

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВОРОТ И ЗАТВОРОВ ШЛЮЗОВ

Целью работы является оценка технического состояния металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов, подверженных, в процессе эксплуатации, коррозионному изнашиванию. Определены расчетные сечения и действующие нагрузки. Использованы классические методики расчета напряженно-деформированного состояния в упругой зоне и результаты натурных измерений, в том числе ультразвуковой толщинометрии остаточной толщины металла силовых элементов и упругой их деформации. Получены расчетные зависимости, позволяющие оценить изменение напряженно-деформированного состояния силовых элементов металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов при различных значениях их коррозионного износа по величине прогиба под напором. Отмечено, что одним из способов повышения надежности и точности оценки напряженно-деформированного состояния элементов расчетными методами может рассматриваться их дублирование результатами непосредственных измерений уровня приложенных напряжений.

Ключевые слова: коррозионный износ, металлоконструкции ворот и затворов, судоходный шлюз, запас прочности, напряженно-деформированное состояние, ригель, жесткость, остаточная толщина, прогиб под напором, срок эксплуатации.

НОРМАТИВНЫМ документом [1] значения предельно-допустимых износов силовых элементов ворот и затворов судоходных шлюзов, как правило, устанавливаются в размере 15 % от проектной толщины. Последняя, во всех случаях не должна быть меньше расчетного значения, обеспечивающего необходимые запасы прочности конструкции [2], [3]. В связи с этим при формальном выполнении требований [1] возможна необоснованная замена конструкций, обладающих достаточными запасами прочности, что может быть подтверждено расчетами напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) наиболее нагруженных участков элементов [4].

В некоторых случаях, например, при недостатке диагностической информации о фактическом коррозионном износе элементов (утонение Δs), имеется потенциальная возможность его оценки по результатам измерений деформации элементов под воздействием штатных нагрузок. В связи с этим необходимо рассмотреть характер зависимостей показателей НДС элементов от степени их коррозионного износа на примере верхних рабочих подъемно-опускных ворот (далее — ПОВ) шлюза № 25 – 26 Балаковского РГСсС [5].

Схема конструкции двухригельных ПОВ и действующей на них нагрузки приведена на рис. 1.

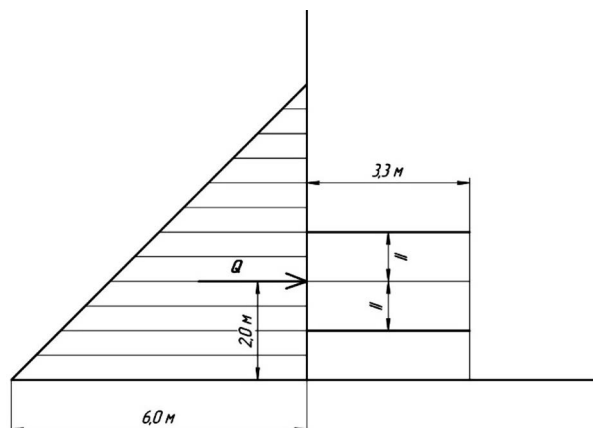


Рис. 1. Схема нагрузок, действующих на двухригельные ворота

Равнодействующая давления воды Q находится на расстоянии 2 м выше уровня бьефа. Ригели расположены на одинаковом расстоянии от равнодействующей давления воды, что обеспечивает равную нагрузку на каждый из них при расчете на прочность и жесткость [6]. Для исследования изменения прочности ПОВ следует учесть влияние обшивки как с напорной, так и безнапорной стороны.

