

Известия вузов. Строительство. 2021. № 9. С. 58–69.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (9): 58–69.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 696.117.004

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-753-9-58-69

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВОДОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Александр Петрович Свинцов, Вячеслав Андреевич Фоминов
Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

Аннотация. Надежность водопроводной арматуры (смесители и краны для умывальников, раковин, ванн, душа) и своевременное устранение ее отказов составляют основу эффективного функционирования внутреннего водопровода. В процессе эксплуатации детали арматуры подвержены техническому износу вследствие истирания, смятия, усталости элементов различной прочности. В рамках исследования разработана вероятностная математическая модель оценки потребности в запасных деталях, необходимых для обеспечения стабильной работы водопроводной арматуры. Это позволит разрабатывать эффективную стратегию организации обслуживания систем внутреннего водоснабжения зданий.

Ключевые слова: вероятностная математическая модель, водоснабжение, водопроводная арматура, надежность

Благодарности: публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Для цитирования: Свинцов А.П., Фоминов В.А. Оценка надежности водопроводной арматуры в эксплуатационных условиях // Известия вузов. Строительство. 2021. № 9. С. 58–69. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-753-9-58-69.

Original article

ASSESSMENT OF WATER FITTINGS RELIABILITY IN OPERATIONAL CONDITIONS

Alexandr P. Svintsov, Vyacheslav A. Fominov
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Abstract. Reliability of water fittings (faucets and taps for washbasins, hand basins, sinks, bathtubs, showers) and timely elimination of its failures is the basis for the effective functioning of the internal water supply. During operation, the parts are subject to technical wear due to abrasion, removal, fatigue of elements of various strengths. As a part of the study, a probabilistic mathematical model was developed to assess the need for spare parts necessary to ensure stable operation of water fittings. This makes it possible to develop an effective strategy for the organization of maintenance of internal water supply systems of buildings.

Keywords: probabilistic mathematical model, water supply, water fittings, reliability

Acknowledgments: the publication was carried out with the support of the Strategic Academic Leadership Program of the RUDN.

For citation: Svintsov A.P., Fominov V.A. Assessment of water fittings reliability in operational conditions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (9): 58–69. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-753-9-58-69.

1. Введение. Качество водопроводной арматуры играет важную роль в решении вопроса о снижении утечек воды в процессе эксплуатации зданий. Понимание причин возникновения и режимов отказов водопроводной арматуры, состоящей из большого количества используемых компонентов, необходимо для ее усовершенствования [1, 2]. На снижение эффективности использования арматуры оказывают влияние низкая регулирующая способность, нарушение герметичности, неплотность прилегания друг к другу рабочих поверхностей подвижного и неподвижного элементов запорной пары, возникновение или усиление кавитации, эрозия и коррозионные повреждения [3–5].

Применение водопроводной арматуры с водосберегающими характеристиками существенно влияет на удельные показатели водопотребления в жилых зданиях [1, 6]. Непредвиденные системные сбои неизбежны, в связи с этим для обеспечения стабильной работы водопроводной арматуры управляющие компании для ремонта неисправного оборудования должны иметь определенный запас деталей. В настоящее время предложение хорошего послепродажного обслуживания становится все более важной стратегией дифференциации среди конкурентов на бизнес-рынке.

Проблема с запасом комплектующих деталей состоит в том, чтобы решить, какие типы запасных деталей и в каких количествах необходимы сервисному инженеру для ожидаемого уровня обслуживания на месте ремонта. Компании обычно основывают свои запасы ремонтных деталей на опыте и практических ограничениях [7]. Потребности в запасных деталях зависят от случайного появления их поломок. Работы по оптимизации запасов ремонтных деталей включают совместное планирование и оптимизацию запасов запасных частей и персонала сервисного инженера [8, 9]. Несоответствие запасов запасных частей может привести к недопустимому простоям и потере дохода для клиентов и компаний-поставщиков [10–12].

Анализ результатов исследований многочисленных специалистов показывает, что вопросам водопотребления и водосбережения в жилых зданиях посвящены многие работы. Однако факторы надежности водопроводной арматуры недостаточно изучены. Методика расчета запаса комплектов ремонтных деталей для устранения отказов водопроводной арматуры в настоящее время не разработана. Цель данной работы: создание математической модели определения объема запаса ремонтных комплектов водопроводной арматуры, находящейся на обслуживании в управляющей компании.

