

6. IMO Maritime Safety Committee: 'Interim Guidelines for the Application of Formal Safety Assessment', MSC Circular 829. London, 1997.
7. Zaharov, A. A. "Formalizovannaja ocenka bezopasnosti — universalnyj instrument dlja snizhenija riska na transporte." *Transport of the Russian Federation* 3(3) (2006): 66–68.
8. Korolev, V. Ju., V. E. Bening, and S. Ja. Shorgin. *Matematicheskie osnovy teorii riska: Fiziko-matematicheskaja literatura*. M.: Fizmatlit, 2007.
9. Skorohodov, D. A., L. F. Borisova, and Z. D. Borisov. "Principy i kategorii obespechenija bezopasnosti moreplavanija." *Vestnik of MSTU* 13.4-1 (2010): 719–729.
10. Emeljanov, M. D. "Bezopasnost morskogo transporta Rossii." *Transport of the Russian Federation* 2(15) (2008): 38–43.
11. Emelyanov, M. D. "Use of conventional risks in estimation of security of seaborne ships." *Transport of the Russian Federation* 3-4(22) (2009): 40–45.
12. Mojseenko, S. S., and L. E. Mejler. *Bezopasnost morskikh gruzoperevozok*. Kaliningrad: Izd. BGARF, 2011.
13. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
14. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. "Assessment and prediction of dangerous navigational situations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2013): 98–100.
15. Reshetnyak, S. V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. "Ranging of routes of north sea-route on the criterion of hydrographical support." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2008): 55–57.
16. International code for ships operating in polar waters (Polar code). SPb.: AO «CNIIMF», 2016.
17. Gmurman, V. E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika*. M.: Vysshaja shkola, 2003.
18. Santalo, L. *Integralnaja geometrija i geometricheskie verojatnosti*. Trans. M.: Nauka, 1983.
19. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Tom 1. ND №2-020101-72. SPb.: Rossijskij morskij registr sudohodstva, 2013.
20. Mironov, E. U., I. M. Ashik, V. I. Dymov, M. Ju. Kulakov, and S. V. Kljachkin. "Modeli i metody rascheta i prognoza ledovyh i okeanograficheskikh uslovij v arkticheskikh morjah." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 16–28.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Виталий Владимирович  
Минтранс России  
klyuevvv@mintrans.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kljuev Vitaly Vladimirovich  
The Ministry of Transport of the Russian Federation  
klyuevvv@mintrans.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85  
УДК 624.012.4; 626.02

**К. П. Моргунов,  
М. В. Красникова**

### АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕР ШЛЮЗОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Данные наблюдений и измерений за деформациями стен камер шлюзов Волгоградского гидроузла в последние годы показали изменение параметров, характеризующих состояние сооружений и конструкций. Для оценки напряженно-деформированного состояния стен камер шлюзов были разработаны математические конечно-элементные модели нижних и верхних камер шлюзов с учетом блочного строения и фактического армирования. Выполненные расчеты системы «две камеры, основание и засыпки» для шести

*различных режимов функционирования шлюзов (эксплуатационных и ремонтных, в том числе с учетом сезонных температур и температурных перепадов «зима – лето») подтвердили, что ни на шлюзе № 30, ни на шлюзе № 31 нет дефектных узлов или конструктивных недоработок, которые могли бы создать проблемы с точки зрения устойчивости и прочности всей конструкции. Расчетные напряжения и деформации соответствуют фактически наблюдаемым, что свидетельствует о том, что шлюзы находятся в нормальном эксплуатационном состоянии.*

*Ключевые слова: судоходный шлюз, наполнение и опорожнение камеры шлюза, напряженно-деформированное состояние бетонных конструкций камеры шлюза, физико-механические характеристики грунтов, математическая конечно-элементная модель.*

## **Введение**

В состав Волгоградского гидроузла входят: два параллельных двухкамерных шлюза (шлюзы № 30 и № 31 Волжского каскада) с причальными стенками и входными палами, межшлюзовая ГЭС специального назначения с подводящим и отводящим лотками и водосбросом, ограждающая дамба с маяком, левобережный пирс с маяком, нижний подходной канал с маяком. Верхние камеры шлюзов размещаются в верхнем бьефе, средние головы входят в состав сооружений напорного фронта гидроузла. Параллельные нитки шлюзов № 30 и № 31 имеют одинаковую конструкцию. Полезные размеры камер шлюзов  $290,0 \times 30,0$  м, минимальная судоходная глубина на порогах голов и камер — 4,0 м. При подпорном горизонте верхнего бьефа и низшем горизонте нижнего бьефа падение напора на шлюзе разбивается между камерами пополам с общим максимальным напором на средней голове 27,5 м.

Судоходные шлюзы Волгоградского гидроузла являются гидротехническими сооружениями I класса и находятся в эксплуатации уже более 55 лет. Длительная эксплуатация шлюзов привела к определенным изменениям параметров, характеризующих состояние сооружений и конструкций, особенно проявившимся в последние годы. Это может быть обусловлено тем, что в эти годы изменился характер эксплуатации шлюзов — существенно снизилось количество шлюзований, зачастую одна из ниток гидроузла выводилась из эксплуатации для производства ремонтных работ, подвергаясь при этом температурным воздействиям значительных амплитуд. Приборы, имеющиеся на сооружениях гидроузла, в том числе закладные приборы, установленные в момент строительства, зафиксировали изменения в деформациях верха стен камер шлюзов, а также в напряжениях в тыловой арматуре стены. И хотя имеющаяся на гидроузле контрольно-измерительная аппаратура, в том числе и закладная, с момента ввода её в эксплуатацию морально и физически устарела, многие из закладных приборов вышли из строя, такие изменения вызвали озабоченность служб эксплуатации гидроузла. Поэтому в 2014 – 2015 гг. были проведены работы по исследованию и расчетам прочности и устойчивости железобетонных конструкций судоходных шлюзов № 30 и № 31 Волгоградского гидроузла.

Исходной информацией для таких расчетов являются:

- конструкция и геометрические размеры камер шлюзов;
- схема армирования, характеристики бетона и арматуры железобетонных конструкций камер;
- характеристики грунтов основания камер и обратных засыпок за стенами расчетных секций камер.

## **Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния элементов верхней и нижней камер шлюзов**

### *Исходные данные для расчетов*

В соответствии с проектной и строительной документацией [1], а также паспортом и эксплуатационной документацией гидроузла были приняты следующие конструкции верхней и нижней камер шлюзов (поперечные разрезы представлены на рис. 1 и 2).

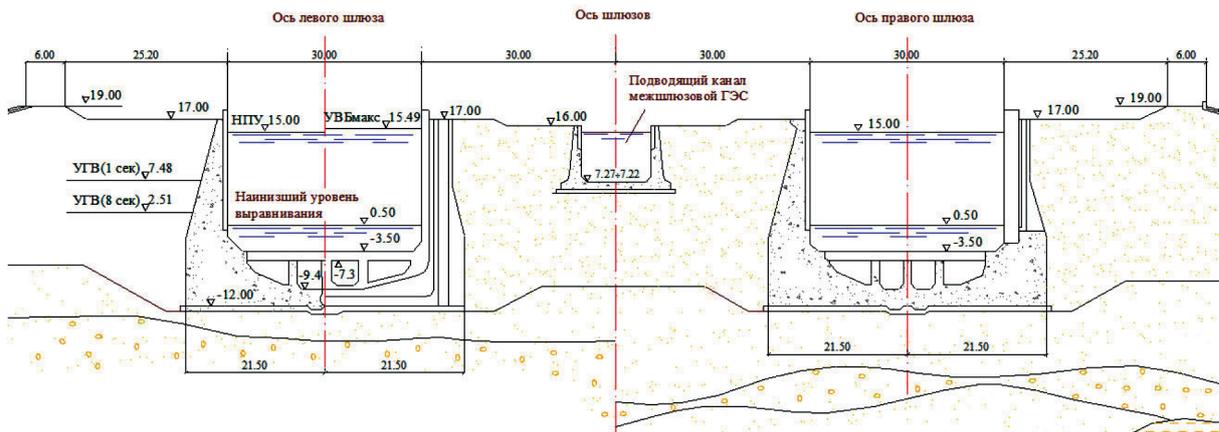


Рис. 1. Верхние камеры шлюзов, поперечный разрез

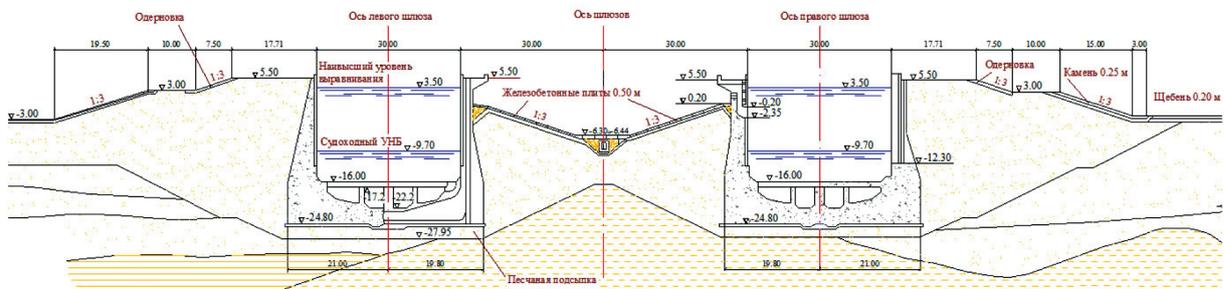


Рис. 2. Нижние камеры шлюзов, поперечный разрез

Стены камер шлюзов разделены на девять секций:

- верхние камеры включают семь секций по 31,0 м и две секции в примыканиях к верхней и нижней головам, соответственно, 21,0 и 29,0 м;
- нижние камеры включают семь секций по 31,0 м и две секции, примыкающие к головам, по 21,0 м каждая.

Секции камер отделены друг от друга и от голов температурно-осадочными швами, швы перекрыты противодиффузионными шпонками. Тыловые грани стен имеют наклон 4 : 1, лицевая грань — 100 : 1.

Камеры шлюзов — железобетонные, с временно разрезным днищем на период строительства и с фермами-затяжками для предварительного обжатия бетона днища, докового типа. Стены камер высотой 21,5 м в нижних камерах и 20,5 м в верхних камерах армированы фермами, на тыловой грани в промежутках между фермами установлены армопакеты. В качестве рабочей арматуры использованы арматурные стержни из горячекатаной стали периодического профиля СТ-5, с  $R_s$  и  $R_{sc}$  350 МПа. Шаг арматуры у лицевой грани стен — 60 см, у тыловой грани стен — 30 см. По высоте стены камер шлюзов разделены горизонтальными межблочными строительными швами, которые выполнены на отметках 0,00 м; +9,5 м; +14,3 м в верхних камерах и на отметках -12,3 м; -4,3 м; +2,9 м — в нижних камерах.

Нижние межблочные швы (на отметке 0,00 в стенах верхней камеры и на отметке 12,3 м в стенах нижней камеры) пересекаются арматурой диаметром 60 мм, установленной с шагом 200 мм у тыловых граней стен (площадь сечения составляет 141,3 см<sup>2</sup> на один погонный метр протяженности стен).