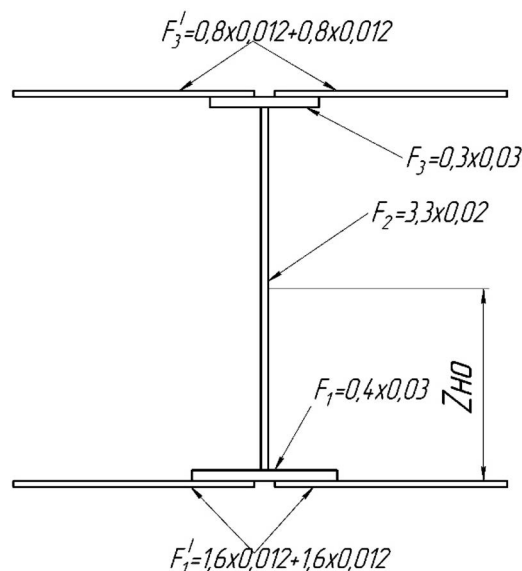


Рис. 2. Сечение нижнего ригеля с присоединенными поясками обшивки

Схема сечения нижнего ригеля с присоединенными поясками обшивки приведена на рис. 2, а расчет геометрических характеристик его поперечного сечения дан в следующей таблице.

Расчетные характеристики поперечного сечения нижнего ригеля

Расчетные характеристики	$F_i, \text{м}^2$	$Z_i, \text{м}$	$S_i, \text{м}^3$	$I_i, \text{м}^4$	$I_{\text{собств}}$
	1	2	3	4	5
F_1^I	0,0384	0	0	0	—
F_1	0,012	0	0	0	—
F_2	0,066	1,665	0,110	0,183	0,060
F_3	0,009	3,33	0,030	0,100	—
F_3^I	0,029	3,33	0,096	0,319	—
Σ	0,154		0,236	0,662	

Примечания: в графе 1 приведены F_i — площади поперечных сечений частей составного профиля; в графе 2 — Z_i — расстояние от центра тяжести площади F_1 до центра тяжести i -й площади; в графе 3 — $S_i = F_i Z_i$ — статический момент i -й площади относительно оси, проходящей через центр тяжести площади F_1 ; в графе 4 — $I_i = F_i Z_i^2$ — момент инерции i -й площади относительно оси, проходящей через центр тяжести площади F_1 ; в графе 5 — $I_{\text{собств}} = \frac{sh^3}{12}$ — собственный момент инерции, где h — высота элемента.

Если принять допущение о том, что площади каждой составляющей поперечного сечения уменьшаются одинаково, то геометрические характеристики сечения будут уменьшаться пропорционально коэффициенту износа $k_{\text{и}}$, определяемому по формуле

$$k_{\text{и}} = \left(1 - \frac{\Delta S}{S_{\text{пр}}} \right) = \frac{S_{\text{ост}}}{S_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $s_{\text{ост}}$ — остаточная толщина элемента, мм; $s_{\text{пр}}$ — проектная толщина элемента, мм; $\Delta s = s_{\text{пр}} - s_{\text{ост}i}$ — уменьшение толщины составляющей площади сечения ригеля, мм; $\frac{\Delta s_i}{s_{\text{пр}i}}$ — относительный износ каждой из составляющей площади сечения ригеля (для данной задачи принято $\frac{\Delta s_i}{s_{\text{пр}i}} = \text{const}$).

Исходя из полученных данных в таблице, находим:

1) расстояние от оси, проходящей через центр тяжести площади F_1 до оси, проходящей через центр тяжести площади всего сечения

$$Z_{\text{НО}} = \frac{0,236}{0,154} = 1,53 \text{ м};$$

2) момент инерции сечения относительно нейтральной оси:

$$I_{\text{НО}} = 0,662 - 1,53 \cdot 0,154 = 0,426 \text{ м}^4;$$

3) момент сопротивления сечения:

$$W = \frac{I_{\text{НО}}}{3,330 - Z_{\text{НО}}} = \frac{0,426}{3,330 - 1,53} = 0,237 \text{ м}^3;$$

4) максимальный статический момент отсеченной площади:

$$S_x^{\text{max}} = 0,050(3,33 - 1,53) + (3,3 - 1,5)^2 \cdot 0,02 \frac{1}{2} = 0,122 \text{ м}^3.$$

Геометрические характеристики сечения составного профиля в процессе эксплуатации изменяются в зависимости от утончения его элементов. На графиках (рис. 3 и 4) показано изменение момента сопротивления W , максимального статического момента отсеченной площади S_x^{max} и момента инерции $I_{\text{НО}}$ в зависимости от срока эксплуатации ворот при постоянной скорости уменьшения толщин элементов 0,05 мм/год и 0,10 мм/год.

