

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653

RENOVATION OF WATER FILLING SYSTEMS FOR THE CHAMBERS OF SHIPPING LOCKS № 1–6 OF THE VOLGA-BALTIC WATERWAY

P. A. Garibin¹, A. V. Bogatov²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — FBI «Administration of the Volga-Baltic basin of inland waterways»,
St. Petersburg, Russian Federation

The development of solutions to increase the capacity of locks № 1–6 of the Federal budget institution «Administration of the Volga-Baltic basin of inland waterways» by changing the parameters of the operated locks corresponds to the priorities and goals of the development of inland water transport of the Russian Federation. The actual problem of increasing the capacity of navigable locks on the Volga-Baltic waterway section of the mouth of the Vytegra River - White Lake, is considered in the paper. Proposals for renovation of shipping locks chambers for simultaneous passage of two large-tonnage vessels with a cargo capacity of about 5000 tons are given. Based on the analysis of the developed options for increasing throughput, the comparative effectiveness of possible solutions to increase the useful dimensions of the chambers without disrupting the existing natural and technical system is evaluated. The analysis of the currently operated systems for filling the chambers of the Volga-Kama basin locks with water and the dimensions of the chambers used in them for passage of large-tonnage design vessels is carried out. To intensify cargo transportation, it is proposed to dispose of non-gallery head systems for filling the lock chambers with water and use simple power distribution systems with side water supply to the middle of the chamber. The main problems of implementing changes in the type of system for filling the lock chambers without decommissioning the structure are identified. It is proposed to supply water to the chambers via large-diameter pipelines. At the same time, water intake will be made from approach channels outside the location of the upper head, which will also reduce the time of ship passage. Depending on the type of chamber – dock or split-bottom, water is supplied directly to the chamber in a concentrated way with a width distribution, or distributed over the area using longitudinal distribution galleries.

Keywords: ship pass, large-tonnage vessels, chamber dimensions, navigable locks, system of filling the chamber with water.

For citation:

Garibin, Pavel A., and Aleksandr V. Bogatov. "Renovation of water filling systems for the chambers of shipping locks № 1-6 of the Volga-Baltic waterway." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 640–653. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653.

УДК 656.628

РЕНОВАЦИЯ СИСТЕМ НАПОЛНЕНИЯ ВОДОЙ КАМЕР СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ № 1–6 ВОЛГО-БАЛТИЙСКОГО ВОДНОГО ПУТИ

П. А. Гарибин¹, А. В. Богатов²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФБУ «Администрация «Волго-Балт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что разработка решений по повышению пропускной способности шлюзов № 1–6 Федерального бюджетного учреждения «Администрация Волго-Балтийского бассейна внутренних водных путей» за счет изменения параметров эксплуатируемых шлюзов соответствует приоритетам и целям развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации. В работе рассмотрена актуальная проблема повышения пропускной способности судоходных шлюзов на участке Волго-Балтийского водного пути устье р. Вытегра – Белое Озеро. Сформулированы предложения по реновации камер судоходных шлюзов для пропуска одновременно двух крупнотоннажных судов грузоподъемностью около 5000 т. На основании анализа разрабатываемых вариантов повышения пропускной способности выполнена оценка сравнительной эффективности возможных решений по увеличению полезных габаритов камер без нарушения

существующей природно-технической системы. Проведен анализ эксплуатируемых в настоящее время систем наполнения водой камер шлюзов Волжско-Камского бассейна и используемых в них габаритов камер при пропуске расчетных судов большой грузоподъемности. Для интенсификации грузовых перевозок предложено утилизировать безгалерейные головные системы наполнения камер шлюзов водой и использовать простые распределительные системы питания с боковым подводом воды в середину камеры. Обозначены основные проблемы по реализации изменения типа системы наполнения камер шлюзов без вывода сооружения из эксплуатации. Предлагается осуществлять подвод воды к камерам по трубопроводам большого диаметра. При этом забор воды будет производиться из подходящих каналов вне расположения верхней головы, что позволит также сократить время судопропуска с учетом того, что в зависимости от типа камеры: доковая или с разрезным днищем, вода подается непосредственно в камеру сосредоточенно с распределением по ширине или распределяется по площади с помощью продольных распределительных галерей.

Ключевые слова: судопропуск, крупнотоннажные суда, габариты камеры, судоходные шлюзы, система наполнения камеры водой.

Для цитирования:

Гарибин П. А. Реновация систем наполнения водой камер судоходных шлюзов № 1-6 Волго-Балтийского водного пути / П. А. Гарибин, А. В. Богатов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 640–653. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653.

