

УДК 502/504: 626.4

Т.К. КСЕНОФОНТОВА, А.Г. ЖУРАВЛЕВА, СЮЙ ЧУНЫЦЗЯН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСОЛЬНЫХ И КОНТРФОРСНЫХ ПОДПОРНЫХ СТЕН НАПРАВЛЯЮЩИХ И ПРИЧАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ШЛЮЗОВ НА ОСНОВЕ РАСХОДА МАТЕРИАЛОВ

При проектировании размеры шлюзов и расположенных рядом с ними направляющих и причальных сооружений должны приниматься такими, чтобы обеспечивалась их долговечность. Целью исследований стало определение области эффективного использования консольных и контрфорсных подпорных стен в качестве направляющих и причальных сооружений судоходных шлюзов. В качестве методов исследований принято выполнение расчетов подпорных стен с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР 2014» при различных видах грунтового основания и обратной засыпки. Для выполнения дополнительных расчетов использовалась программа «ЭСПРИ». При определении эффективности подпорных стен рассматривались направляющие сооружения в целом, так как они имеют сложную форму в плане, а для причальных сооружений расчеты выполнялись для секции длиной 20 м. В результате расчетов получено, что расход и стоимость материалов, бетона и арматуры были наименьшими при использовании консольных стен высотой до 3,7...4 м, при большей высоте расход и стоимость материалов были меньшими у контрфорсных подпорных стен. С увеличением их высоты разность только увеличивается: при $H = 6$ м она составляет для направляющих сооружений 1,14 млн руб., для причальных сооружений – 0,36 млн руб.; при $H = 8$ м для направляющих сооружений – 2,63 млн руб., для причальных сооружений – 0,78 млн руб.; при $H = 10$ м – соответственно 8,0 млн руб. и 2,25 млн руб. На основе проведенных исследований были сделаны следующие выводы: при высоте напорной грани подпорных стендов 3,7...4,0 м в качестве направляющих и причальных сооружений шлюзов рекомендуется использовать консольные подпорные стены, так как они при этих параметрах являются более эффективными. При большей высоте эффективными являются контрфорсные подпорные стены.

Судоходные шлюзы, направляющие и причальные сооружения, метод конечных элементов, внутренние усилия, жесткость сечений, трещиностойкость сечений, расход бетона, расход арматуры.

Введение. В гидротехническом строительстве при проектировании водных магистралей часто предусматриваются судоходные шлюзы, призванные обеспечить пропуск судов в местах перепада уровней воды в реках и каналах. Шлюзы со стороны верхней и нижней головы имеют направляющие и причальные сооружения, которые могут быть сделаны из уголкового подпорных стен, в частности, из консольных и контрфорсных стен, выполненных из железобетона. Эти сооружения имеют достаточно большую протяженность и высоту, поэтому вопрос выбора наиболее экономичной их конструкции имеет большое значение. При эксплуатации шлюзов и их сооружений должна быть обеспечена необходимая долговечность. Для этого в расчетах требовалось, чтобы элементы подпорных стен направляющих и причальных сооружений имели такую толщи-

ну, при которой в процессе эксплуатации и строительства в них не образовывались трещины. Одним из показателей экономичности сооружений является показатель расхода материалов. Ввиду этого целью исследований было выяснение оптимальных областей использования конструкций консольных и контрфорсных подпорных стен при наименьшем расходе бетона и арматуры с учетом обеспечения их долговечности.

Материалы и методы исследований. В расчетах были рассмотрены подпорные стены из монолитного железобетона направляющих и причальных сооружений для пропуска судов длиной от 80 до 120 м и шириной от 10 до 15 м. Был принят класс бетона – В25, класс арматуры – А500. Высота подпорных стен варьировалась от 6 до 10 м. Направляющее сооружение в плане на участке, примыкающем к шлюзу, было очерчено

по окружности до пересечения по дну с подходным каналом, далее располагался прямолинейный участок, пересекающийся с откосом (рис. 1). Траектория причального сооружения соответствовала прямой.

