibull Distribution // Sustainability. 2019. Vol. 11. P. 5180. DOI: 10.3390/su11195180

19. Чепурко В.А., Черняев А.Н. Методика оценки объема ЗИП с неснижаемым уровнем // Надежность. 2021. Т. 21. № 3. С. 13-19. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-3-13-19

20. Патент № 2782634 C1 Российская Федерация, МПК G01M 15/00. Способ определения количества выходящих из строя объектов с использованием данных о наработках эксплуатируемых технических объектов: № 2021133800: заявл. 19.11.2021: опубл. 31.10.2022 / А. Б. Петроченков, С. В. Бочкарев, М. В. Овсянников [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

21. ГОСТ Р 27.010-2019 Надежность в технике. Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтопригодности. М.: Стандартинформ, 2019. 80 с.

22. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

23. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. 8-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2002. 479 с.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated November 7, 2023 No. 3113-r. Strategic direction of the digital transformation of processing industries within the responsibility of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. (accessed 09.18.2023). Available at: http://static.government.ru/media/files/OwFdjc3nMWk3BqAUbjqdJImPl3NxqRIS.pdf. (in Russ.)

2. Federal State Statistics Service. Official statistics. (accessed 09.18.2023). Available at: https://rosstat.gov.ru/statistics/science. (in Russ.)

3. He Y., Gao Z. Joint Optimization of Preventive Maintenance and Spare Parts Ordering Considering Imperfect Detection. *Systems* 2023;11:445. DOI: 10.3390/systems11090445.

4. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review. *Sustainability* 2021;13:2460. DOI: 10.3390/su13052460.

5. Durán O., Afonso P., Jiménez V. et al. Cost of Ownership of Spare Parts under Uncertainty: Integrating Reliability and Costs. *Mathematics* 2023;11:3316. DOI: 10.3390/math11153316.

6. Mat Ropi N., Hishamuddin H., Wahab D.A. et al. Optimal Lot-Sizing Decisions for a Remanufacturing Production System under Spare Parts Supply Disruption. *Mathematics* 2023;11:4053. DOI: 10.3390/math11194053.

7. Pacheco-Velázquez E.A., Robles-Cárdenas M., Juárez Ordóñez S. et al. A Heuristic Model for Spare Parts Stocking Based on Markov Chains. *Mathematics* 2023;11:3550. DOI: 10.3390/math11163550.

8. Makarova I., Buyvol P., Gabsalikhova L. et al. Decision Making under Conditions of Uncertainty and Risk in the Formation of Warehouse Stock of an Automotive Service Enterprise. *Algorithms* 2023;16:388. DOI: 10.3390/a16080388.

9. Barriere C., Alberto M. Determining Inventory Base Stock Levels of Expendable Spare Parts Under Service Level Agreement for On-Time Delivery. (accessed 10.10.2023). Available at: http://hdl.handle.net/11244/45153.

10. Salivonik A.V. [The methodology for calculating the optimal supply of a multiproduct set of spare parts]. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa* 2006;14:46-49. (in Russ.)

11. Pankovsky B.E. [Adapted multicriteral optimisation technique for sets of spare parts and tools]. In: Proceedings of the E.V. Armensky Interuniversity Science and Engineering Conference of Students, Postgraduates, and Young Specialists; Moscow; February 18-28, 2019. Moscow: HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; 2019. P. 85-86. (in Russ.)

12. Guo Y., Shi Q., Guo C. Multi-Period Spare Parts Supply Chain Network Optimization under (T, s, S) Inventory Control Policy with Improved Dynamic Particle Swarm Optimization. *Electronics* 2022;11:3454. DOI: 10.3390/electronics11213454.

13. Khersonsky N.S., Bolshedvorskaya L.G. Determination of the necessary quantity of spare parts to maintain the performance of devices. *Crede Experto: transport, society, education, language* 2023;3:6-21. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_3_6. (in Russ.)

14. Kerimov M.A. [A probabilistic model of spare parts inventory management at agricultural enterprises]. In: [Systems analysis in design and management: proceedings the XXI International Science and Practice Conference: in 2 volumes]; St. Petersburg; June 29-30, 2017. Vol. 2. Saint Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2017. P. 346-352. (in Russ.)

15. Bulatov S.V. Improvement of the efficiency of duplicates at a motor transport enterprise if an insurance reserve is available. *Bulletin of Bryansk State Technical University* 2021;9(106):43-48. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-43-48. (in Russ.)

16. Voronina I.F., Sudak F.M., Chubuchnyi S.A., Perov V.S. et al. Improvement of the Prediction Technique for the Car Service Market. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute* 2021;1(36):50-55. (in Russ.)

17. Zarnitsin V.P., Chernyshev V.L. [Defining the sufficiency indicators of spare parts, tools, and accessories of weapons systems]. *Izvestia TRTU* 2004;8(43):307-309. (in Russ.)

18. Patriarca R., Hu T., Costantino F. et al. A System-Approach for Recoverable Spare Parts Management Using the Discrete Weibull Distribution. *Sustainability* 2019;11:5180. DOI: 10.3390/su11195180.

19. Chepurko V.A., Chernyaev A.N. Method of estimating the size of an SPTA with a safety stock. *Dependability* 2021;21(3):13-19. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-13-19.

20. Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Ovsyannikov M.V. et al. Patent No. 2782634 C1 Russian Federation, IPC G01M 15/00. [A method for determining the number of failing items using data on the times-to-failure of technological facilities in operation]: No. 2021133800: application 19.11.2021: publ. 31.10.2022; the applicant is the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Perm National Research Polytechnic University.

21. GOST R 27.010-2019. Dependability in technics. Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability measures; 2019. (in Russ.)

22. Kobzar A.I. [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: FIZMATLIT; 2006. (in Russ.)

23. Gmurman V.E. [Probability theory and mathematical statistics: Textbook for higher educational institutions. 8-th edition]. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. (in Russ.)

Сведения об авторах

Лейзгольд Карина Анатольевна – старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, ул. Профессора Поздеева, д.7, г. Пермь, Российская Федерация, 614013, e-mail: leizgold_ka@pstu.ru.

Бочкарев Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, ул. Профессора Поздеева, д.7, г. Пермь, Российская Федерация, 614013, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru.

About the authors

Karina A. Leyzgold, Senior Lecturer, Department of Microprocessor Means of Automation, Perm National Research Polytechnic University, 7 Professora Pozdeeva Street, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: leizgold_ka@pstu.ru.

Sergey V. Bochkarev, Doctor of Engineering, Professor, Department of Microprocessor Means of Automation, Perm National Research Polytechnic University, 7 Professora Pozdeeva Street, Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru.

Вклад авторов в статью

Лейзгольд К.А. – выполнила анализ и обзор публикаций по теме исследования, разработала методику определения количества необходимых запасных частей в условиях ограниченного объема данных, провела математическую обработку данных.

Бочкарев С.В. – выполнил постановку задачи исследования, разработал методику определения количества необходимых запасных частей в условиях ограниченного объема данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов