

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-149-157

## WARNING OF REALIZATION OF DEGRADATION FAILURE OF ELEMENTS OF MECHANICAL EQUIPMENT OF WATER-TRANSPORT HYDROTECHNICAL STRUCTURES

**N. M. Ksenofontov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*In this paper a presents the results of a study of the possibility of preventing the failure of elements of mechanical equipment of water transport hydraulic structures, in particular navigable locks, as a result of the course of destructive aging processes. At present, technical diagnostics of mechanical equipment is carried out to prevent the implementation of such failures, including using methods and means of nondestructive testing. The methods used to control the technical condition of the elements of mechanical equipment generally meet modern requirements. Their use makes it possible to ensure the safety of structures with the available intensity of shipping traffic. As a result of the performed analysis of failures and damages of elements of the mechanical equipment of navigation locks it is established that one of the main aging processes is fatigue (corrosion-fatigue) damage, in particular, low-cycle fatigue. The analysis of the assessment of the technical condition of similar products abroad showed the identity of the aging processes of the elements and the directions for their timely detection. The paper presents a calculated dependence, which can be used in assessing the technical state of the elements of mechanical equipment, including when determining their remaining life time. As a result of the calculation and full-scale studies, laboratory and experimental tests, there is a high anisotropy of the enlarged elements of mechanical equipment for the distribution of mechanical stresses from the applied loads, as well as the dependence of the probability of damage from the strain-stress state of the site. In the final part of the work, proposals have been developed on the formation of rational systems for monitoring the technical condition of the elements of the mechanical equipment of navigation locks, taking into account the actual capabilities of the non-destructive testing methods used, as well as existing and prospective physical methods for estimating the strain-stress state.*

*Keywords: navigation lock, mechanical equipment, mechanical life, deterioration, technical diagnosis, strain-stress state, low-cycle fatigue.*

**For citation:**

Ksenofontov, Nikolai M. "Warning of realization of degradation failure of elements of mechanical equipment of water-transport hydrotechnical structures." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 149–157. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-149-157.

**УДК: 626.4; 626.5; 656.627.3; 656.627.4**

## ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОДНО-ТРАНСПОРТНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

**Н. М. Ксенофонтов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская федерация

*В статье представлены результаты исследования возможности предупреждения реализации отказов элементов механического оборудования водно-транспортных гидротехнических сооружений, в частности судоходных шлюзов, в результате протекания деструктивных процессов старения. В настоящее время для предупреждения реализации подобных отказов проводится техническое диагностирование механического оборудования, в том числе с помощью методов и средств неразрушающего контроля. Используемые методы контроля технического состояния элементов механического оборудования в целом соответствуют современным требованиям. Их применение позволяет обеспечивать безопасность сооружений при имеющейся интенсивности судоходства. В результате выполненного анализа отказов*

и повреждений элементов механического оборудования судоходных шлюзов установлено, что одним из основных процессов старения является усталостное (коррозионно-усталостное) повреждение, в частности малоцикловая усталость. Проведенный анализ оценки технического состояния подобных изделий за рубежом показал идентичность процессов старения элементов и направлений их своевременного обнаружения. В работе приведена расчетная зависимость, которая может быть использована при оценке технического состояния элементов механического оборудования, в том числе при определении их остаточного ресурса. В результате проведения расчетных и натурных исследований, лабораторных и экспериментальных испытаний отмечается наличие высокой анизотропии укрупненных элементов механического оборудования по распределению механических напряжений от приложенных нагрузок, а также зависимость вероятности образования повреждений от напряженно-деформированного состояния участка. В заключительной части работы сформулированы предложения по формированию рациональных систем контроля технического состояния элементов механического оборудования судоходных шлюзов с учетом фактических возможностей применяемых методов неразрушающего контроля, а также существующих и перспективных физических методов оценки напряженно-деформированного состояния.

*Ключевые слова:* судоходный шлюз, механическое оборудование, срок службы, старение, техническое диагностирование, напряженно-деформированное состояние, малоцикловая усталость.

**Для цитирования:**

Ксенофонтов Н. М. Предупреждение реализации деградационных отказов элементов механического оборудования водно-транспортных гидротехнических сооружений / Н. М. Ксенофонтов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 149–157. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-149-157.

### Введение (Introduction)

Расчетный срок службы водно-транспортных гидротехнических сооружений, в том числе судоходных шлюзов, составляет 100 лет [1], их механического оборудования — 25 лет [2]. За исключением отдельных случаев замены, связанных с реконструкцией сооружений, основные элементы механического оборудования (МО) находятся в эксплуатации дольше указанного срока. Например, в настоящее время на отечественных судоходных гидротехнических сооружениях эксплуатируется примерно тысяча металлоконструкций ворот и затворов различного назначения и конструктивного исполнения. Примерно для 50 % из них срок службы составляет более 25 лет, тем не менее значительная часть данного оборудования находится в эксплуатации более 40 лет [3].

Одной из основных причин ремонта и/или замены элементов МО является воздействие деструктивных процессов старения, снижающих их техническое состояние, в частности усталостное (коррозионно-усталостное) повреждение [4], [5] (рис. 1 и 2), неконтролируемое развитие которого может привести к внезапному деградационному отказу элемента [6]. Примером является авария на Пермском шлюзе в ноябре 1994 г. [7]. Для предупреждения реализации подобных отказов проводится техническое диагностирование механического оборудования и, в частности, контроль его технического состояния с применением методов и средств неразрушающего контроля, позволяющих своевременно выявлять поврежденные участки и элементы.

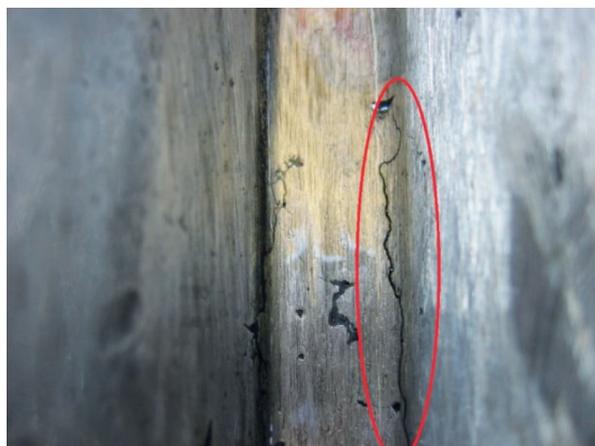


Рис. 1. Развитие усталостной трещины вдоль зуба колеса открытой передачи

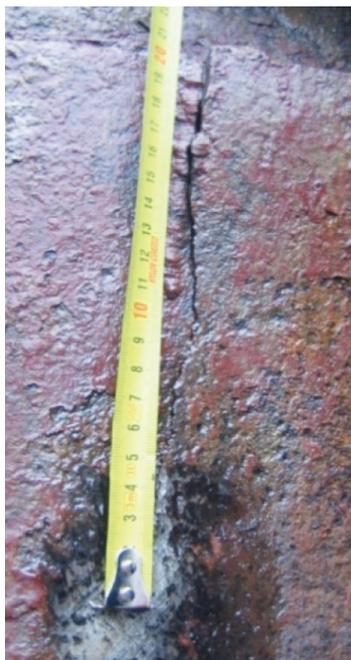


Рис. 2. Коррозионно-усталостное повреждение полки ригеля основных двустворчатых ворот

В табл. 1 приведены сведения о характерных деструктивных процессах старения элементов МО судоводных шлюзов и используемых в настоящее время источниках информации при оценке их технического состояния.

Таблица 1

**Источники информации, используемые в настоящее время для оценки технического состояния МО водно-транспортных гидротехнических сооружений**

Наименование процесса старения	Информация, используемая для оценки технического состояния изделия			
	априорная <sup>1</sup>	апостериорная		
		ВИК <sup>2</sup>	МНК <sup>3</sup>	определение НДС <sup>4</sup>
Коррозия металла	+	+	+ Изм. $s_i$ <sup>5</sup>	+
Коррозионная усталость	+	+	-	+
Усталость	+	+	+	+
Изнашивание трением	+	+	-	-
Накапливание механических повреждений и деформаций	+	+	-	-
Изменение пространственного положения элементов	+	+	X	+

Примечания:

1. *Априорная информация* — это информация, полученная до проведения измерений при анализе проектной, монтажной и приемо-сдаточной документации, результатов предыдущих оценок технического состояния и наблюдений, актов преддекларационных обследований, материалов о проведении ремонтно-восстановительных работ, сведений об опыте и условиях эксплуатации, нормативных актов и технической литературы.
2. ВИК — визуально-измерительный контроль.
3. МНК — методы неразрушающего контроля.
4. НДС — напряженно-деформированное состояние.
5. Изм.  $s_i$  — измерение остаточной толщины элемента.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ информации по отказам элементов МО судоводных шлюзов показывает, что значительная часть из них произошла при числе циклов нагружения  $N_i$  в диапазоне  $10^4 \dots 10^5$ . Значения циклических напряжений во многих случаях превышают предел усталости материала  $\sigma_{-1}$  элементов, установленный при числе испытаний  $10^5 \dots 10^8$  циклов [8]. При таких напряжениях отмечается значительная пластическая деформация материала в вершине зарождающихся дефектов при каждом цикле нагружения [8], [9]. В результате происходит их накопление, интенсифицируемое циклической анизотропией свойств материала. Процесс классифицируется [8], [9] как квазистатический тип малоциклового разрушения при условиях, близких к статическому нагружению до разрыва. Результатом процесса является образование в зонах максимальных деформаций макротрещин усталостного типа.

На рис. 3 представлена расчетная кривая малоциклового усталости для углеродистых сталей [9], отличающаяся от традиционных усталостных кривых [8] относительно малым числом циклов до разрушения элемента ( $N_i < 10^5$ ) и отсутствием горизонтального участка кривой. Представленная на этом рисунке расчетная зависимость  $N_i = f(\sigma)$  может быть использована при формировании системы контроля технического состояния МО судоводных шлюзов для прогнозирования остаточного ресурса элементов и оптимизации сроков их проверки методами неразрушающего контроля при условии наличия информации об их НДС. Очевидно, что наряду с наличием в деталях и укрупненных узлах МО участков, в которых напряжения  $\sigma_a > \sigma_{-1}$  и процесс разрушения происходит в соответствии с ранее приведенной моделью сопротивления металлов усталостному разрушению при малом числе циклов нагружения, имеются участки с различными уровнями напряжений, процесс образования и развития дефектов в которых происходит в соответствии с классическим представлением об усталостном разрушении материалов.

Из результатов выполненного анализа литературных источников, натуральных и расчетных исследований [10], [11] следует, что напряженно-деформированное состояние множества элементов, совокупность которых формирует укрупненный элемент МО (створки шлюзовых ворот, грузовые колеса механизмов привода), имеет большой диапазон возможных значений от 0 до  $\sigma_b$ . Это свидетельствует о высокой анизотропии укрупненного элемента МО по данному показателю, что позволяет рассматривать его как совокупность  $i$  конечных множеств с различными значениями показателя напряженности.