Введение (Introduction)

Участок северного склона Волго-Балтийского водного пути (ВБВП) [1], [2], образованный лестницей шлюзов № 1–6, является одной из наиболее загруженных транспортом подсистем Единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации. На отрезке водного пути устье р. Вытегра – Белое Озеро в наиболее интенсивные периоды навигации наблюдается скопление до 180 судов, при этом время прохождения участка Анненский мост – Онежское озеро составляет 34 ч, не считая продолжительности стоянки судов в Белом Озере, составляющей от двух до пяти суток. При этом среднее нормативное время прохода данного участка составляет 17 ч [3]. Недостаточная пропускная способность шлюзованных участков водного пути приводит в настоящее время как к снижению конкурентной способности речных перевозок, так и к повышению риска возникновения аварийных ситуаций. Проведенные многочисленные исследования показали, что с точки зрения совершенствования управленческой составляющей и оптимизации процессов шлюзования возможности повышения пропускной способности практически исчерпаны и для решения проблемы необходима всесторонняя модернизация судопропускных гидросооружений.

Разработка предложений по повышению пропускной способности шлюзов № 1–6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» за счет изменения параметров эксплуатируемых судопропускных сооружений соответствует приоритетам и целям развития внутреннего водного транспорта РФ^{1, 2}. Мероприятия по повышению пропускной способности шлюзов № 1–6 ВБВП основаны на анализе структуры флота с учетом обновления парка судов, обеспечивающих в первую очередь за счет роста тоннажа повышение безопасности судоходства, энергоэффективность и экологичность перевозки грузов по водным путям [4]. Одним из важнейших этапов проектирования судоходных шлюзов является определение полезных и необходимых для безопасного размещения расчетного судна габаритов камеры и выбор типа системы питания (наполнение – опорожнение).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Судоходные шлюзы № 1–6 Северного склона Волго-Балтийского канала 1964 г. постройки (табл. 1) являются средненапорными, однопольными, однокамерными с головной системой питания. Наполнение камер водой — безгалерейное с использованием плоских подъемно-опускных ворот верхней головы. Опорожнение происходит через короткие обходные водопроводные галереи в нижней голове.

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р).

² Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 29 февраля 2016 г. № 327-р).

Таблица 1

**Характеристики судоходных шлюзов
Вытегорского района гидросооружений и судоходства**

Шлюз	Конструкция, полезные габариты камеры*, м	Расчетный напор, м	Длина камеры гашения и успокоительного участка, м	Полная длина камеры, м	Объем сливной призмы, тыс. м ³
	$l_{c,ef} \times b_{c,ef} \times h_l$	H_d	$l_{кг} + l_{уу}$	l_c	W_l
1. Вытегорский гидроузел (шлюз № 1)	с разрезным днищем 268,93 × 17,86 × 4,10	13,10	14,0+6,0	288,93	67,6/62,0
2. Белоусовский гидроузел (шлюз № 2)	с разрезным днищем 268,02 × 17,86 × 4,40	12,75	14,0+6,0	288,02	65,6/62,0
3. Новинкинский гидроузел (шлюз № 3)	с разрезным днищем 268,11 × 17,86 × 3,68	12,90	14,0+6,0	288,11	66,4/62,0
4. Новинкинский гидроузел (шлюз № 4)	доковая 267,25 × 17,95 × 4,02	12,00	14,0 + 6,0	287,25	61,9/62,0
5. Десятинский гидроузел (шлюз № 5)	доковая 267,23 × 17,97 × 4,00	12,75	14,0 + 6,0	287,23	65,8/62,0
6. Десятинский гидроузел (шлюз № 6)	с разрезным днищем 263,60 × 17,82 × 4,08	16,70	18,5 + 6,0	288,10	85,7/99,0

* <http://www.morflot.ru/files/files/перечень%20СГТЦ%282%29.pdf>.

Актуальность рассматриваемого в предлагаемом исследовании вопроса существовала практически с того момента, когда в 1964 г. завершились строительные работы по реконструкции ВБВП под расчетное судно «Волго-Балт» грузоподъемностью 2700 т. За прошедший 56-летний период эксплуатации на ВБВП изменился состав транспортного флота и габариты максимальных судов (табл. 2). Установлено, что за период 1997–2020 гг. количество судов грузоподъемностью 5000–5500 т составляет в среднем 40 % от транзитного флота и их удельный вес увеличивается.