2. Материалы и методы исследования. Исследования проводились на водопроводной арматуре вентильного типа двух конструкций: с головкой поршневого типа и с керамической запорной парой. Оценка технического состояния водопроводной арматуры в условиях эксплуатации выполнена на основе теории надежности.

Необходимая для анализа информация о повреждениях и неисправностях водопроводной арматуры получена из журналов регистрации заявок на ремонт. Данные записей этих журналов проанализированы за пятилетний период наблюдений (2015–2019 гг.). Фактическое количество установленной

водопроводной арматуры вентиляного типа определено методом анализа анкет. Анкеты с изображением различных типов водопроводной арматуры в виде пиктограмм были распространены в жилых зданиях через почтовые ящики. Они содержали просьбу отметить тип водопроводной арматуры, используемой в домохозяйстве, и опустить анкету в заранее подготовленный ящик.

Обработка данных выполнена по известным методикам математической статистики.

2.1. Вероятностная модель расчета запаса ремонтных деталей. Возникновение отказов водопроводной арматуры представляет собой марковский случайный процесс. В связи с этим запас ремонтных комплектов определяется по формуле

$$Z = N_i \lambda_i(t) t, \quad (1)$$

где N_i – количество водопроводной арматуры типа i , обслуживаемой управляющей компанией;

$\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов водопроводной арматуры типа i ;

t – время, на которое проектируется запас ремонтных деталей.

Представленная модель позволяет определять необходимый запас ремонтных деталей с учетом вероятности возникновения отказов водопроводной арматуры.

2.2. Вероятностная модель оценки адекватности запаса ремонтных комплектов. Модель оценки адекватности запаса ремонтных комплектов водопроводной арматуры основана на сравнении расчетных данных и фактических потребностей, имеющих вероятностный характер. Соответствие проектного запаса ремонтных комплектов фактическим потребностям определяется по формуле

$$k_a = 1 - \frac{|n(t) - n_d(t)|}{n(t)} \begin{cases} k_a \leq 1 \\ k_a \geq 0 \\ k_a \geq P_i(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где k_a – коэффициент адекватности запаса фактической потребности;

$n(t)$, $n_d(t)$ – фактическое количество отказов и проектный запас ремонтных комплектов или элементов водопроводной арматуры;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы водопроводной арматуры типа i .

Уточнение теории надежности водопроводной арматуры состоит в том, что количество ремонтных комплектов представляет собой ресурс повышения ее надежности. Это позволяет разрабатывать эффективную стратегию пополнения запаса ремонтных комплектов.

3. Результаты и обсуждение. Исследование выполнено на базе управляющей компании, ответственной за эксплуатацию систем водоснабжения 9 жилых домов с общим количеством 3231 квартира за период с 2015–2019 гг. Количество отказов водопроводной арматуры определено на основе анализа журналов регистрации заявок на обслуживание. Сбор данных и предварительный статистический анализ дали возможность установить, что наиболее востребованное обслуживание относится к смесителям (в целом) и к вентиляным головкам (как их деталям).

Водопроводная арматура вентиляного типа установлена в 3231 домохозяйстве. Фактическое количество смесителей составляет $N_{см}^* = 6462$, фактическое количество вентиляльных головок – $N_{вг}^* = 12\,924$.

Количество эксплуатируемых вентиляльных головок поршневого типа постепенно снижается. Экспертные оценки позволяют считать, что их число составляет в среднем не более 6 %. К исследованию принято, что количество вентиляльных головок поршневого типа на объекте исследования составляет $N_{п}^* = 775$. Вентильные головки с керамической запорной парой наиболее широко применяются в эксплуатации. Количество вентиляльных головок с керамической запорной парой $N_{к}^* = 12\,149$.

Эти данные использованы при оценке показателей надежности вентиляльных головок в соответствии с их типами.

3.1. Показатели надежности вентиляльных головок поршневого типа. Регулирующее действие вентиляльных головок поршневого типа с запорной парой «резина-металл» осуществляется за счет возвратно-поступательного перемещения штока. Открывание и закрывание проходного отверстия производится вращением рукоятки на два оборота. Вероятностная оценка технического состояния вентиляльных головок поршневого типа позволила выявить неравномерность возникновения отказов в течение календарного года. На рис. 1 представлена диаграмма изменения вероятности безотказной работы вентиляльных головок поршневого типа.

Неравномерность распределения вероятности безотказной работы вентиляльных головок характеризуется повторяемостью в одноименные месяцы разных лет. Средние значения за пять лет изменяются от $P_{мин}(t) = 0,851$ до $P_{макс}(t) = 0,915$. Диаграмма изменения имеет явно выраженный период

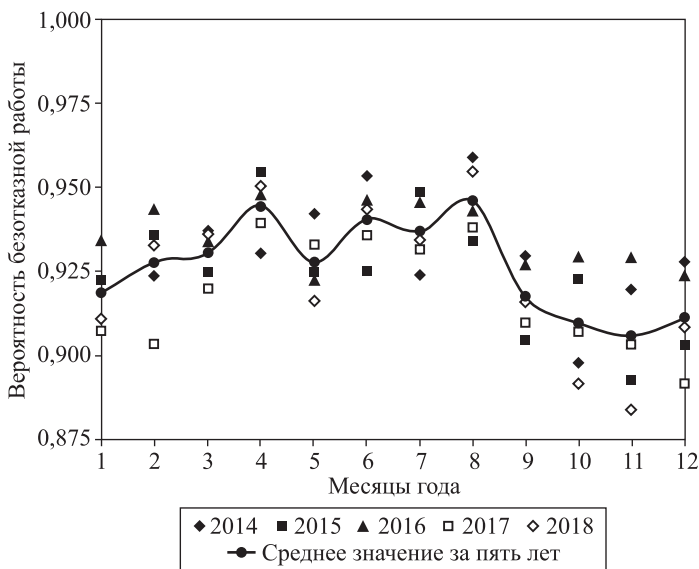


Рис. 1. Изменение вероятности безотказной работы вентиляльных головок поршневого типа

Fig. 1. Changing the probability of failure-free operation of piston-type valve heads

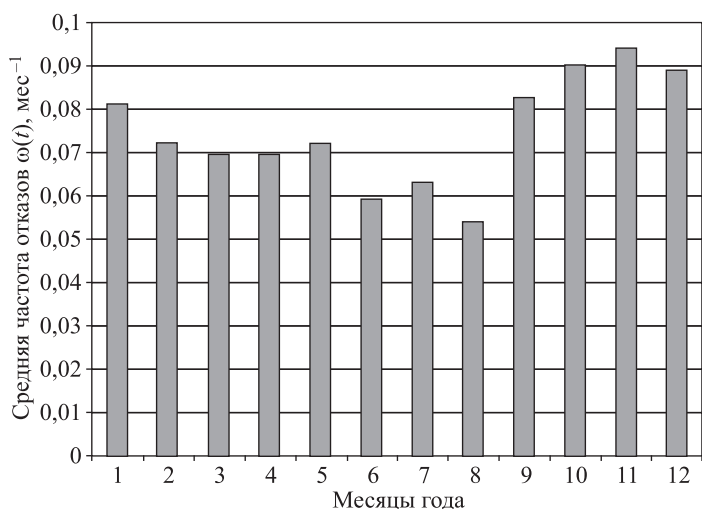


Рис. 2. Изменение средней частоты отказов вентиляных головок поршневого типа

Fig. 2. Change in the average failure rate of piston-type valve heads

максимальных значений. В летние месяцы от июня до августа вероятность безотказной работы выше в среднем на 5,3 %, чем в остальные месяцы года. Летом многие жители находятся в отъезде и не пользуются водопроводом своего домохозяйства. В связи с этим количество заявок на ремонт снижается. Изменение величины средней частоты отказов (рис. 2) также показывает, что в летние месяцы количество отказов водопроводной арматуры уменьшается.

В летние месяцы (июнь, июль и август) средняя частота отказов при $t = 3$ мес на 73,7 % меньше, чем в остальное время года. Среднее за год значение частоты отказов вентиляных головок поршневого типа $\omega_{\text{п}}^*(t) = 0,14 \text{ мес}^{-1}$ при $t = 12$ мес. Средняя продолжительность безотказной работы между ремонтами $t_{\text{п}}^{\text{ср}} = 7,7$ мес. В связи с тем, что устранение отказов вентиляных головок производилось в день поступления заявки, вероятность их восстановления $F_{\text{п}}^*(t) = 1$.

3.2. Показатели надежности вентиляных головок с керамическими запорными парами. Вентильные головки шайбового типа с керамической запорной парой широко применяются в системах водоснабжения зданий. Открывание, закрывание и регулирование потока производится вращением подвижной шайбы относительно неподвижной. Площадь проходного отверстия изменяется. Это приводит к изменению расхода воды и позволяет при необходимости его регулировать. При этом их некоторые технические особенности оказывают влияние на надежность в условиях эксплуатации. Оценка технического состояния вентиляных головок с керамическими запорными парами, выполненная на вероятностной основе, выявила неравномерность возникновения отказов в течение календарного года. На рис. 3 представлена диаграмма изменения вероятности безотказной работы вентиляных головок с керамической запорной парой.

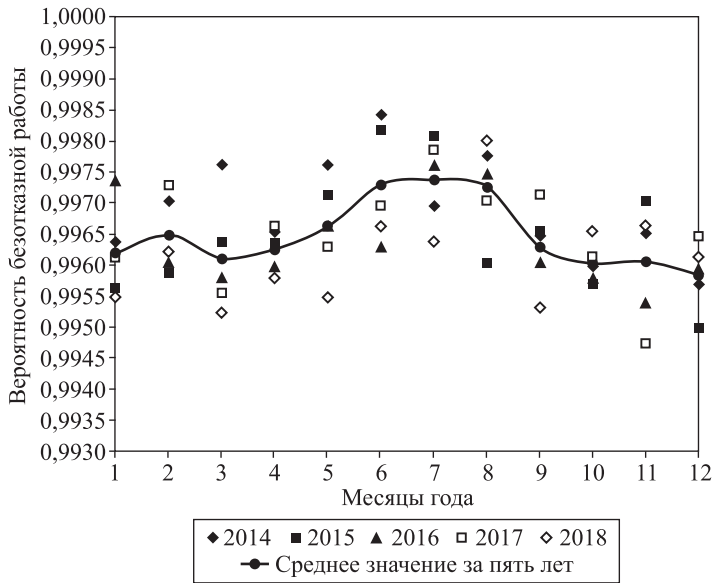


Рис. 3. Изменение вероятности безотказной работы вентиляционных головок с керамической запорной парой

Fig. 3. Changing the probability of trouble-free operation of valve heads with a ceramic shut-off pair

Вероятность безотказной работы вентиляционных головок с керамической запорной парой не одинакова в течение года. При этом амплитуда колебания повторяется в одноименные месяцы разных лет. Диаграмма изменения имеет явно выраженный период максимальных значений. Средние значения за пять лет изменяются от $P_{\min}(t) = 0,996$ до $P_{\max}(t) = 0,997$. В среднем за год вероятность безотказной работы $P_{\text{ср}}(t) = 0,9965$. В период от января до мая вероятность безотказной работы составляет в среднем $P_{\text{ср}}^{\text{I-V}} = 0,996$, от июня до августа $P_{\text{ср}}^{\text{VI-VIII}} = 0,997$. В период от сентября до декабря вероятность безотказной работы в среднем $P_{\text{ср}}^{\text{IX-XII}} = 0,996$.

В летние месяцы (от июня до августа) вероятность безотказной работы выше в среднем на 0,1 %. Это превышение можно принимать как незначительное, так как оно существенно ниже ошибки 5 % в планировании эксперимента. Превышение в летние месяцы обусловлено тем, что в этот период года многие жители находятся в отъезде и не пользуются водопроводом своего домохозяйства. Количество заявок на ремонт уменьшается, а расчетное значение вероятности безотказной работы арматуры увеличивается. Вентильные головки, отказавшие в процессе эксплуатации водопроводной арматуры за некоторый промежуток времени, заменяются на исправные. Этот процесс имеет формальное представление в виде средней частоты отказов $\omega_k^*(t)$, которая характеризует плотность распределения времени работы аппаратуры до ее отказа. На рис. 4 представлено распределение средней частоты отказов вентиляционных головок, которое также показывает, что летом количество отказов водопроводной арматуры уменьшается.

Среднее за год значение частоты отказов вентиляционных головок с керамической запорной парой $\omega_k^*(t) = 0,035 \text{ мес}^{-1}$ при $t = 12 \text{ мес}$. Средняя продолжительность безотказной работы между ремонтами $t_k^{\text{ср}} = 28,6 \text{ мес}$. В летние

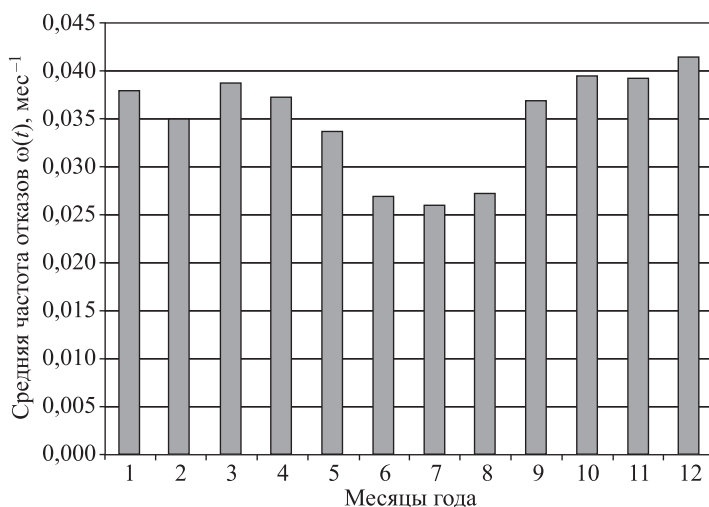


Рис. 4. Изменение средней частоты отказов вентиляных головок с керамической запорной парой

Fig. 4. Changing the average failure rate of valve heads with ceramic shut-off pair

месяцы средняя частота отказов на 73,3 % меньше чем в период от января до мая и на 68,1 % меньше чем от сентября до декабря. Устранение отказов вентиляных головок производилось в день поступления заявки, поэтому вероятность их восстановления $F_k^*(t) = 1$.

При проектировании и стендовых испытаниях водопроводной арматуры показатели надежности определяются в циклах «открыто-закрыто». Однако в эксплуатационных условиях установить количество циклов с приемлемой достоверностью не представляется возможным. Оценка промежутков между ремонтами определяется в сутках. В связи с этим при оценке надежности водопроводной арматуры основной единицей интенсивности отказов являются сутки в степени -1 . В табл. 1 представлены данные об интенсивности отказов водопроводной арматуры и ее элементов, полученные на основе анализа работы в эксплуатационных условиях.

Значения интенсивностей отказов определены с доверительной вероятностью $\delta = 0,95$. Данные таблицы могут быть использованы для составления

Таблица 1. Интенсивность отказов водопроводной арматуры в эксплуатационных условиях жилых зданий

Table 1. Failure rate of water fittings in the operational conditions of residential buildings

Арматура и ее элементы	Интенсивность отказов, сут		
	λ_{\min}	$\lambda_{\text{ср}}$	λ_{\max}
1	2	3	4
Вентильная головка поршневого типа:	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$6,26 \cdot 10^{-3}$
Резиновая прокладка запорной пары	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$4,50 \cdot 10^{-3}$
Посадочное седло запорной пары	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$
Уплотнительное кольцо шпинделя	$9,00 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Вентильная головка с керамической запорной парой:	$9,27 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$
Торцевой уплотнитель	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$
Рабочие поверхности запорной пары	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$
Уплотнительное кольцо шпинделя	$8,60 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$
Смеситель для мойки:	0,00	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
Уплотнительные кольца узла крепления излива к корпусу крана	0,00	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
Смеситель для умывальника и ванны:			
Узел крепления излива к корпусу	0,00	$3,10 \cdot 10^{-6}$	$8,30 \cdot 10^{-6}$
Уплотнительные кольца	0,00	$3,10 \cdot 10^{-6}$	$8,30 \cdot 10^{-6}$
Переключатель потока:	0,00	$3,88 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$
Клапан	0,00	$8,60 \cdot 10^{-7}$	$4,30 \cdot 10^{-6}$
Пробка	0,00	$7,90 \cdot 10^{-7}$	$3,90 \cdot 10^{-6}$
Золотник	0,00	$8,30 \cdot 10^{-7}$	$4,60 \cdot 10^{-6}$
Уплотнительные кольца	0,00	$1,40 \cdot 10^{-3}$	$4,10 \cdot 10^{-6}$
Гибкий шланг в металлической оплетке:	0,00	$7,91 \cdot 10^{-6}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$
Гибкая трубка шланга	0,00	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$
Металлическая оплетка гибкого шланга	0,00	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-6}$
Уплотнительная прокладка	0,00	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$
Уплотнительное кольцо	0,00	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$

прогнозов изменения состояния водопроводной арматуры в зависимости от условий эксплуатации.

3.3. Верификация модели определения необходимого запаса ремонтных комплектов. Устранение отказов водопроводной арматуры производится, как правило, в день поступления заявки на ремонт. Это связано с необходимостью стабильного функционирования системы жизнеобеспечения у потребителей водопроводной воды. Необходимое количество запаса ремонтных комплектов водопроводной арматуры определяется по формуле (1). В табл. 2 представлены данные о расчетных и фактических потребностях в ремонтных комплектах для вентильных головок поршневого типа на 2018 г. Вероятность безотказной работы водопроводной арматуры $P(t) = 0,873$.

Сравнение данных табл. 2 показывает, что количество запасных комплектов, определенное расчетом по вероятностной модели, наиболее адекватно соответствует фактическим потребностям. При этом среднее значение коэффициента адекватности $k_a = 0,935 > 0,873$. Запас ремонтных комплектов достаточен для обеспечения своевременного устранения отказов.

Запас ремонтных комплектов, принятый по среднему значению отказов за предыдущий период, почти в половине случаев (42 %) оказался на 22 % ниже потребности. Среднее значение коэффициента достаточности $k_a = 0,785 < 0,873$. Запас ремонтных комплектов, определенный по макси-

Таблица 2. Распределение потребностей в запасных ремонтных комплектах для вентильных головок поршневого типа в 2018 г.

Table 2. Distribution of needs for spare repair complexes for piston type valve heads in 2018

Месяц	Фактические значения	Расчетные значения	k_a	Средние значения за 2017 г.	k_a	Максимальные значения за 2017 г.	k_a
1	86	81	0,944	94	0,907	123	0,570
2	97	91	0,937	94	0,969	123	0,732
3	105	98	0,932	94	0,895	123	0,829
4	119	110	0,924	94	0,790	123	0,966
5	98	92	0,937	94	0,959	123	0,745
6	97	91	0,937	94	0,969	123	0,732
7	42	41	0,972	94	-0,238	123	-0,929
8	98	92	0,937	94	0,959	123	0,745
9	89	84	0,942	94	0,944	123	0,618
10	124	114	0,921	94	0,758	123	0,992
11	132	121	0,916	94	0,712	123	0,932
12	119	110	0,924	94	0,790	123	0,966
Средние значения			0,935		0,785		0,658

мальному количеству отказов за предыдущий период, гарантирует от их дефицита, но значительно превышает фактические потребности. Это подтверждается оценкой соответствия с использованием коэффициента достаточности $k_a = 0,658 < P = 0,873$.

Таким образом, запас ремонтных комплектов, рассчитанный по предложенной вероятностной модели, имеет наибольшее соответствие фактическим потребностям. Математическая модель оценки соответствия запаса фактическим потребностям валидна и позволяет давать количественную характеристику используемой модели расчета.

Вентильные головки с керамическими запорными парами более долговечны относительно износа рабочих поверхностей. Тем не менее вероятность отказа существует. Своевременное устранение возникающих отказов возможно при наличии достаточного запаса соответствующих ремонтных комплектов. В табл. 3 представлены расчетные и фактические данные потребности в ремонтных комплектах для вентильных головок с керамической запорной парой.

Анализ табл. 3 показывает, что расчет запаса керамических ремонтных комплектов по вероятностной модели полностью соответствует возникающей потребности. Оценка соответствия запаса фактическим потребностям по коэффициенту соответствия $k_a = 1,00 > P = 0,996$. Это значит, что вероятностная модель валидна. Определение запаса керамических ремонтных комплектов по среднему значению отказов за предыдущий период приводит к дефициту запасных частей в 50 % случаев. Соотношение коэффициента соответствия k_a и вероятности безотказной работы арматуры данного типа имеет

Таблица 3. Потребности в запасных комплектах для водопроводной арматуры с керамической запорной парой в 2018 г.

Table 3. Requirements for spare sets for water fittings with ceramic shut-off pair in 2018

Месяц	Фактические значения	Расчетные значения	k_a	Средние значения за 2017 г.	k_a	Максимальные значения за 2017 г.	k_a
1	55	55	1,0	47	0,855	58	0,945
2	46	46	1,0	47	0,978	58	0,739
3	58	58	1,0	47	0,810	58	1,000
4	51	51	1,0	47	0,922	58	0,863
5	55	55	1,0	47	0,855	58	0,945
6	41	41	1,0	47	0,854	58	0,585
7	44	44	1,0	47	0,932	58	0,682
8	24	24	1,0	47	0,042	58	-0,417
9	57	57	1,0	47	0,825	58	0,982
10	42	42	1,0	47	0,881	58	0,619
11	41	41	1,0	47	0,854	58	0,585
12	47	47	1,0	47	1,000	58	0,766
Средние значения			1,0		0,817		0,691

вид $k_a = 0,817 < P = 0,996$. Определение запаса керамических ремонтных комплектов по максимальному количеству отказов в предыдущий период приводит к их избытку в 75 % случаев. Соотношение значений коэффициента соответствия k_a и вероятности безотказной работы имеет вид $k_a = 0,691 < P = 0,996$.

Таким образом, вероятностная математическая модель расчета запаса ремонтных комплектов водопроводной арматуры вентильного типа позволяет определять объективно необходимое количество запасных частей. Оценка соответствия запаса фактическим потребностям в ремонтных комплектах с помощью коэффициента соответствия k_a показывает, что вероятностная модель работает.

4. Выводы. 1. Обоснованное прогнозирование технического состояния водопроводной арматуры позволяет прогнозировать изменение ее технического состояния во времени в процессе эксплуатации, обеспечивает эффективное планирование персонала и получение экономической выгоды.

2. Вероятностная модель расчета запаса ремонтных комплектов с использованием теории надежности дает возможность более эффективно формировать склад запасных частей для своевременного устранения отказов водопроводной арматуры. Это позволит снизить потери воды и повысит эффективность работы водопроводной арматуры.

3. Выявленные количественные характеристики надежности имеют научную значимость для теории проектирования водопроводной арматуры.

4. Результаты исследования представляют практический интерес для производителей водопроводной арматуры и для управляющих компаний, эксплуатирующих внутренние водопроводы зданий.

Список источников

1. *Englart S., Jedlikowski A.* The influence of different water efficiency ratings of taps and mixers on energy and water consumption in buildings // *SN Appl. Sci.* 2019. P. 510–525. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0539-8>
2. *Luo G., Zheng Z., Ning L., Tan Z., Tong J., Liu E.* Failure analysis of AISI 316L ball valves by salt bath nitriding // *Eng. Fail. Anal.* 2020. No. 111. P. 104455. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104455>
3. *Byrnes R.T., Lynch S.P.* An unusual failure of a nickel-aluminium bronze (NAB) hydraulic valve // *Eng. Fail. Anal.* 2015. No. 49. P. 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.009>
4. *Zhang Y., Shang X., Song M., Sun Z., Xu S.* Failure analysis of handhole flange cracking // *Engineering Failure Analysis.* 2019. No. 96. P. 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.09.018>
5. *Moses D., Haider G., Henshaw J.* An investigation of the failure of a 1/4" ball valve // *Eng. Fail. Anal.* 2019. No. 100. P. 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.047>
6. *Fidar A.M., Memon F.A., Butler D.* Economic implications of water efficiency measures i: assessment methodology and cost effectiveness of micro-components // *Urban Water J.* 2017. Vol. 14, no. 5. P. 522–530. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223859>
7. *Bijvank M., Koole G., Vis I.F.A.* Optimising a general repair kit problem with a service constraint // *Eur. J. Operational Res.* 2010. Vol. 204, no. 1. P. 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.004>
8. *Rahimi-Ghahroodi S., Al Hanbali A., Vliegen I.M.H., Cohen M.A.* Joint optimization of spare parts inventory and service engineers staffing with full backlogging // *Int. J. Prod. Econ.* 2019. No. 212. P. 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.007>
9. *Sleptchenko A., Al Hanbali A., Zijm H.* Joint planning of service engineers and spare parts // *Eur. J. Oper. Res.* 2018. No. 271. P. 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.014>
10. *Jadhav S.S., Kalita P.C., Das A.K.* Design management intervention in product–service system of water supply // *Research into Design for a Connected World, Smart Innovation, Systems and Technologies.* 2019. No. 135. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5977-4_16
11. *Suh E.S.* Product service system availability improvement through field repair kit optimization: A case study // *Appl. Sci.* 2019. No. 9. P. 4272. doi:10.3390/app9204272
12. *Xie W., Liao H.T., Jin T.D.* Maximizing system availability through joint decision on component redundancy and spares inventory // *Eur. J. Operational Res.* 2014. Vol. 237, no. 1. P. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.031>

References

1. *Englart S., Jedlikowski A.* The influence of different water efficiency ratings of taps and mixers on energy and water consumption in buildings. *SN Appl. Sci.* 2019: 510–525. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0539-8>
2. *Luo G., Zheng Z., Ning L., Tan Z., Tong J., Liu E.* Failure analysis of AISI 316L ball valves by salt bath nitriding. *Eng. Fail. Anal.* 2020; (111): 104455. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104455>

3. Byrnes R.T., Lynch S.P. An unusual failure of a nickel-aluminium bronze (NAB) hydraulic valve. *Eng. Fail. Anal.* 2015; (49): 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.009>
4. Zhang Y., Shang X., Song M., Sun Z., Xu S. Failure analysis of handhole flange cracking. *Engineering Failure Analysis*. 2019; (96): 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.09.018>
5. Moses D., Haider G., Henshaw J. An investigation of the failure of a 1/4" ball valve. *Eng. Fail. Anal.* 2019; (100): 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.047>
6. Fidar A.M., Memon F.A., Butler D. Economic implications of water efficiency measures i: assessment methodology and cost effectiveness of micro-components. *Urban Water J.* 2017; 14(5): 522–530. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223859>
7. Bijvank M., Koole G., Vis I.F.A. Optimising a general repair kit problem with a service constraint. *Eur. J. Operational Res.* 2010; 204(1): 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.10.004>
8. Rahimi-Ghahroodi S., Al Hanbali A., Vliegen I.M.H., Cohen M.A. Joint optimization of spare parts inventory and service engineers staffing with full backlogging. *Int. J. Prod. Econ.* 2019; (212): 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.007>
9. Sleptchenko A., Al Hanbali A., Zijm H. Joint planning of service engineers and spare parts. *Eur. J. Oper. Res.* 2018; (271): 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.014>
10. Jadhav S.S., Kalita P.C., Das A.K. Design management intervention in product–service system of water supply. *Research into Design for a Connected World, Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2019; (135). https://doi.org/10.1007/978-981-13-5977-4_16
11. Suh E.S. Product service system availability improvement through field repair kit optimization: A case study. *Appl. Sci.* 2019; (9): 4272. doi:10.3390/app9204272
12. Xie W., Liao H.T., Jin T.D. Maximizing system availability through joint decision on component redundancy and spares inventory. *Eur. J. Operational Res.* 2014; 237(1): 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.031>

Информация об авторах

А.П. Свинцов – доктор технических наук, профессор, svintsovap@rambler.ru
В.А. Фоминов – аспирант

Information about the authors

A.P. Svintsov – DSc, Professor, svintsovap@rambler.ru
V.A. Fominov – Post-graduate Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.08.2021
Одобрена после рецензирования 14.09.2021
Принята к публикации 21.09.2021

The article was submitted 16.08.2021
Approved after reviewing 14.09.2021
Accepted for publication 21.09.2021