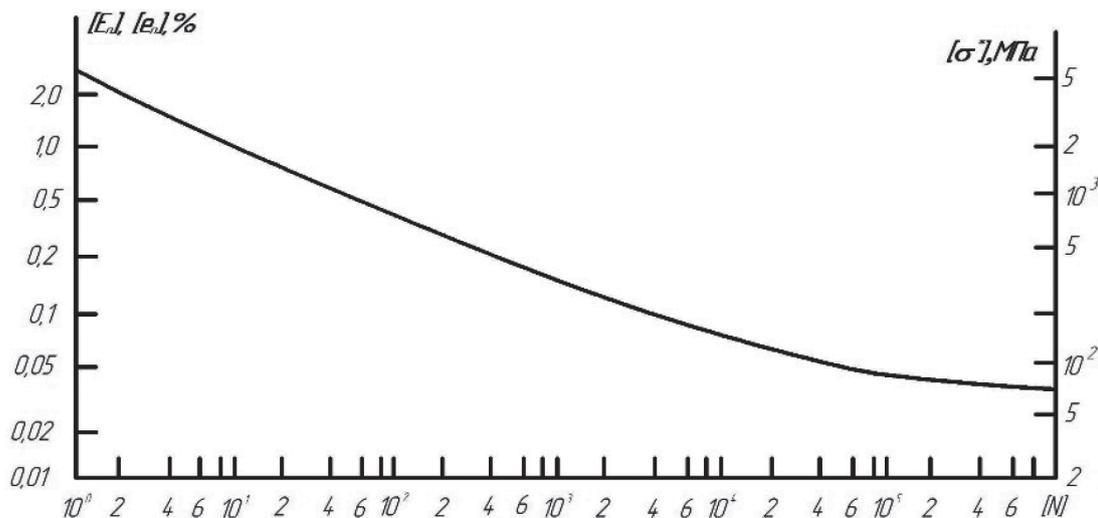


Рис. 3. Кривая малоциклового усталости

В работах [12], [13] для количественной оценки показателя напряженности локального участка элемента используется коэффициент снижения предела выносливости  $K$  с учетом всех факторов:

$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1д}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости материала при фактическом режиме нагружения;

$\sigma_{-1д}$  — предел выносливости детали, изготовленной из материала со справочным значением  $[\sigma_{-1}]$ .

По данным [12], значения коэффициента  $K$  изменяются от двух до шести. В работе [14] верхние значения этого показателя достигают 10. Снижение  $[\sigma_{-1д}]$  относительно  $[\sigma_{-1}]$  обусловлено следующими факторами:

– наличием в детали участков концентрации напряжений (конструктивных, технологических или эксплуатационных), каждый из которых оценивается коэффициентом концентрации напряжений  $K_{\sigma}$ ;

– наличием остаточных напряжений, на величину которых рекомендуется увеличить [9] напряжения  $\sigma_a$  от внешних нагрузок.

В работах [8], [12] рассматриваются также такие факторы, как влияние на  $\sigma_{-1д}$  масштабного фактора, изменения температуры, состояния поверхности, вибрации и т. д. Указанные обстоятельства приводят к формированию в условиях реального нагружения элементов, на их наиболее нагруженных участках, суммирующих напряжений  $\sigma_c$ , величина которых значительно отличается от результатов испытаний образцов на усталость материала  $\sigma_{-1}$  в зависимости от фактического наличия и количественного влияния вышеуказанных факторов. Из этого следует, что в качестве наиболее объективного показателя, характеризующего напряженность элементов, работающих в условиях циклического нагружения, следует рассматривать показатель, характеризующий фактическое положение элемента на классической кривой усталостного разрушения [8], [9] в текущий момент времени:

$$n_{\sigma}^c = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}. \quad (2)$$

Без учета дополнительных факторов, влияние которых на  $\sigma_c$  рассмотрено в работах [8], [9], суммарные напряжения на наиболее напряженном участке, в соответствии с рекомендациями [9], следует рассматривать в виде

$$\sigma_c = \Delta\sigma + \sigma_{ост} + \sigma_a, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma = f(K_{\sigma})$  — изменение уровня напряжений, обусловленное наличием концентраторов напряжений (конструктивных, технологических и эксплуатационных);

$\sigma_{ост}$  — остаточные напряжения;

$\sigma_a$  — напряжения от внешних штатных нагрузок.

Наличие количественной оценки показателя  $n_{\sigma}^c$  позволяет определить положение элемента на кривой усталостного разрушения [8], [9] в текущий момент времени, что позволяет объективно прогнозировать остаточный ресурс и установить уровень вероятных повреждений, соответствующих виду и этапу развития процесса. Однако ни один из существующих методов определения напряжений не позволяет с достаточной точностью предоставить информацию о составляющих  $\sigma_c$ . Например, широко используемый метод конечных элементов (МКЭ) дает возможность, как правило, определить только величину напряжений от внешних нагрузок  $\sigma_a$  в упругопластической зоне.

### Результаты (Results)

Своевременное выявление результатов протекания деструктивных процессов старения, в частности усталостного, развитие которых способно привести к отказу детали или укрупненного элемента механического оборудования судоводного гидротехнического сооружения, а также прогнозирование их остаточного ресурса является задачей технического диагностирования [15]. Представляется целесообразным развитие диагностических систем в направлении постепенного снижения уровня информационной энтропии [16] путем использования дополнительных контро-

лируемых параметров, в частности  $\sigma_c$ , или ее составляющих, с учетом расчетных возможностей (МКЭ) и перспективных физических методов оценки НДС. С учетом этого в табл. 2 приведены предложения по формированию рациональных систем контроля технического состояния МО СГТС с учетом фактических возможностей методов и средств, указанных в табл. 1, а также оценки НДС, анализ которых позволил уточнить зоны их применения. Апробация данных предложений представлена в работе [10].