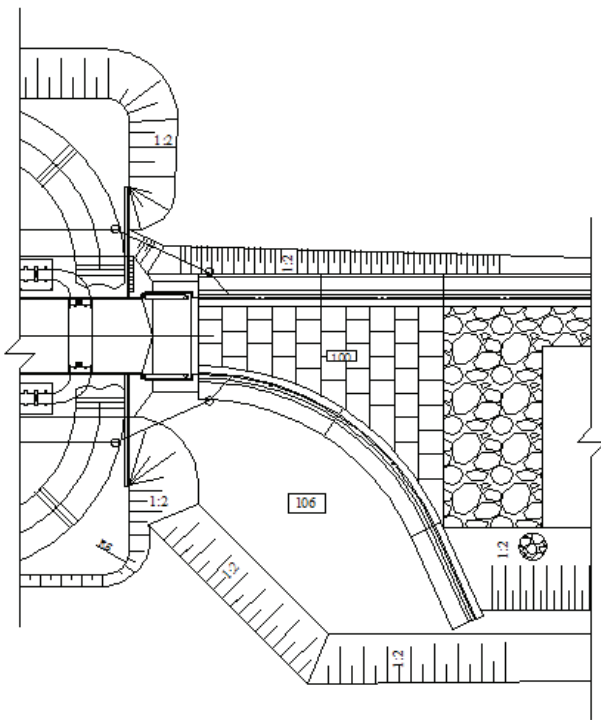


Рис. 1. Направляющее и причальное сооружения шлюза в плане

По длине сооружения были разбиты деформационными швами: направляющее сооружение – на три секции с длиной участков в криволинейной части примерно 25 м; при-

чальное сооружение имело длину секций, равную 20 м. Предварительные размеры поперечных сечений подпорных стен принимались в соответствии с рекомендациями [1, 2].

Расчет подпорных стен выполнялся методом конечных элементов с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР 2014». При моделировании использовались преимущественно квадратные конечные элементы с размерами 0,5 х 0,5 м оболочечного типа (рис. 2). При моделировании контрфорсов использовались также треугольные конечные элементы.

Сравнение эффективности использования консольных и контрфорсных подпорных стен для направляющих и причальных сооружений шлюзов проводилось на примере грунтового основания и обратной засыпки, сложенной супесью. В качестве модели грунтового основания использовалась модель П.Л. Пастернака с двумя коэффициентами постели, реализованная в ПК «ЛИРА-САПР 2014».

В расчетной модели грунтового основания учитывалось влияние на работу подпорных стен расположенной рядом с ними секции судоходного шлюза, как показано на рисунке 3. Там же квадратами с цифрами приведено расположение условных скважин, по которым в ПК «ЛИРА-САПР 2014» формировались параметры модели грунтового основания. Моделирование трения фундаментной плиты по грунту выполнялось с помощью одноузловых конечных элементов № 56.

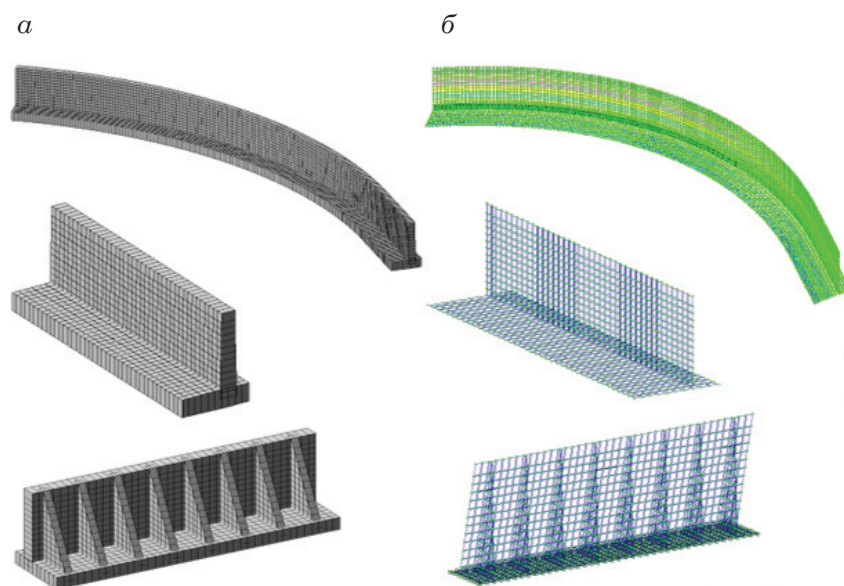


Рис. 2. Расчетные модели консольных и контрфорсных подпорных стен направляющих и причальных сооружений шлюзов:

- а – полнотелые конечно-элементные модели;
- б – конечно-элементные модели, использованные в расчете

Нагрузками на подпорные стены являлись собственный вес стены, вертикальное и боковое давление грунта, гидростатическое и взвешивающее давление воды, нагрузка от навала судов. Боковое давление грунта и нагрузка от навала судов определялись по [5].