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) были выполнены для средних секций (секции № 5), верхней и нижней камер шлюзов.

Физико-механические характеристики грунтов основания расчетных секций камер шлюзов были приняты следующими:

- модуль деформации  $E = 50$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ;
- объемный вес во взвешенном состоянии  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>;
- угол внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ ;
- сцепление  $C = 0$ .

Для грунтов засыпки пазух за стенами расчетных секций приняты следующие характеристики.

*Для верхней камеры*

- грунт нижней боковой засыпки:
  - модуль деформации  $E = 50$  МПа;
  - коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ;
  - объемный вес в естественном состоянии  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>;
  - объемный вес во взвешенном состоянии  $\gamma = 11$  кН/м<sup>3</sup>;
  - угол внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ ;
  - сцепление  $C = 0$ ;
- грунт верхней боковой засыпки:
  - модуль деформации  $E = 75$  МПа;
  - коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ;
  - объемный вес в естественном состоянии  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>;
  - объемный вес во взвешенном состоянии  $\gamma = 11$  кН/м<sup>3</sup>;
  - угол внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ ;
  - сцепление  $C = 0$ .

*Для нижней камеры*

- грунт боковой засыпки:
  - модуль деформации  $E = 50$  МПа;
  - коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ;
  - объемный вес в естественном состоянии  $\gamma = 18$  кН/м<sup>3</sup>;
  - объемный вес во взвешенном состоянии  $\gamma = 11$  кН/м<sup>3</sup>;
  - угол внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ ;
  - сцепление  $C = 0$ .

Для оценки достоверности результатов в процессе численных расчетов НДС проводилось их сопоставление с данными натурных наблюдений и измерений, полученных от эксплуатационных служб гидроузла [2]. В том числе принимались измеренные взаимные горизонтальные перемещения верха стен (секции № 5) камер шлюза в диапазоне от 1,8 мм до 2,5 мм при наполнении-опорожнении камеры (в пределах отметок от 0,5 м до 15 м — в верхней камере; от –9,7 м до +3,5 м — в нижней камере).

Сезонные амплитуды взаимных перемещений верха стен (секции № 5) камер шлюза для сопоставления с расчетами принимались в диапазоне от 20 мм до 29 мм при сезонном перепаде температуры (между зимней температурой и летней температурой).

Значения растягивающих напряжений в арматуре у тыловой грани стен камер шлюзов принимались по данным закладных приборов, установленных в арматуре свыше 55 лет назад. И хотя показания этих приборов вызывают сомнение, они были приняты для качественной оценки достоверности расчетов. Принято, что максимальные измеренные значения растягивающих напряжений в арматуре у тыловой грани стен камер шлюзов составили 180 – 200 МПа в летний период, когда к напряжениям, возникающим от действия давления грунта засыпки и грунтовых вод на тыловую грань стен, добавляются напряжения от действия температуры. При этом лицевая грань стены разогрета и стремится удлиниться, но остальная часть стены препятствует этому. В результате лицевая грань испытывает дополнительное сжатие, а тыловая грань — дополнительное растяжение.

## Математическая расчетная модель «камера — основание — засыпка»

### Расчетные схемы

При расчётах НДС типовой секции камер шлюзов (секции № 5) рассматривались следующие расчетные случаи.

1. Эксплуатационный случай в период навигации при опорожнении (камеры левого шлюза), при этом уровень воды в камере соответствует уровню нижнего бьефа.

В этом случае при расчетах необходимо учитывать следующие нагрузки:

- собственный вес сооружений;
- вес воды в камерах;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- давление воды в камерах при наиминимуме уровне выравнивания, равном 0,5 м (для верхней камеры), и судоходном уровне нижнего бьефа (УНБ), равном –9,7 м (для нижней камеры);
- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при уровне грунтовых вод (УГВ) = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);

– взвешивающее давление на днище со стороны основания.

2. Эксплуатационный случай в период навигации при наполнении (камеры левого шлюза) — уровень воды в камере соответствует уровню верхнего бьефа.

Включает в себя следующие нагрузки:

- собственный вес сооружений;
- вес воды в камерах;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- давление воды в камерах при НПУ = 15,0 м (для верхней камеры) и наивысшем уровне выравнивания, равном 3,5 м (для нижней камеры);
- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);
- взвешивающее давление на днище со стороны основания.

3. Ремонтный случай (для камер правого шлюза) — камера полностью опорожнена.

Включает в себя следующие нагрузки:

- собственный вес сооружений;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);
- взвешивающее давление на днище со стороны основания.

4. Эксплуатационный случай в период навигации при опорожнении (камеры левого шлюза) с учетом температурного перепада «зима – лето».

Включает в себя следующие нагрузки:

- собственный вес сооружений;
- вес воды в камерах;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- давление воды в камерах: при наиминимуме уровне выравнивания, равном 0,5 м (для верхней камеры), и судоходном УНБ = –9,7 м (для нижней камеры);

- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);
- взвешивающее давление на днище со стороны основания;
- воздействие температурного перепада «зима – лето», равного + 58 °С (от температуры воздуха –27 °С — наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98 до температуры воздуха +31 °С — летней температуры обеспеченностью 0,98 [3]).

5. Эксплуатационный случай в период навигации при опорожнении (камеры левого шлюза) с учетом летней температуры.

Включает в себя следующие нагрузки:

- собственный вес сооружений;
- вес воды в камерах;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- давление воды в камерах: при наиминимуме уровне выравнивания, равном 0,5 м (для верхней камеры), и судоходном УНБ = –9,7 м (для нижней камеры);
- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);
- взвешивающее давление на днище со стороны основания;
- температурное воздействие летнего периода +31 °С (летняя температура воздуха обеспеченностью 0,98 [3]).