Таблица 2

**Формирование рациональной системы контроля технического состояния МО СГТС при наличии информации о величине  $\sigma_c$**

Механическая характеристика материала по величине напряжения	N множества $i$	Диапазон $\sigma_c$ для малоуглеродистых сталей, МПа	Отношение $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_c}$	Возможность выявления участков образования усталостных трещин			
				МКЭ	МНК <sup>1</sup>		
					ФМИН <sup>2</sup>	ВИК <sup>3</sup>	МПД <sup>4</sup> , ЦД <sup>5</sup> , ВТ <sup>6</sup>
0 ... $\sigma_{-1}$	$i_1$	0 – 50	$\gg 1$	+	+	–	–
	$i_2$	50 – 100	$\geq 1$	+	+	–	+
	$i_3$	100 – 150	$\approx 1$	+	+	–	+
	$i_4$	150 – 250	$\leq 1$	+	+	–	+
$\sigma_{-1}$ ... $\sigma_T$	$i_5$	250 – 350	$< 1$	+	+	+	+
$\sigma_T$ ... $\sigma_B$	$i_6$	350 – 450	$\ll 1$	–	+	+	+

Примечания:

1. МНК — методы неразрушающего контроля.
2. ФМИН — физические методы измерения напряжений.
3. ВИК — визуально-измерительный контроль.
4. МПД — магнитопорошковая дефектоскопия;
5. ЦД — цветная дефектоскопия.
6. ВТ — вихретоковый контроль.
7. Значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$ , предела текучести  $\sigma_T$  и предела прочности материала  $\sigma_B$  приведены для стали 09Г2С.

### Обсуждение (Discussion)

Состав контролируемых параметров элементов МО, методов и технических средств их измерения формировались на отечественных судоходных гидротехнических сооружениях в 70 – 90-х гг. XX в. Используемые методы контроля технического состояния элементов МО в целом соответствуют современным требованиям. Проведенный анализ оценки технического состояния подобных изделий за рубежом показал идентичность процессов старения элементов и направлений их своевременного обнаружения [17] – [19]. Сведения о состоянии современных методов и средств получения диагностической информации механических систем позволяют предположить, что некоторые из них могут быть использованы для совершенствования системы контроля технического состояния МО СГТС в следующих направлениях:

- увеличение долговременности диагностического прогноза;
- локализация контролируемых участков элементов;
- изменение состава контролируемых параметров с учетом возможностей современных методов и технических средств.

Наиболее перспективными из них являются методы оценки НДС. Однако в настоящее время отсутствуют освоенные методы и средства оперативной локализации участков контроля и выявления потенциально-опасных участков, измерения уровня приложенных напряжений, в том числе на участках их концентрации. Вследствие необходимости проведения исследований для определения применимости методов контроля в условиях эксплуатации диагностируемых объектов,

конструктивного совершенствования средств контроля, отработки системы его метрологического обеспечения и создания нормативной базы практическое использование новых методов контроля, как правило, реализуется через несколько лет после получения первых положительных результатов. При этом они постепенно могут вытеснять устаревшие с недостаточными диагностическими характеристиками. Представляется оправданным опыт ОАО «Газпром» [20], где применяется технология комплексной диагностики газопроводов. В частности, для оценки их НДС используются ультразвуковые, тензометрические, магнитные и электромагнитные методы контроля.

Следует отметить, что при оценке технического состояния элементов МО СГТС также используются методы и средства определения их НДС. Для определения напряжений на ответственных деталях МО сооружений ФГУП «Канал имени Москвы» с 1975 г. по настоящее время применяется тензометрический метод. Для оценки НДС элементов МО выполняются расчетные исследования, позволяющие локализовать опасные участки и уточнить значения остаточного ресурса.

Развитие систем контроля технического состояния СГТС в указанных направлениях могло бы способствовать, в частности, повышению надежности и долговечности сооружений и элементов МО.