При расчетах рассматривались 4 случая работы.

1 случай – когда со стороны лицевой и тыловой граней подпорной стены гидростатическое давление воды в подходном

канале и гидростатическое давление грунтовых вод соответствуют нормальному подпорному уровню (НПУ);

2 случай – когда уровень воды находится на максимальной отметке;

3 случай – когда уровень воды находится на отметке минимального возможного уровня;

4 случай – строительный, когда в подходном канале нет воды и нет грунтовой воды со стороны тыловой грани подпорной стены.

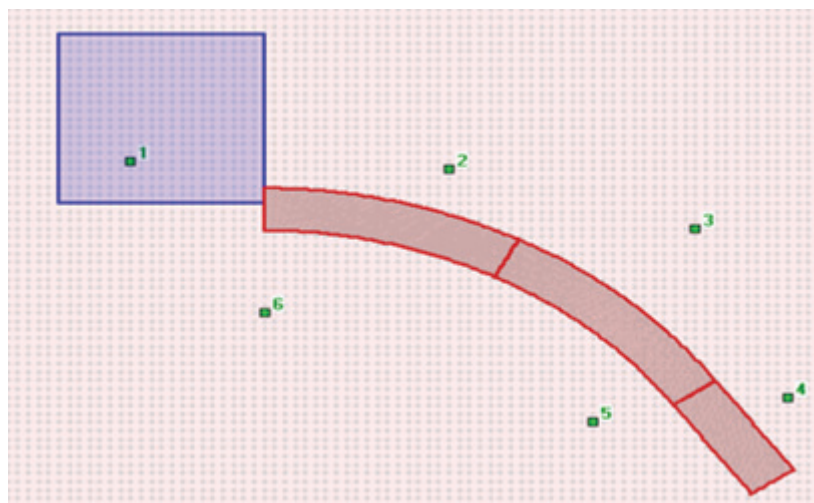


Рис. 3. К моделированию грунтового основания под фундаментной плитой подпорных стен

На основе исходных данных в ПК «ЛИРА-САПР 2014» были выполнены статические расчеты, в результате которых были получены внутренние усилия в подпорных стенах. Далее по максимальным внутренним усилиям проверялась трещиностойкость сооружений в опасных сечениях в соответствии с [4] по условию:

$$M \leq M_{cre}, \quad (1)$$

где M – изгибающий момент в опасном сечении; M_{cre} – момент трещиностойкости этого сечения.

Моменты трещиностойкости M_{cre} вычислялись в соответствии с [5]. В таблице 1 приведены их значения без учета арматуры при различной толщине плиты.

Таблица 1

Моменты трещиностойкости M_{cre}

Толщина плиты, см	50	100	150	200	250	300
$M_{cre},$ кН·м/м	83,95	335,83	755,62	1343,33	2098,95	3022,50

Необходимая для обеспечения условия трещиностойкости (1) толщина плиты подпорной стены определялась интерполяцией с помощью полинома Лагранжа по программе «ЭСПРИ», как показано на рисунке 4 на примере определения толщины вертикальной плиты консольной подпорной стены причального сооружения. В поле

«Значение функции» вводились данные таблицы 1 – толщины плиты и соответствующие им моменты трещиностойкости. В поле «Искомые значения функции» в строке X вводилась величина наибольшего (наименьшего) момента по модулю. Значение толщины плиты появлялось в этом же поле в строке F .

При найденных размерах проверялась устойчивость подпорных стен на сдвиг и опрокидывание в соответствии с [3] по условию

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R, \quad (2)$$

где F и R – расчетные значения обобщенных сдвигающих сил и сил предельного сопротивления или моментов сил, стремящихся сдвинуть (повернуть) и удержать систему «Сооружение-основание»; γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок; γ_c – коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент надежности по степени ответственности сооружения.

После уточнения размеров вновь повторялся статический расчет подпорных

стен, и на основе уточненных внутренних усилий по ПК «ЛИРА-САПР 2014» определялось их необходимое армирование.

Результаты исследований и их обсуждение. В таблице 2 приведено сравнение стоимости материалов, бетона и арматуры, необходимых для строительства подпорных стен направляющих и причальных сооружений с учетом обеспечения их трещиностойкости. В расчете учитывался расход материалов для направляющих сооружений на всю их длину ввиду их сложного очертания в плане, а для причальных сооружений – для секции длиной 20 м.