6. Эксплуатационный случай в зимний период.

Включает в себя следующие нагрузки:

- собственный вес сооружений;
- вес грунта засыпки в естественном состоянии;
- вес грунта засыпки во взвешенном состоянии;
- активное давление грунта со стороны засыпки;
- давление грунтовых вод в засыпке при УГВ = 8,5 м (для верхних камер шлюзов), УГВ = –3,0 м (для нижних камер шлюзов) и УГВ = 0,2 м (для нижних камер в межшлюзье);
- взвешивающее давление на днище со стороны основания;
- температурное воздействие зимнего периода –27 °С (температура воздуха наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98 [3]).

Расчетные схемы для верхней и нижней камер шлюзов представлены на рис. 3 и 4.

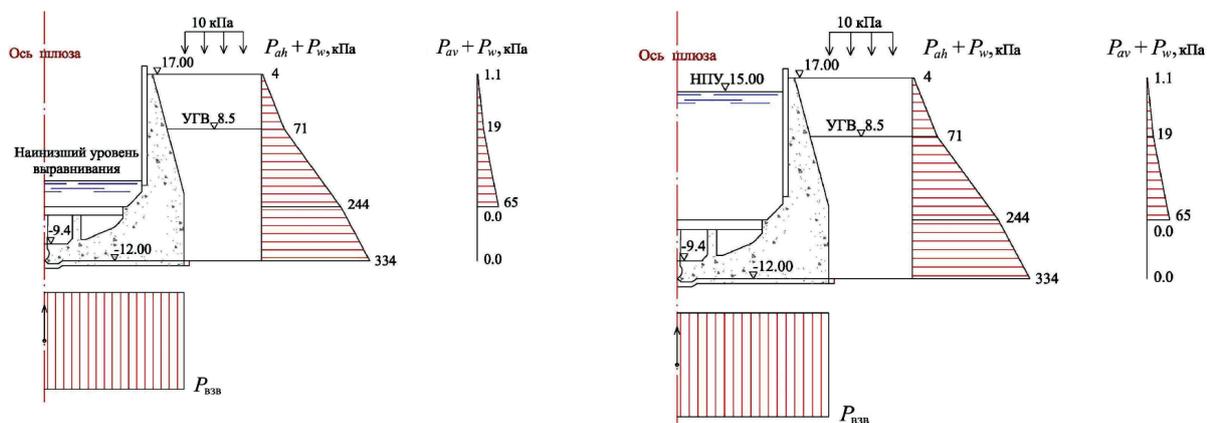
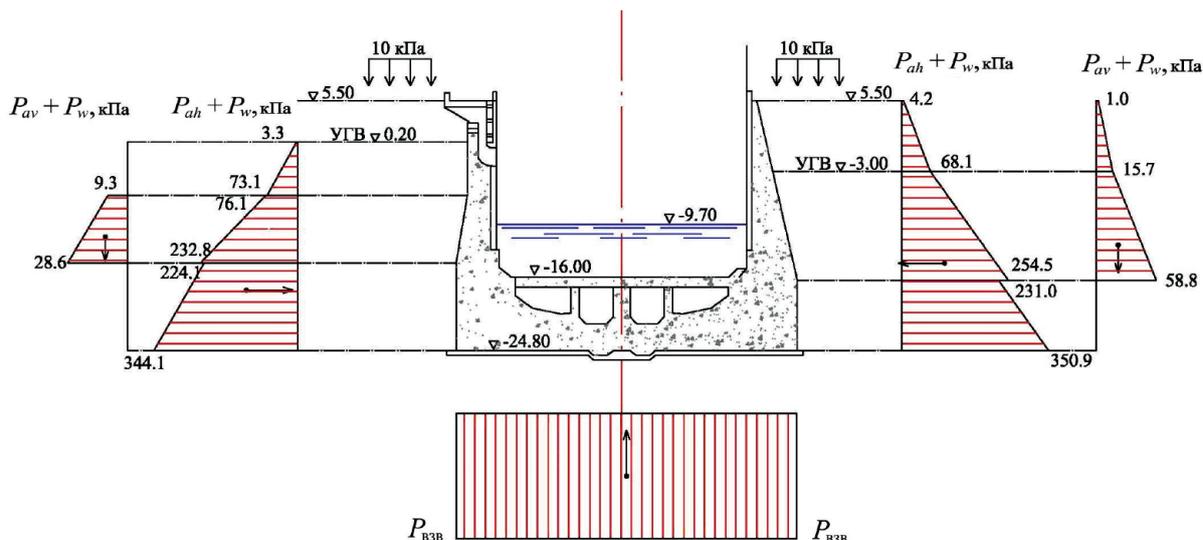


Рис. 3. Расчетные схемы для верхней камеры шлюзов

а)



б)