Таблица 2

Габаритные размерения эксплуатируемых судов

Тип (проект)	Длина, м	Ширина, м	Дедвейт, т
1. Волго-Нефть (пр. 1577)	132,6	16,9	5011
2. Волга-Флот (пр. 05074Т)	138,7	16,7	5212
3. Волжский (пр. 05074)	138,4/107,4	16,7	5130/3888
4. Танкер (пр. RST25)	139,9	16,6	5132
5. Танкер (пр. RST27)	140,85	16,7	5378
6. Сухогруз (пр. RSD44)	139,99	16,8	5439
7. Сухогруз (пр. RSD49)	136,95	16,5	4518
8. Балтийский (пр. 781)	96,0	13,0	2122
9. Беломорский (пр. Фин.1000/800)	79,8	11,3	1071,6
10. Окский (пр. 559Б)	85,04	15,03	1760
11. Морской (пр. 1814двт)	90,3	12,3	1804
12. Короленко (пр. 646)	65,2	12,0	170
13. Мег (пр. 10523, 0121)	81,3	11,6	2300
14. Шестая пятилетка (пр. 576, 576А)	93,8	13,22	2104
15. СТ-700 (пр. 2760)	67,06	8,37	722,6
16. СТК (пр. 326)	81,9	11,8	2187
17. Ладога (пр. 787)	82,5	11,4	2075
18. Волго-Балт (пр. 2-95/AR)	113,9	13,0	3474
19. Волго-Дон (пр. 1565)	105,85	16,7	4000

Однако, как видно из данных, приведенных в табл. 1 и 2, совместное шлюзование крупногабаритных судов некоторых типов (№ 1–7) невозможно ввиду недостаточной полезной длины

камеры существующих шлюзов. Увеличение времени судопропуска через шлюзы вызывает значительные простои флота и требует изыскания новых резервов, способных увеличить пропускную способность системы и оптимизировать непроизводительные затраты флота. С целью обоснования необходимости внесения изменений в конструкцию судоходных шлюзов следует принимать во внимание не только структуру флота, обеспечивающего прохождение судов через судоходные шлюзы, но и структуру перевозимых грузов, так как нефтеналивные и сухогрузные суда имеют наибольшую длину.

Основу транзитного грузопотока по ВБВП составляют экспортные грузы, в основном наливные, в направлении на Балтику, большая часть которых перевозится судами грузоподъемностью около 5000 т (см. табл. 1 и 2). Среднегодовое, за период 1996–2017 гг., количество прохода судов грузоподъемностью 5000 т в створе шлюза № 1 составляет 2120 ед. Среднее время оборотного рейса для танкерного флота, работающего на ВБВП, составляет 10–12 дней. Таким образом, с учетом ранее изложенного, количество судов грузоподъемностью 5000 т, осуществляющих перевозки по ВБВП, в среднем составляет $2120 / (200 / (10 \cdot 2)) = 53$ ед., где 200 дней — средняя плановая продолжительность навигационного периода.

С учетом тенденции роста тоннажа и обновления флота, обеспечивающих повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности перевозок водным транспортом основной акцент в анализе статистических данных эксплуатационных показателей по судопропуску сделан на оценке количества пропущенных судов грузоподъемностью 5000 т (далее по тексту — г/п 5000 т) и количестве их одиночных шлюзований. Установлено, что совместное шлюзование двух крупногабаритных судов позволит существенно увеличить пропускную способность шлюзов. При этом следует отметить, что все построенные крупногабаритные шлюзы Единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации, рассчитываемые на пропуск (по длине) именно двух судов грузоподъемностью около 5000 т типа «Волго-Дон», имеют полезную длину камеры $l_{c,ef} = 290$ м, что соответствовало требованиям нормативных документов [4].

Анализируя основные факторы, оказывающие негативное влияние на эффективность работы флота, видно, что главным из них является время судопропуска, которое может быть разложено на две составляющие:

- *машинную составляющую*, зависящую от времени работы механизмов по открытию и закрытию ворот, наполнению и опорожнению камеры шлюза;
- *движенческую составляющую*, зависящую от времени входа и выхода судов из камеры.

Для шлюзов ВБВП машинная составляющая занимает примерно 31–36 % времени судопропуска (рис. 1) и, по сути, без изменения системы питания водой камеры шлюза изменяться не может, поскольку определяется скоростью маневрирования воротами и затворами, а также величиной допустимой гидродинамической силы, действующей на шлюзующиеся суда.