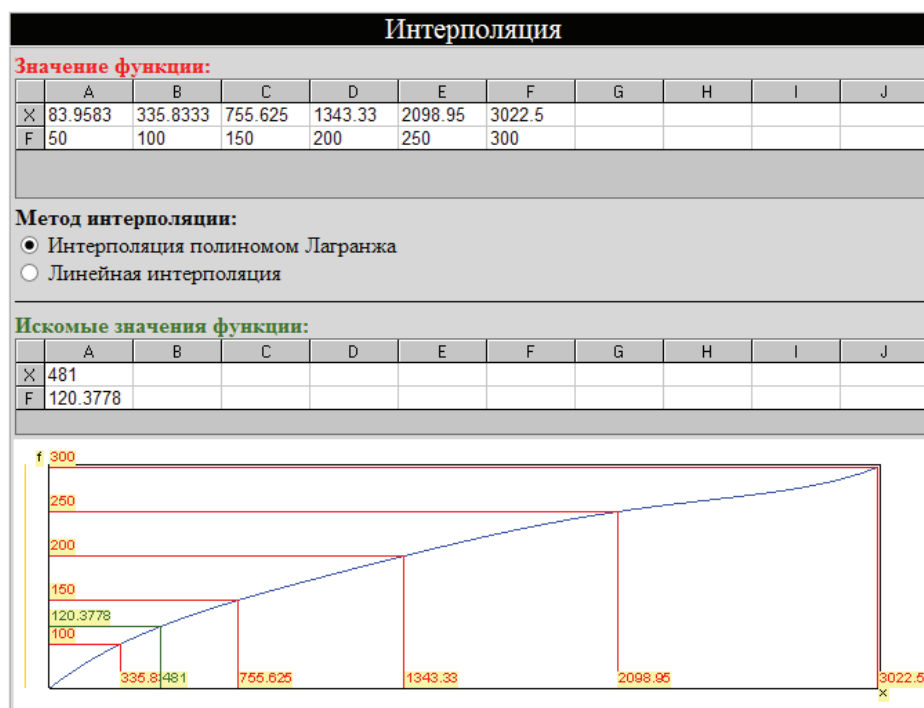


Рис. 4. Определение необходимой толщины вертикальной плиты консольной подпорной стены причального сооружения с высотой напорной грани 6 м при грунтах основания и обратной засыпки из супеси

Таблица 2

Стоимость вариантов подпорных стен направляющих и причальных сооружений на основе расхода материалов

Тип подпорной стены	Высота подпорной стены, м	Стоимость варианта секции направляющего сооружения, руб.	Стоимость варианта секции причального сооружения, руб.
Консольная подпорная стена	6	7020663,4	2228775,7
	8	13038540,8	3891971,9
	10	24908276,6	7016191,2
Контрфорсная подпорная стена	6	5881148,6	1867250,4
	8	10408246,7	3115837,6
	10	16909070,3	4762966,7

Как следует из приведенной таблицы, при высоте подпорных стен 6...10 м более экономичными являются контрфорсные подпорные стены. При этом с увеличением их высоты разность в расходе материалов увеличивается. Для определения областей эффективного использования каждой из конструкций консольных и контрфорсных стен с помощью программы «ЭС ПРИ» были найдены значения высот, при которых разность в расходе материалов была равна нулю. Из рисунков 5 и 6 следует, что при

высоте подпорных стен направляющих сооружений менее 4,0 м более эффективными являются конструкции консольных подпорных стен, а при высоте больше 4,0 м более эффективными являются конструкции контрфорсных подпорных стен. Аналогично для причальных сооружений: при высоте менее 3,7 м более эффективными являются конструкции консольных подпорных стен, а при высоте больше 3,7 м более эффективными являются конструкции контрфорсных подпорных стен.