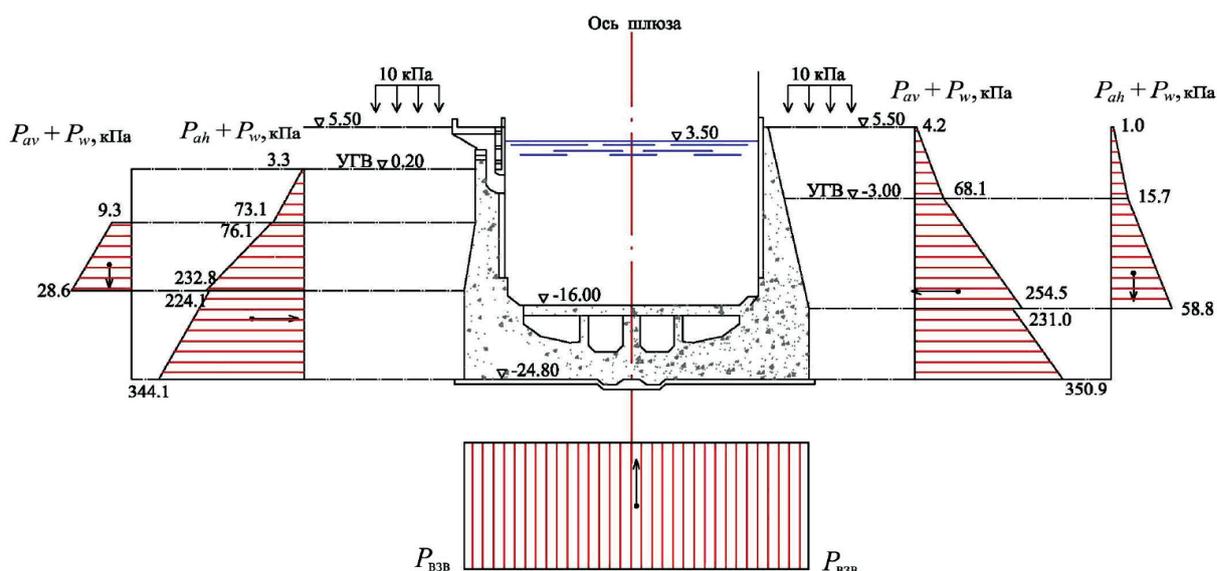


Рис. 4. Расчетные схемы для нижней камеры шлюзов:  
а — при опорожненной камере; б — при наполненной камере

### Методика моделирования железобетонных конструкций камер шлюзов совместно с основанием

Для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций стен шлюзов используются различные методы и математические модели [4] – [8], в том числе и позволяющие учесть влияние температурного режима [9], [10]. Для расчетов камер шлюзов Волгоградского гидроузла в настоящей работе были разработаны математические конечно-элементные модели нижних и верхних камер шлюзов с учетом блочного строения и фактического армирования в рамках методики численного моделирования массивных железобетонных гидросооружений. При этом в конечно-элементных моделях воспроизводились конструктивные особенности камер шлюзов (в том числе такие как расположение контактных строительных швов, ослабляющих конструкцию; схемы армирования элементов конструкций и др.); особенности характера действия нагрузок (включая давление воды и грунта в основании и в засыпке стен, противодействие в рас-

крившихся блочных швах и др.); физико-механические характеристики материалов сооружения, грунтов основания и засыпки стен и др.

Расчеты проводились итерационным путем. На каждом последующем этапе расчетов конечно-элементные модели корректировались с учетом полученных на предыдущих этапах результатов.

Взаимодействие с грунтом основания учитывалось включением в расчетную схему достаточно большого объема грунта. Расчетная толща массива основания принималась в модели таким образом, чтобы на нижней грани выделенного фрагмента основания величина сжимающих напряжений не превышала 20 % от величины бытовых напряжений. Основание моделировалось полойно с учётом геологического строения, принятого для расчётной области.

Нагрузки, передаваемые на тыловые грани стен от давления грунта засыпки, от фильтрационного давления воды в засыпке, а также от давления воды на лицевые грани стен, моделировались в соответствии с расчетными схемами, приведенными на рис. 3 и 4. Нагрузки от давления грунта засыпки на тыловые грани стен камер шлюзов моделировались силами, приложенными в узлах аппроксимирующей сетки, нагрузки от воды — давлением на соответствующие конечные элементы.

Пример конечно-элементных моделей нижних камер шлюзов представлен на рис. 5, пример цветовых полей распределения температур в конструкциях нижних камер шлюзов — на рис. 6.

а) б)

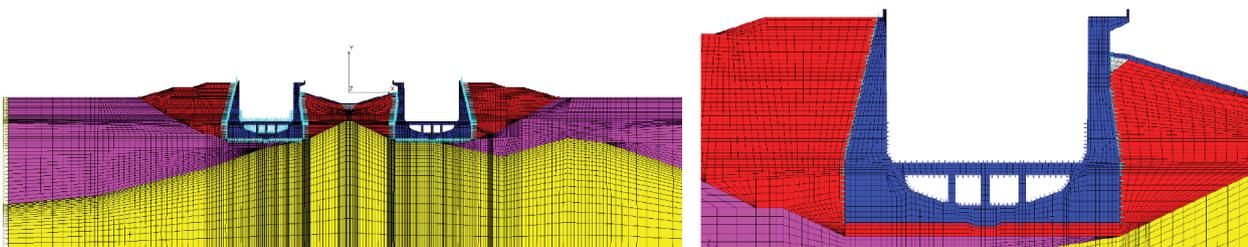


Рис. 5. Общий вид конечно-элементной модели нижних камер шлюзов (а);  
 Фрагмент конечно-элементной модели нижней камеры шлюза (б)