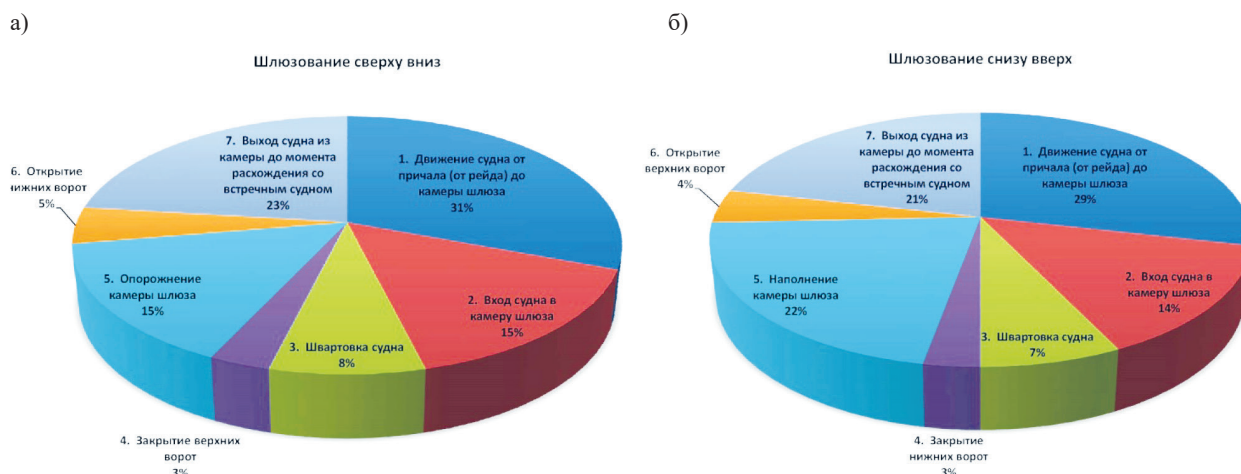


Рис. 1. Диаграммы составляющих времени судопропуска через шлюзы № 1–6 Волго-Балтийского водного пути: а — шлюзование сверху вниз; б — шлюзование снизу вверх

Применительно к северному склону ВБВП для шлюзов № 1–6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» имеем: $h_l = 4,2$ м; $l_{c,ef} = 270$ м; $H_d = 13,0 - 17,5$ м (см. табл. 1). В процессе эксплуатации существующих шлюзов ВБВП с головной системой наполнения (рис. 2) было установлено [2], что в гидравлическом отношении они запроектированы нерационально, поскольку не обеспечивают безопасных условий стоянки шлюзуемых судов в камере, в особенности крупнотоннажных.

По данным натурных исследований, продольная составляющая гидродинамической силы, действующая при наполнении камер на суда типа «Волго-Дон», в 2,0–3,0 раза превышает нормативное значение силы $P_{пр}$, кН [5]:

$$P_{пр} = 1,4\sqrt[3]{W} \quad (0,3\sqrt[3]{W}), \quad (1)$$

где W — водоизмещение в полном грузу расчетного одиночного судна, кН (тс).

а)



б)

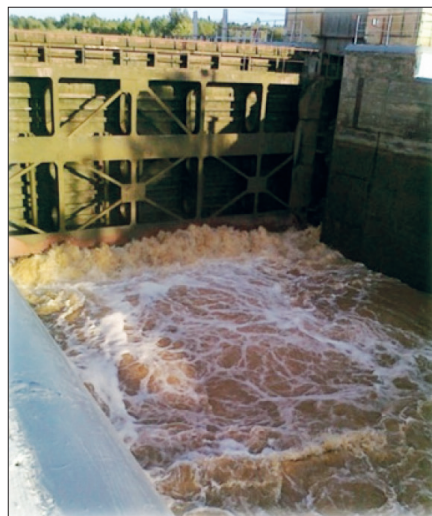


Рис. 2. Головная безгалерейная система наполнения камер шлюзов № 1–6 Волго-Балтийского водного пути:

а — начальный момент наполнения, истечение из-под щита;

б — наполнение камеры, истечение под уровень воды в камере

Это обусловлено тем, что в качестве системы наполнения водой камер шлюзов ВБВП реализован вариант безгалерейного наполнения камеры с использованием подъемно-опускных плоских ворот и устройством гасителей, а в качестве расчетного судна рассматривалось судно типа «Волго-Балт» грузоподъемностью 3000 т. Теоретические исследования по определению параметров водопропускных отверстий, образуемых стенкой падения и экраном, а также экраном и днищем головы, расстояния до балочной решетки и других размеров элементов системы наполнения не проводились.