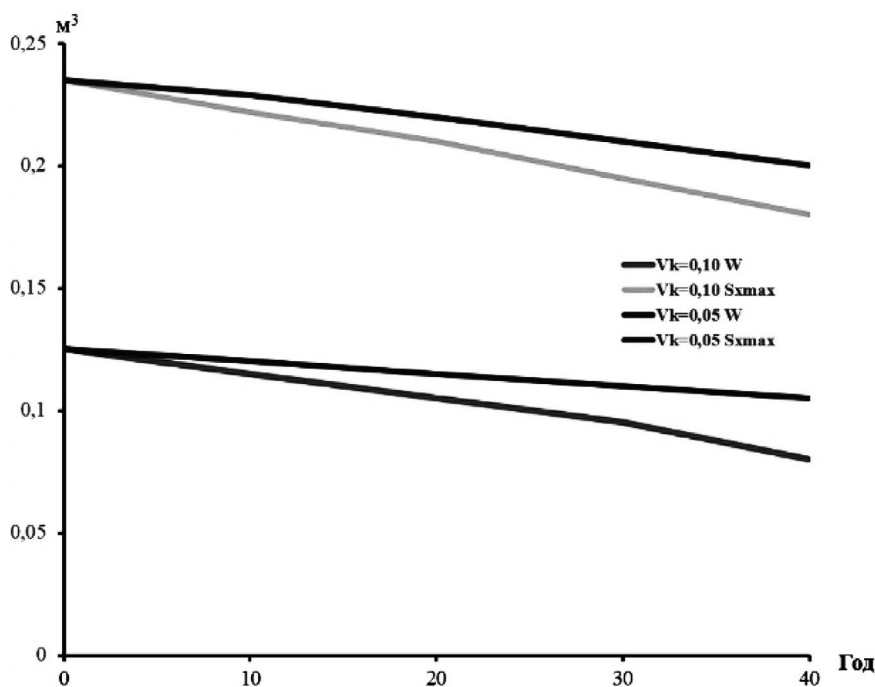


Рис. 3. Уменьшение момента сопротивления W и максимального статического момента S_x^{max} нижнего ригеля от продолжительности эксплуатации ворот

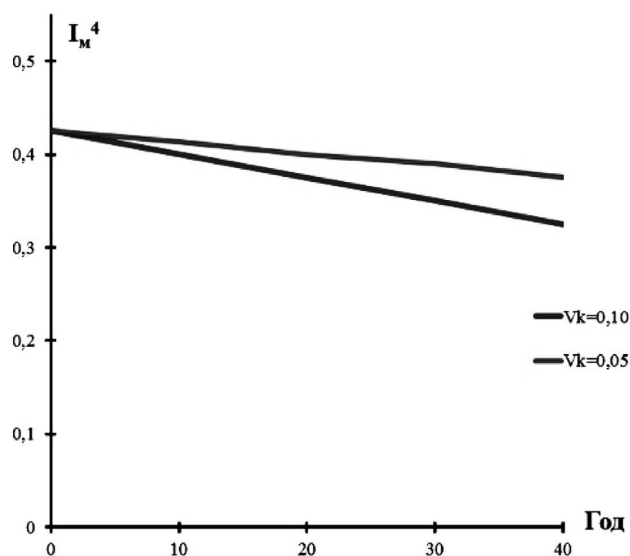


Рис. 4. Уменьшение момента инерции I_{no} площади поперечного сечения нижнего ригеля от продолжительности эксплуатации ворот

Для расчета изменений прочности (максимальных нормальных и касательных напряжений) и жесткости (прогиба середины пролета) нижнего ригеля последний представляется в виде однопролетной балки, свободно опертой по концам и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q , кН/м [7], величина которой определяется по формуле

$$q = 9,8 \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} H^2, \quad (2)$$

где H — максимальный напор, м ($H = 6,0$ м).