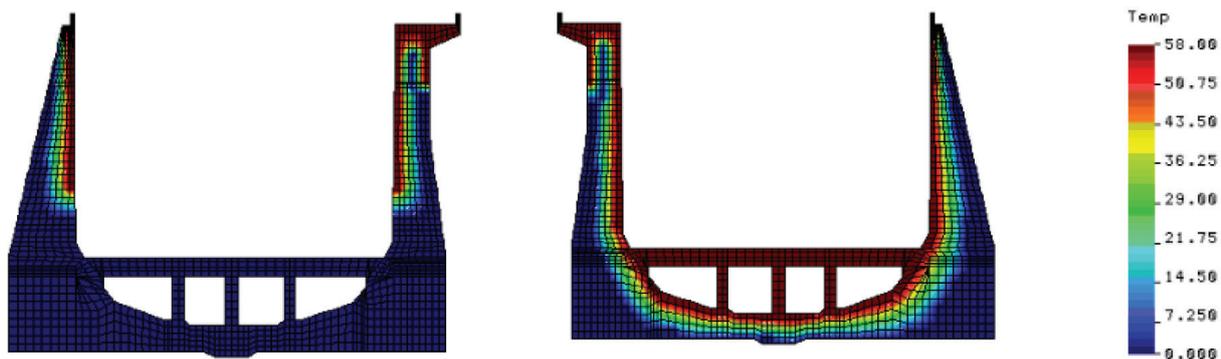


Рис. 6. Цветовые поля распределения температурного перепада «зима – лето»  
 в конструкциях нижних камер шлюзов

### Анализ результатов расчета и сопоставление их с данными натуральных наблюдений

С использованием разработанной методики были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций камер шлюзов для всех шести упомянутых выше расчетных случаев. Примеры результатов расчета шлюза № 31 в виде цветовых полей распределения максимальных главных напряжений, вертикальных и горизонтальных перемещений, а также картина деформированного состояния конструкций камер шлюзов приведены на рис. 7 – 11.

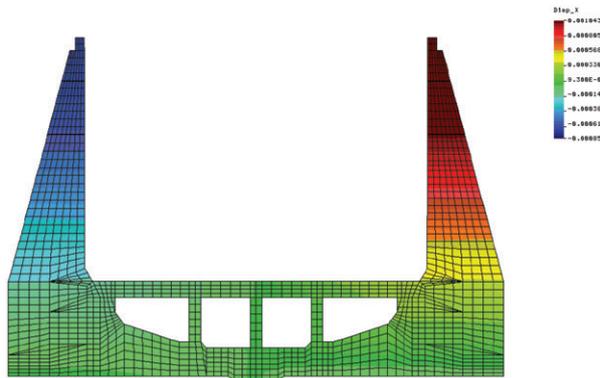


Рис. 7. Цветовые поля распределения горизонтальных перемещений в конструкциях верхней камеры шлюза № 31 в эксплуатационном случае в период навигации при наполненной камере шлюза

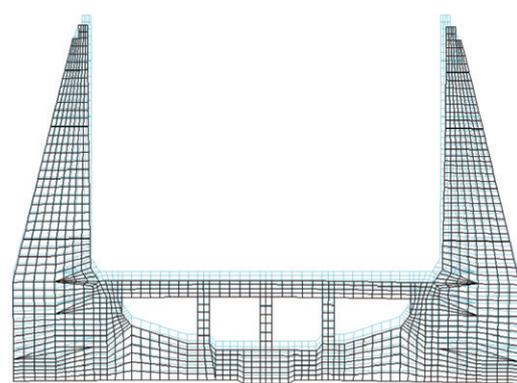


Рис. 8. Деформированное состояние конструкции верхней камеры шлюза № 31 в эксплуатационном случае в период навигации при наполнении камеры (наполненная и осушенная камеры)

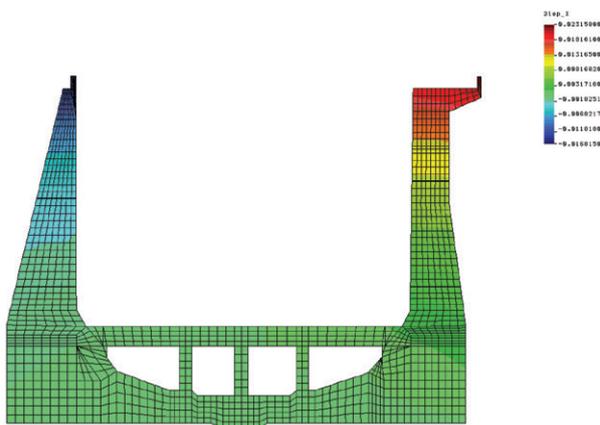


Рис. 9. Цветовые поля распределения горизонтальных перемещений в конструкциях нижней камеры шлюза № 31: ремонтный случай, камера осушена, летняя температура +40 °С, в засыпке +10 °С, без учета отпора грунта засыпки (развал 39,9 мм)

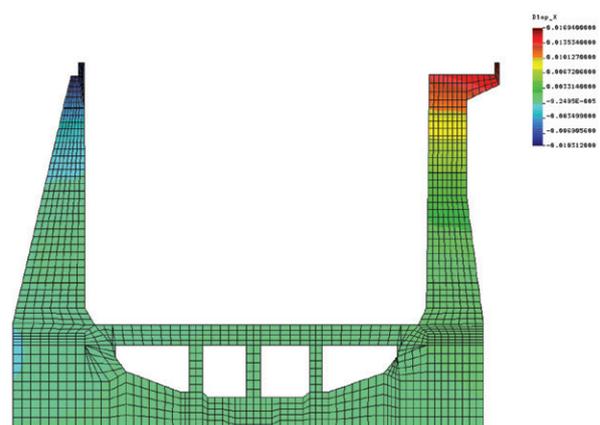


Рис. 10. Цветовые поля распределения горизонтальных перемещений в конструкциях нижней камеры шлюза № 31: ремонтный случай, камера осушена, летняя температура +40 °С, в засыпке +10 °С, с учетом отпора грунта засыпки (развал 27,2 мм)