### Выводы (Summary)

1. Одним из основных деструктивных процессов старения, снижающих техническое состояние элементов МО СГТС, является усталостное (коррозионно-усталостное) повреждение, в частности, малоцикловая усталость.

2. Установлена высокая анизотропия, по показателю распределения напряжений, укрупненных элементов МО СГТС.

3. Существующая система контроля технического состояния МО СГТС с высокой интенсивностью судопропуска в целом соответствует требуемому в настоящее время уровню надежности.

4. Приведенная расчетная зависимость может использоваться при оценке технического состояния элементов МО СГТС, для прогнозирования остаточного ресурса элементов и оптимизации сроков их проверки методами неразрушающего контроля при условии наличия информации об их НДС.

5. Предложения по формированию рациональных систем контроля технического состояния элементов механического оборудования позволяют обеспечить необходимый уровень их безопасности.

6. Применение физических методов определения напряженно-деформированного состояния при оценке технического состояния элементов механического оборудования с учетом их особенностей требует лабораторных и экспериментальных исследований, а также проверок в эксплуатационных условиях, подтверждающих возможность их использования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. — М.: Минрегион России, 2012. — 39 с.
2. Письмо ОАО «Трест Гидромонтаж» СПКТЬ «Ленгидросталь» № 2/2-41/7-274 от 21.04.2000 г.
3. Колесников Ю. М. Проведение исследований технического состояния и уровня безопасности эксплуатируемых судоходных гидротехнических сооружений с анализом динамики изменения их показателей на основе данных отраслевого мониторинга: отчет о НИР / Ю. М. Колесников. — М.: Российский Речной Регистр, 2014.
4. ГОСТ 23207-78. Соппротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 48 с.
5. Терентьев В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. — М.: Наука, 2015. — 480 с.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016. — 24 с.
7. Макаров В. И. Предельный износ металлоконструкций ворот Пермского шлюза, связанный с поте-

рей несущей способности основных узлов и элементов вследствие их длительной эксплуатации, расчетных и конструктивных недостатков / В. И. Макаров // Международная науч.-техн. конф. «Вопросы обеспечения устойчивости и безопасности гидротехнических сооружений». — М.: ЦБНТИ речного транспорта, 1995. — С. 22.

8. Форрест П. Усталость металлов / П. Форрест. — М.: Машиностроение, 1968. — 352 с.

9. Когаев В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.

10. Кузьмицкий М. Л. Определение уровня напряжений на колесах открытых зубчатых передач / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, И. Н. Базавлук // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 55–63.

11. Ксенофонтов Н. М. Динамика развития процессов старения элементов металлоконструкций двустворчатых ворот судоходных шлюзов / Н. М. Ксенофонтов, В. Н. Лошак // Гидротехника. XXI век. — 2017. — № 1. — С. 68.

12. Когаев В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. — М.: Машиностроение, 1991. — 319 с.

13. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 55 с.

14. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник / М. Н. Степнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 231 с.

15. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандартиформ, 2009. — 11 с.

16. Кузьмицкий М. Л. Анализ и перспективы развития моделей предупреждения отказов механических систем судоходных гидротехнических сооружений, обусловленных усталостным разрушением элементов / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов // Гидротехническое строительство. — 2015. — № 5. — С. 28–32.

17. ETL 1110-2-566. Advanced reliability analysis of fatigue cracking in horizontally framed miter gates / Department of the army. U.S. Army Corps of Engineers. — Washington, 2010. — 115 p.

18. Langston M. Fatigue Analysis of the Greenup Lock Gate on the Ohio River / M. Langston // Undergraduate Honors Thesis Program in Civil Engineering University of Arkansas. — 2017. — Vol. 7. — 15 p.

19. Wermundsen T. Efficient Evaluation of Fatigue and Damage in Welded Joints from Finite Element Analysis / T. Wermundsen. — Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials, 2014. — 95 p.

20. Коннов В. В. Комплексная дистанционная диагностика подземных газопроводов / В. В. Коннов // Территория NDT. — 2013. — № 2. — С. 42.

## REFERENCES

1. Russian Federation. Set of rules SP 58.13330.2012. Hydraulic Structures. Basic statements. M.: Minregion Rossii, 2012.