После подстановки получим $q = 88,2$ кН/м. На рис. 5 приведены графики изменения максимальных касательных и нормальных напряжений в процессе эксплуатации.

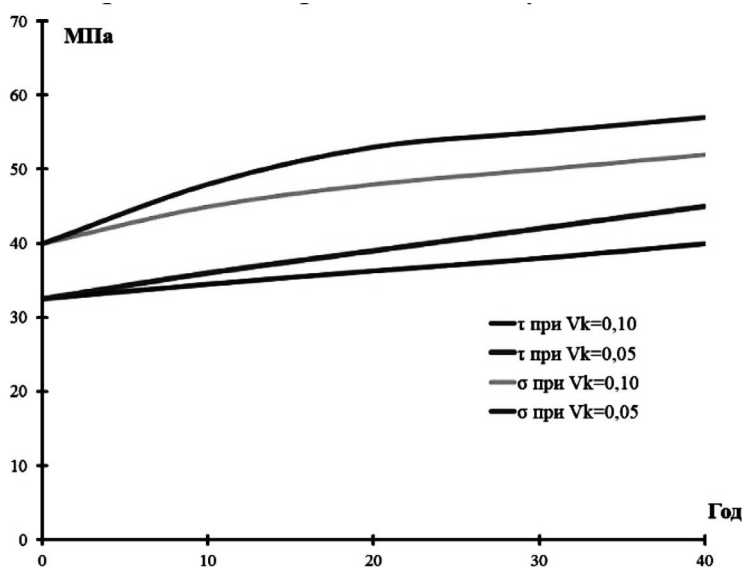


Рис. 5. Изменение касательных и нормальных напряжений

Жесткость ворот можно оценить по величине прогиба ригеля, максимальное значение которого в середине пролета (при $s_{osti} = s_{pri}$) составит

$$y\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5}{384} \cdot \frac{qL^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{88,2 \cdot 31,2^4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 0,426} = 0,0127 \text{ м}, \quad (3)$$

где $E = 210^5$ МПа — модуль нормальной упругости стали.

На рис. 6 приведена номограмма, позволяющая определить изменение характеристик прочности и жесткости ворот (нормальные (σ , МПа) и касательные (τ , МПа) напряжения) при гидродинамическом напоре в зависимости от износа элементов ригеля или года эксплуатации при заданной средней скорости изнашивания. Полученные зависимости позволяют также произвести оценку коррозионного износа ригеля ворот по изменению величины прогиба «у» под напором.

Результаты расчетов для аналогичных элементов, выполненных различными авторами [5], в ряде случаев имеют значительные отличия, что связано, как правило, с погрешностью определения характеристик расчетного сечения и степени коррозионного износа. Дополнительные погрешности при оценке НДС вызывают отклонения фактических нагрузок, действующих на элементы, от принятых при расчетах. Повышению точности определения НДС может способствовать применение физических методов контроля, в частности, рассмотренных в работах [8] – [11].

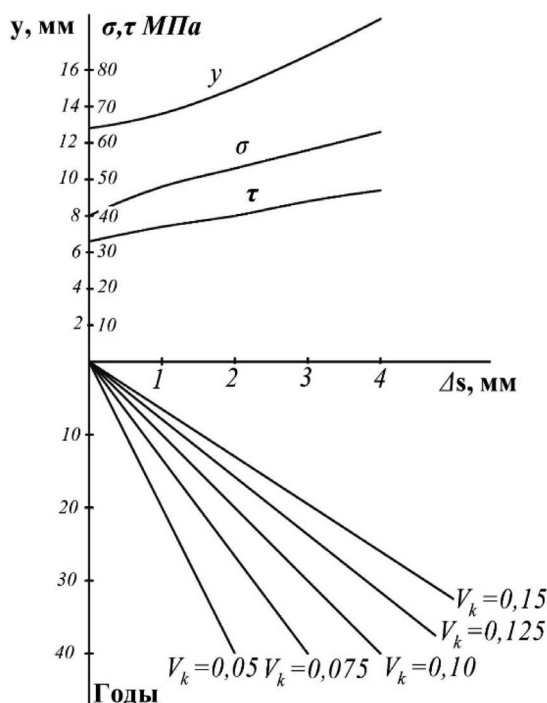


Рис. 6. Номограмма для определения прогиба (y , мм) и максимальных нормальных (σ , МПа) и касательных (τ , МПа) напряжений