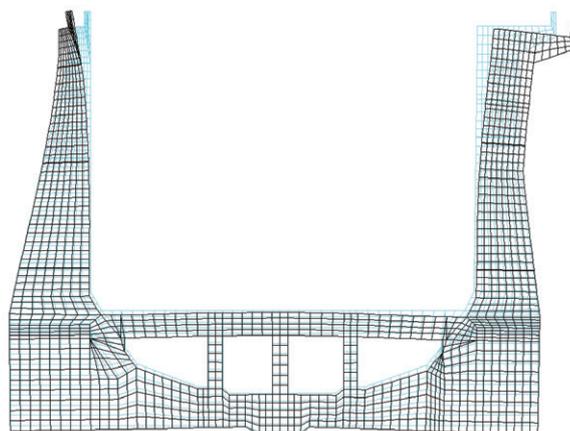


Рис. 11. Деформированное состояние конструкции нижней камеры шлюза в эксплуатационном случае в период навигации при опорожнении камеры с учетом температурного перепада «зима – лето»

Анализ результатов расчетов для эксплуатационного случая в период навигации при опорожнении камер с учетом температурного перепада «зима – лето» показал следующее:

– развал стен верхней камеры (амплитуда сезонных перемещений) в летний период относительно зимнего периода составил 26,9 мм, что согласуется с данными натурных наблюдений (от 20 мм до 27 мм);

– развал стен нижней камеры (амплитуда сезонных перемещений) в летний период относительно зимнего периода составил 28,8 мм, что согласуется с данными натурных наблюдений (от 22 мм до 29 мм).

Из анализа результатов выполненных расчетов в эксплуатационном случае в период навигации при наполнении и опорожнении камер шлюзов можно заключить:

развал стен верхней камеры при наполнении-опорожнении составил 2,1 мм, развал стен нижней камеры при наполнении-опорожнении составил 2,5 мм, что согласуется с данными натурных наблюдений (от 1,8 мм до 2,5 мм).

В эксплуатационном случае в период навигации при опорожнении с учетом летней температуры получилось следующее:

– максимальные значения растягивающих напряжений в конструкциях камер шлюзов отмечаются на тыловой грани стенок в зоне нижнего межблочного шва (до 2,235 МПа в стенке верхней камеры и до 2,37 МПа в стенке нижней камеры); по результатам расчетов в продольной вертикальной арматуре, пересекающей данные швы, напряжения достигают 164 МПа в стене верхней камеры и 178 МПа в стене нижней камеры, что согласуется с данными натурных наблюдений (до 180 – 200 МПа).

Расчеты в ремонтном случае при осушенной камере с учетом летней температуры дали следующие результаты:

– верхняя камера: летняя температура + 40 °С, в засыпке + 10 °С — без учета отпора грунта засыпки развал — 30,6 мм; с учетом отпора грунта засыпки развал — 19,7 мм;

– нижняя камера: летняя температура + 40 °С, в засыпке + 10 °С — без учета отпора грунта засыпки развал – 39,9 мм; с учетом отпора грунта засыпки развал — 27,2 мм.

### Заключение

В процессе создания и отладки математической модели были выполнены расчеты различных случаев функционирования гидроузла, сопоставление результатов которых проводилось с данными натурных наблюдений.

Расчеты напряженно-деформированного состояния системы «две камеры, основание и засыпки» показали, что ни на шлюзе № 30, ни на шлюзе № 31 нет дефектных узлов или конструктивных недоработок, которые могли бы создать проблемы с точки зрения устойчивости и прочности всей конструкции. Реализованные по проекту камеры относятся к классическому типу сооружения и гораздо более надежны, нежели разрезные камеры шлюза.

Выполненные расчеты подтвердили, что расчетные напряжения и деформации соответствуют фактически наблюдаемым. Это свидетельствует о том, что эксплуатируемые шлюзы находятся в нормальном эксплуатационном состоянии и наблюдаемый некоторый рост напряжения и перемещений верха стен не является опасным. Тем не менее, эти обстоятельства требуют более тщательного контроля.

Кроме того, следует отметить, что при расчетах в качестве исходных данных использовались характеристики грунтов, взятые из проектных материалов. Определение реальных характеристик грунтов основания и засыпок после многих лет функционирования сооружений представляет собой отдельную достаточно сложную задачу. Не удалось также смоделировать точные прочностные и деформационные характеристики элементов камеры из-за наличия строительных швов и длительных изменений в свойствах использованных материалов. Поэтому говорить о точности и адекватности результатов, полученных с использованием разработанной математической модели, можно лишь условно, так как понятно, что соответствие результатов расчета натурным процессам определяется точностью исходных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС. Технический отчет о проектировании и строительстве: в 2 т. — М.: Энергия, 1965. — Т. I. — 650 с.
2. Декларация безопасности Волгоградского гидроузла в составе: шлюза № 30, шлюза № 31, Межшлюзовой ГЭС с подводящими и отводящими лотками и водосбросом № 36 ФБУ «Волго-Дон». — Волгоград, 2012.
3. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. — М.: Минрегион России, 2012. — 109 с.
4. *Зенкевич О.* Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. — М.: Мир, 1986. — 318 с.
5. *Гольдин А. Л.* Расчет осадок и кренов центральной секции шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала / А. Л. Гольдин, М. А. Колосов, К. П. Моргунов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 3. — С. 15–21.
6. *Голоскоков Д. П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния камеры судоходного шлюза с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков, В. А. Данилюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 4. — С. 16а–21.
7. *Голоскоков Д. П.* Моделирование напряженно-деформированного состояния упругих тел с помощью полиномов / Д. П. Голоскоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 8–14.
8. *Левачев С. Н.* Напряженно-деформированное состояние бетона стен камер шлюзов канала имени Москвы / С. Н. Левачев, Т. С. Федорова // Вестник МГСУ. — 2013. — № 8. — С. 137–149.
9. *Семенов А. А.* Влияние отрицательных температур на напряженно-деформированное состояние стен камер судоходных шлюзов: дис. ... канд. техн. наук / Семенов А. А. — СПб.: СПГУВК, 2005.
10. *Моргунов К. П.* Оценка технического состояния камеры шлюза по тепловому состоянию его элементов / К. П. Моргунов, А. А. Кардаков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 22а–28.

## ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE ELEMENTS LOCK CHAMBER VOLGOGRAD HYDROELECTRIC COMPLEX UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

*These observations and measurements of the deformations of the walls of the Volgograd hydroelectric camera gateways in recent years have shown a change of parameters that characterize the state of the buildings and structures. To evaluate the stress-strain state of the walls gateways cameras mathematical finite element models were developed by the lower and upper chambers of gateways based on the block structure and the actual reinforcement. The calculations of the system, «the two chambers, the base and backfill» for six different gateway modes of operation (maintenance and repair, including taking into account the seasonal temperatures and temperature extremes «winter – summer») confirmed that no gateway number 30 or the gateway number 31 is not defective components or structural defects that could create problems in terms of stability and strength of the whole structure. Calculated stresses and strains correspond actually observed, which indicates that the locks are in good operating condition.*

*Keywords: ship lock, filling and emptying of the lock chamber, stress-strain state of concrete structures lock chamber, physico-mechanical properties of soils, a mathematical finite element model.*

## REFERENCES

1. Volzhskaja GJeS im. XXII sezda KPSS. Tehnicheskij otchet o proektirovanii i stroi-telstve. M., 1965. Vol. I.
2. Deklaracija bezopasnosti Volgogradskogo gidrouzla v sostave: shljuzu № 30, shljuzu № 31, Mezshljuzovoj GJeS s podvodjashhimi i otvodjashhimi lotkami i vodosbrosom № 36 FBU «Volgo-Don». Volgograd, 2012.
3. Russian Federation. Set of rules. SP 131.13330.2012 Stroitel'naja klimatologija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 23-01-99\*. M.: Minregion Rossii, 2012.
4. Zenkevich, O., and K. Morgan. *Konechnye jelementy i approksimacija*. Trans. M., 1986.

5. Goldin, A. L., M. A. Kolosov, and K. P. Morgunov. "Calculation for settlement and slant of central part of hydraulic lock № 5 of Volga-Don inland navigation channel." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommu-nikacij* 3 (2009): 15–21.

6. Goloskokov, D. P., and V. A. Daniljuk. "Modelling of the intense-deformed condition of the navigable sluice chamber by means of polynoms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4 (2011): 16–21.

7. Goloskokov, D. P. "Simulation of stress-strain state of elastic bodies with polynomials." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2013): 8–14.

8. Levachev, Stanislav Nikolaevich, and Tat'yana Sergeevna Fedorova. "Stress-strain state of concrete in the walls of lock chambers of the Moscow channel." *Vestnik MGSU* 8 (2013): 137–149.

9. Semenov, A. A. Vliyanie otricatelnyh temperatur na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie sten kamer sudohodnyh shljuzov. PhD diss. SPb.: SPGUVK, 2005.

10. Morgunov, K. P., and A. A. Kardakov. "The assessment of the technical condition of the sluice by thermo condition of its elements." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 22–28.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Моргунов Константин Петрович* — кандидат технических наук, доцент.  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*morgunovkp@gumrf.ru*  
*Красникова Марина Валерьевна* — аспирант.  
 Научный руководитель:  
*Моргунов Константин Петрович*.  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
*mvkrasnikova@yandex.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Morgunov Konstantin Petrovich* — PhD, associate professor.  
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
*morgunovkp@gumrf.ru*  
*Krasnikova Marina Valerievna* — postgraduate.  
 Supervisor:  
*Morgunov Konstantin Petrovich*.  
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
*mvkrasnikova@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-85-94  
 УДК 627.8

**М. А. Колосов,  
 Н. В. Селезнёва**

### ЗАЩИТА ОТ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ ПОСРЕДСТВОМ УСТРОЙСТВА РУСЛОВЫХ ПОРОГОВ

В статье рассмотрены актуальные для горных районов средства борьбы с дождевыми паводками. Приведен обзор западного опыта по расчисткам русел рек и эффективности малых водохранилищ, задерживающих паводковый сток. Проанализировано действие расчистки русла и приведено обоснование недостаточности русловых расчисток для увеличения пропускной способности водотока. Рассчитаны необходимые размеры поперечного сечения водопропускного канала, требуемые для обеспечения пропуска паводкового расхода воды в р. Адагум. Рекомендуются противопаводковая система защиты бассейна р. Адагум с помощью временных водохранилищ-«ловушек», задерживающих дождевой сток в русле реки, образованных порогами. Приведены конструкции порогов с учетом пропуска межennenного стока воды и рыбопропуска. Предложены конструктивные схемы порогов из разных материалов. Представлены конструкции порогов с различными формами водосливов. Изложены расчетные формулы для определения необходимого количества порогов, сооружаемых в русле реки и среднего объема воды, задерживаемого в водохранилище, образованном одним порогом. Сделан вывод о надежности противопаводковой системы, состоящей из «сухих» водохранилищ, распределяющих по времени сток паводковых объемов воды к населенному пункту.

Ключевые слова: дождевые паводки, регулирование, противопаводковые водохранилища, временно заполняемые водохранилища, пороги, плотины, «сухие» водохранилища.