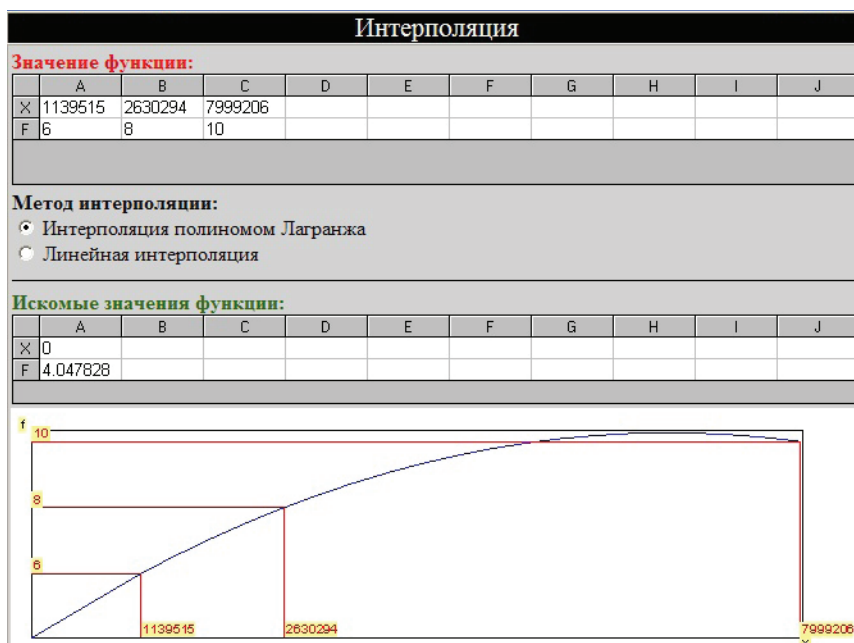


Рис. 5. Определение границы эффективного использования конструкций консольных и контрфорсных подпорных стен направляющих сооружений

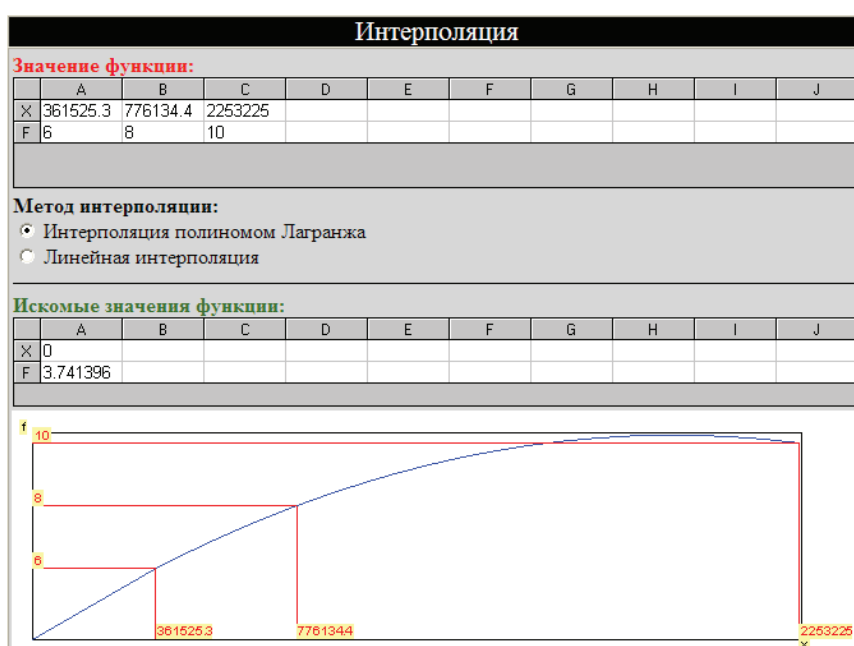


Рис. 6. Определение границы эффективного использования конструкций консольных и контрфорсных подпорных стен причальных сооружений

Выводы

1. Для обеспечения долговечности подпорных стен направляющих и причальных сооружений необходимо назначать размеры их поперечных сечений так, чтобы в них при эксплуатации и строительстве не образовались трещины.

2. Как показали расчеты, для направляющих и причальных сооружений шлюзов более эффективными по стоимости материалов являются при высоте менее 3,7...4,0 консольные подпорные стены. При большей высоте более экономичными конструкциями являются контрфорсные подпорные стены.

Библиографический список

1. Ксенофонтова Т.К., Нью Фудун. Железобетонные подпорные стены, выбор расстояния между контрфорсами // Сб. материалов Международной научно-практической конференции «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения. Ч. III: Безопасность гидротехнических сооружений. – М.: МГУП, 2011. – С. 106-111.

2. Ксенофонтова Т.К., Чумичева М.М. Железобетонные подпорные стены: Учебное пособие. – М.: МГУП, 2010. – 153 с.

3. СП 23.13330. 2011. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85*. Введен в действие 20.05.2011 г. / <http://docs.cntd.ru/document/1200084539>. Дата обращения – 26.10.2016 г.

4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положен-

ия. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Пересмотр СП 63.13330.2011 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Введен в действие 1.01.2013 г. (<http://docs.cntd.ru/document/1200095246>. Дата обращения – 26.10.2016.

5. СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87. Введен в действие 1.01.2013 г. (<http://docs.cntd.ru/document/1200095534>. Дата обращения – 26.10.2016 г.)