Из результатов, проведенных исследований следует:

- полученные расчетные зависимости позволяют оценить изменение НДС силовых элементов металлоконструкций ворот и затворов судоходных шлюзов при различных значениях их коррозионного износа;
- результаты расчетов в целом согласуются с установленными предельно-допустимыми значениями износов и деформаций элементов при рабочих нагрузках;
- точность оценки технического состояния металлоконструкций ворот и затворов зависит от корректности принятых характеристик расчетных сечений, погрешности определения износа элементов и возможностей используемых расчетных методов;
- одним из способов повышения надежности и точности оценки НДС элементов расчетными методами может рассматриваться их дублирование результатами непосредственных измерений уровня приложенных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МУ 050-025-2001 Методические указания. Определение технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. — М.: ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. — 86 с.
2. Федеральный закон № 384 от 30.12.2009. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.
3. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. — Введ. 2012-01-01. — М., 2012. — 40 с.
4. Кузьмицкий М. Л. Исследование возможности и условий развития процесса усталостного разрушения элементов механических систем на этапе образования макротрещин / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонтов, И. Н. Базавлук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 68–74.
5. Кузьмицкий М. Л. Проведение расчетных исследований с анализом прочностного состояния и остаточного ресурса металлоконструкций аварийно-ремонтных ворот, верхних рабочих ворот, нижних двустворчатых ворот и ремонтных двустворчатых ворот и затворов водопроводных галерей шлюза № 17–18 Чебоксарского РГСЦ и шлюза № 25–26 Балаковского РГСЦ: Отчет о НИР (заключительный); рук. М. Л. Кузьмицкий / М. Л. Кузьмицкий, В. Б. Чистов, Н. М. Ксенофонтов, Ю. А. Киселев, В. М. Рябчук, Д. А. Бордиян. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 118 с.
6. Полонский Г. А. Механическое оборудование гидротехнических сооружений / Г. А. Полонский. — М.: Энергия, 1974. — 343 с.
7. Беляев Н. М. Соппротивление материалов / Н. М. Беляев. — М.: Наука, 1976. — 607 с.
8. ГОСТ Р 53965-2010. Контроль неразрушающий. Определение механических напряжений. Общие требования и классификация методов. — Введ. 2011-12-01. — М.: Стандартинформ, 2011. — 8 с.
9. Дубов А. А. Новые требования к методам и средствам диагностики напряженно-деформированного состояния материалов / А. А. Дубов // Территория NDT. — 2012. — № 4. — С. 52–56.
10. Берман А. В. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций горных машин на основе характеристик несущей способности материала / А. В. Берман, Я. С. Ватукин, С. К. Коровин, К. М. Первов, В. К. Первов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2005. — № 5. — С. 220–228.
11. Никитина Н. Е. Акустоупругость и ее применение для измерения напряжений в крупногабаритных конструкциях / Н. Е. Никитина // Вестник научно-технического развития. — 2009. — № 2. — С. 41–46.

CALCULATED RESEARCH INFLUENCE CORROSIVE WEAR ON STRENGTH METAL CONSTRUCTIONS GATES NAVIGATION LOCK

The aim of the work is to evaluate the technical condition of metal structures gates and gate shipping locks exposed, during operation, corrosion wear. Determine the design section and current load. We use the classical method of calculating the stress-strain state in the elastic region and the results of field measurements, including ultrasonic thickness of the residual metal thickness of power elements and elastic deformation. Calculated according to assess the change in the stress-strain state power components metalwork gates and gate shipping locks at different values of corrosion deterioration of the value of deflection under pressure. It is noted that one way to improve the reliability and accuracy of the assessment of the stress-strain state of the elements of calculation methods may be considered duplication results of direct measurements of the level of the applied voltage.