2. Pis'mo OAO «Trest Gidromontazh» SPKTB «Lengidrostal'» №2/2-41/7-274 ot 21.04.2000 g.

3. Kolesnikov, Yu.M. *Provedenie issledovaniy tekhnicheskogo sostoyaniya i urovnya bezopasnosti ekspluatiruemykh sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii s analizom dinamiki izmeneniya ikh pokazatelei na osnove dannykh otraslevogo monitoringa: Otchet o NIR*. M.: Rossiiskii Rechnoi Registr, 2014.

4. Russian Federation. State Standard GOST 23207-78. Fatigue strength. Terms, definitions and symbols. M.: Izdatel'stvo standartov, 1981.

5. Terent'ev, V.F., and S.A. Korableva. *Ustalost' metallov*. M.: Nauka, 2015.

6. Russian Federation. State Standard GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. M.: Standartinform, 2016.

7. Makarov, V.I. "Predel'nyi iznos metallokonstruktsii vorot Permskogo shlyuza, svyazannyi s poterei nesushchei sposobnosti osnovnykh uzlov i elementov sledstvie ikh dlitel'noi ekspluatatsii, raschetnykh i konstruktivnykh nedostatkov." *V sb. Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Voprosy obespecheniya ustoichivosti i bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii»*. M.: TsBNTI rechnogo transporta, 1995: 22.

8. Forrest, P. *Ustalost' metallov*. M.: Mashinostroenie, 1968.

9. Kogaev, V.P., N.A. Makhutov, and A.P. Gusenkov. *Raschety detalei mashin i konstruktsii na prochnost' i*

*dolgovechnost'*. M.: Mashinostroenie, 1985.

10. Kuz'mitskii, M.L., N.M. Ksenofontov, and I.N. Bazavluk. "Determination of the level of stresses on wheels of open gears." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3(19) (2013): 55–63.

11. Ksenofontov, N.M., and V.N. Loshak. "Dinamika razvitiya protsessov stareniya elementov metallokonstruktsii dvustvorchatykh vorot sudokhodnykh shlyuzov." *Gidrotekhnika. XXI vek* 1 (2017): 68.

12. Kogaev, V.P., and Yu.N. Drozdov. *Prochnost' i iznosostoikost' detalei mashin*. M.: Mashinostroenie, 1991.

13. Russian Federation. State Standard GOST 25.504-82. Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation. M.: Izdatel'stvo standartov, 1982.

14. Stepanov, M.N. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy. Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1985.

15. Russian Federation. State Standard GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. M.: Standartinform, 2009.

16. Kuz'mitskii, M.L., and N.M. Ksenofontov. "Analiz i perspektivy razvitiya modeli preduprezhdeniya otkazov mekhanicheskikh sistem sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii obuslovlennykh ustalostnym razrusheniem elementov." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 5 (2015): 28–32.

17. ETL 1110-2-566. *Advanced reliability analysis of fatigue cracking in horizontally framed miter gates / Department of the army. U.S. Army Corps of Engineers*. Washington, 2010.

18. Langston, M. "Fatigue Analysis of the Greenup Lock Gate on the Ohio River." *Undergraduate Honors Thesis Program in Civil Engineering University of Arkansas*. 2017. Vol. 7.

19. Wermundsen, T. *Efficient Evaluation of Fatigue and Damage in Welded Joints from Finite Element Analysis*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials, 2014.

20. Konnov, V.V. "Kompleksnaya distantsionnaya diagnostika podzemnykh gazoprovodov." *Territoriya NDT* 2 (2013): 42.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Ксенофонтов Николай Михайлович** —

аспирант, научный сотрудник

*Научный руководитель:*

Кузьмицкий Михаил Леонидович —

доктор технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: [ksen\\_nm@mail.ru](mailto:ksen_nm@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Ksenofontov, Nikolai M.** —

Postgraduate, researcher

*Supervisor:*

Kuzmitskiy, Mikhail L. —

Dr. of Technical Sciences

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: [ksen\\_nm@mail.ru](mailto:ksen_nm@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 11 декабря 2017 г.*

*Received: December 11, 2017.*