Материал поступил в редакцию 08.08.2016 г.

Сведения об авторах

Ксенофонтова Татьяна Кирилловна (KsenofontovaTatyana), кандидат технических наук, профессор, доцент, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, Москва, ул. Б. Академическая, д.44; тел.: +79168564851; e-mail: Ksentanya@yandex.ru

Журавлева Анна Геннадьевна (ZhuravlevaAnna), кандидат технических наук, профессор, доцент, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, Москва, ул. Б. Академическая, д.44; тел.: +79169460766; e-mail: annagg@mail.ru

Суй Чуньцзян (SuyThunzyan), магистр, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, Москва, ул. Б. Академическая, д.44; тел.: +79672345343; e-mail: 991521777@qq.com

T.K. KSENOFONTOVA, A.G. ZHURAVLEVA, SUY THUNZYAN

Federal state budget educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow

THE EFFICIENCY OF USAGE OF CANTILEVER AND BUTTRESS RETAINING WALLS OF GUIDING AND BERTHING STRUCTURES OF LOCKS ON THE BASIS OF MATERIALS CONSUMPTION

When designing, dimensions of locks and located next to them guiding and berthing structures should be taken as ones which could provide their durability. The aim of research was determination of the area of efficient usage of cantilever and buttress walls as guiding and berthing structures of ship locks. As methods of investigations, calculations of retaining walls were fulfilled using a software complex «LIRA-SAPR2014» for different kinds of soil foundation and backfill. When determining the effectiveness of retain walls there were considered guiding structures in whole as they have a complex form in the plan, and for mooring structures calculations were fulfilled for a section of the 20 m length. As a result of calculations it was found that consumption and cost of materials, concrete and armature were the smallest when using cantilever retaining walls. With the growth of the height the difference only increases: at $H = 6$ m it is 1.14 mln rbls for guiding facilities, for mooring structures – 0.36 mln rbls; at $H = 8$ m for guiding facilities – 2,63 mln rbls, for mooring structures – 0.78 mln rbls; at $H = 10$

m – correspondingly 8.0 mln rbls and 2.25 mln rbls. Based on the conducted investigations the following conclusions were drawn: at the height of the upstream side of retaining stands of 3.7...4.0 m as guiding and mooring structures it is recommended to use cantilever retaining walls as they are more effective under these parameters. At a bigger height buttress retaining walls are more effective.

Ship locks, guiding and berthing facilities, finite element method, internal forces, stiffness of cross-sections, fracture resistance, consumption of concrete, consumption of armature.

Reference

1. **Ksenofontova T.K., Nyu Fudun.** Zhelezobetonnye podpornye steny, vybor rassoyaniya mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii «Problemy razvotiya melioratsii i vodnogo hozyaistva i puti ih resheniya. Ch. III: Bezopasnostj gydrotehnicheskikh sooruzhenij. – M.: MGUP, 2011. – S. 106-111.

2. **Ksenofontova T.K., Chumucheva M.M.** Zhelezobetonnye podpornye steny: Uchebnoye posobie. – M.: MGUP, 2010. – 153 s.

3. SP 23.13330. 2011. Osnovaniya gydrotehnicheskikh sooruzhenij. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.02-85*. Vveden v dejstvie 20.05.2011 r. / <http://docs.cntd.ru/document/1200084539>. Data obrashcheniya – 26.10.2016 r.

4. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 52-01-2003. Peresmotr SP 63.13330.2011 «SNIp 52-01-2003 Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Vveden v dejstvie 1.01.2013 g. (<http://docs.cntd.ru/document/1200095246>). Data obrashcheniya – 26.10.2016.

5. SP 101.13330.2012. Podpornye steny, sudohodnye shlyuzy, rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.06.07-87. Vveden v dejstvie 1.01.2013 g. (<http://docs.cntd.ru/document/1200095534>). Data obrashcheniya – 26.10.2016 g.)

The material was received at the editorial office
08.08.2016

Information about the authors

Ksenofontova Tatyana Kirillovna, candidate of technical sciences, professor, associate professor, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, d. 44; tel.: +79168564851; e-mail: Ksentanya@yandex.ru

Zhuravleva Anna Gennadjevna, candidate of technical sciences, professor, associate professor, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, d. 44; tel.: +79169460766; e-mail: annagg@mail.ru

Suy Thunzyan, master, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, ul. B. Academicheskaya, d. 44; tel.: +79672345343; e-mail: 991521777@qq.com