Keywords: corrosion wear, metal framework gates, navigation lock, a margin of safety, stress-strain state, girder, stiffness, residual thickness, bending under pressure, service life.

REFERENCES

1. Russian Federation. Methodical instructions MU 050-025-2001. Opredelenie tehnikeskogo sostojanija metallokonstrukcij vorot i zatvorov SGTS. M.: FGUP CBNTIMT RF, 2002.
2. Russian Federation. Federal Law № N 384. 30 December 2009. Tehniceskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij.
3. Russian Federation. Rulebook. SP 58.13330.2012. Gidrotehnicheskie sooruzhenija. Osnovnye polozhenija. M., 2012.

4. Kuzmitskiy, M., N. Ksenofontov, and I. Bazavluk. "Research opportunities and conditions for the development of the process of fatigue fracture elements of mechanical systems at the stage of education macrocracks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 68–74.
5. Kuzmickij, M. L., V. B. Chistov, N. M. Ksenofontov, Ju. A. Kiselev, V. M. Rjabchuk, and D. A. Bordijan. *Provedenie raschetnykh issledovaniy analizom prochnostnogo sostojaniya i ostatochnogo resursa metallokonstrukcij avarijno-remontnykh vorot, verkhnih rabochih vorot, nizhnih dvustvorchatykh vorot i remontnykh dvustvorchatykh vorot i zatvorov vodoprovodnykh galerej shljuzy № 17-18 Cheboksarskogo RGSiS i shljuzy №25-26 Balakovskogo RGSiS: Otchet o NIR (zakljuchitel'nyj)*; ruk. Kuz'mickij M.L. SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2014.
6. Polonskij, G. A. *Mehanicheskoe oborudovanie gidrotehnicheskikh sooruzhenij*. M.: Jenergiya, 1974.
7. Beljaev, N. M. *Soprotivlenie materialov*. M.: Nauka, 1976.
8. Russian Federation. State standard. GOST R 53965-2010. Kontrol nerazrushajushhij. Opredelenie mehanicheskikh naprjazhenij. Obshhie trebovaniya i klassifikacija metodov. M.: Standartinform, 2011.
9. Dubov, A. A. "Novye trebovaniya k metodam i sredstvam diagnostiki naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya materialov." *Territorija NDT* 4 (2012): 52–56.
10. Berman, A. V., Ja.S. Vatuken, S. K. Korovin, K. M. Pervov, and V. K. Pervov. "Ocenka ostatochnogo resursa metallokonstrukcij gornyh mashin na osnove harakteristik nesushhej sposobnosti materiala." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 5 (2005): 220–228.
11. Nikitina, N. E. "Akustouprugost i ee primenenie dlja izmerenija naprjazhenij v krupnogabaritnykh konstrukcijah." *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* 2 (2009): 41–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кузьмицкий Михаил Леонидович — доктор технических наук. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» kuzmitskiymfspbuwc@mail.ru Ксенофонтов Николай Михайлович — аспирант. Научный руководитель: Кузьмицкий Михаил Леонидович. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» ksen_nm@mail.ru Чистов Валентин Борисович — доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» kaf_sopromat@gumrf.ru	Kuzmitskiy Mikhail Leonidovich — Dr. of Technical Sciences. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping kuzmitskiymfspbuwc@mail.ru Ksenofontov Nikolai Mikhailovich — postgraduate. Supervisor: Kuzmitskiy Mikhail Leonidovich. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping ksen_nm@mail.ru Tchistov Valentin Borisovich — Dr. of Technical Sciences, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping kaf_sopromat@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 октября 2015 г.

УДК 574, 528.422

Е. Н. Колосков

ВЗАИМОСВЯЗЬ ГИДРОГРАФИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

Рассмотрены вопросы использования гидрографических информационных технологий для исследования микрорельефа арктических морей и дальнейшее обоснование на основе этих данных глобальных климатических изменений. Отмечается, что современная гидроакустическая аппаратура предоставляет