На основании результатов лабораторных исследований была разработана приближенная методика определения размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер шлюзов водой. При этом выбор типа головной системы питания был проведен неоднозначно, так как не во всех случаях выполнялись рекомендуемые действующими при проектировании и актуализированными в настоящее время нормативными документами¹ условия:

$$l_{c,ef}H_d < 2000 \quad \text{и} \quad \frac{H_d}{h_l} < 2. \quad (2)$$

Следует отметить, что использование головных безгалерейных систем наполнения требует наличия камер гашения энергии потока воды и успокоительного участка определенной дли-

¹ Свод правил СП 101.13330.2012 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения». Актуализированная редакция СНиП 2.06.07–87. М., 2012. 69 с.

ны, которые нельзя использовать для стоянки судов. Зона успокоительного участка у шлюзов № 1–6 ВБВП составляет 6,0 м, длина камеры гашения — 14,0–18,5 м (см. табл. 2).

Результаты (Results)

В процессе выполнения работы [3] были выполнены расчетные исследования оптимизации судопотока за счет увеличения полезной длины камер существующих шлюзов. Выполнено сравнение целесообразности увеличения полезной длины камер шлюзов в сопоставлении с вариантом строительства вторых ниток шлюзов, определены основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные показатели увеличения полезной длины камеры шлюза без вывода сооружения из эксплуатации. Рекомендуемой областью применения являются все однокамерные судоходные шлюзы Единой глубоководной системы Европейской части РФ.

По расчетам судопропускной способности одного шлюза при удлиненной камере [4] (возможности постановки в кильватер двух судов г/п 5000 т), шлюз сможет пропустить судов г/п 5000 т на 53 % больше, чем с существующей камерой. При этом в среднем за навигацию происходит 20–25 % одиночных шлюзований. Увеличение полезной длины камер шлюзов способствует возможности более рациональной расстановки в камере прочих грузовых и служебно-вспомогательных судов.

По экспертной оценке, общее повышение пропускной способности шлюзов ВБВП № 1–6 за счет увеличения полезной длины их камер (рис. 3) может составить до 10–15 % и достичь примерно судопропускной способности шлюза Шекснинского гидроузла № 8 на каждом шлюзе. Реализация данного варианта позволит увеличить пропускную способность по тоннажу флота в среднем на 6 млн т по отношению к максимальной фактической величине за наиболее напряженный период 2008–2014 гг.

Практически увеличение (рис. 3, а) полезной длины камеры шлюза возможно осуществить путем демонтажа старых и пристройки новых нижних голов с перестановкой на них механического оборудования с существующих или с установкой нового [3]. Однако для реализации данного варианта в межнавигационный период необходимо выполнить значительный объем строительно-монтажных работ, включая реконструкцию пульта управления и перенос автомобильного переезда через шлюз. За счет увеличения сливной призмы несколько увеличивается время наполнения и опорожнения камеры шлюза водой. Варианты реновации по схемам, представленным на рис. 3, б и г, являются конструктивно наименее целесообразными из всех возможных вариантов.

Согласно данным источника [4], альтернативным вариантом увеличения полезной длины камеры является переход от головной системы питания водой камер существующих шлюзов к простой распределительной, с боковой подачей воды (рис. 3, д). При этом отпадает необходимость наличия камеры гашения и успокоительного участка, протяженность которых увеличивает длину камеры по сравнению с полезной длиной для шлюзов № 1–6 ФБУ «Администрация Волго-Балт» на 20–25 м. Увеличение $l_{c,ef}^* = l_{c,ef} + \Delta_{л}$ ($l_{c,ef}^*$ — новая длина см. рис 3, д) произойдет за счет включения в нее участка стоянки судна на успокоительном участке и длины демонтируемой камеры гашения. При данной схеме реновации вся инфраструктура шлюза: механическое и электрическое оборудование, пульт управления, мостовой переезд, сохраняется без изменения. Основные затраты приходятся на строительство бокового подвода воды, который может быть построен превентивно, не оказывая влияния на судопропуск. Следует отметить, что реновация шлюза по схеме, приведенной на рис. 3, д, позволяет сохранить в неприкосновенности образовавшуюся после строительства шлюзов природно-техническую систему, формирование которой и все геоэкологические изменения происходили на протяжении последних 56 лет. Объем сливной призмы, расходуемой на шлюзование, останется неизменным, а время наполнения камеры водой может быть сокращено на 20–30 % за счет использования более совершенной распределительной системы питания.

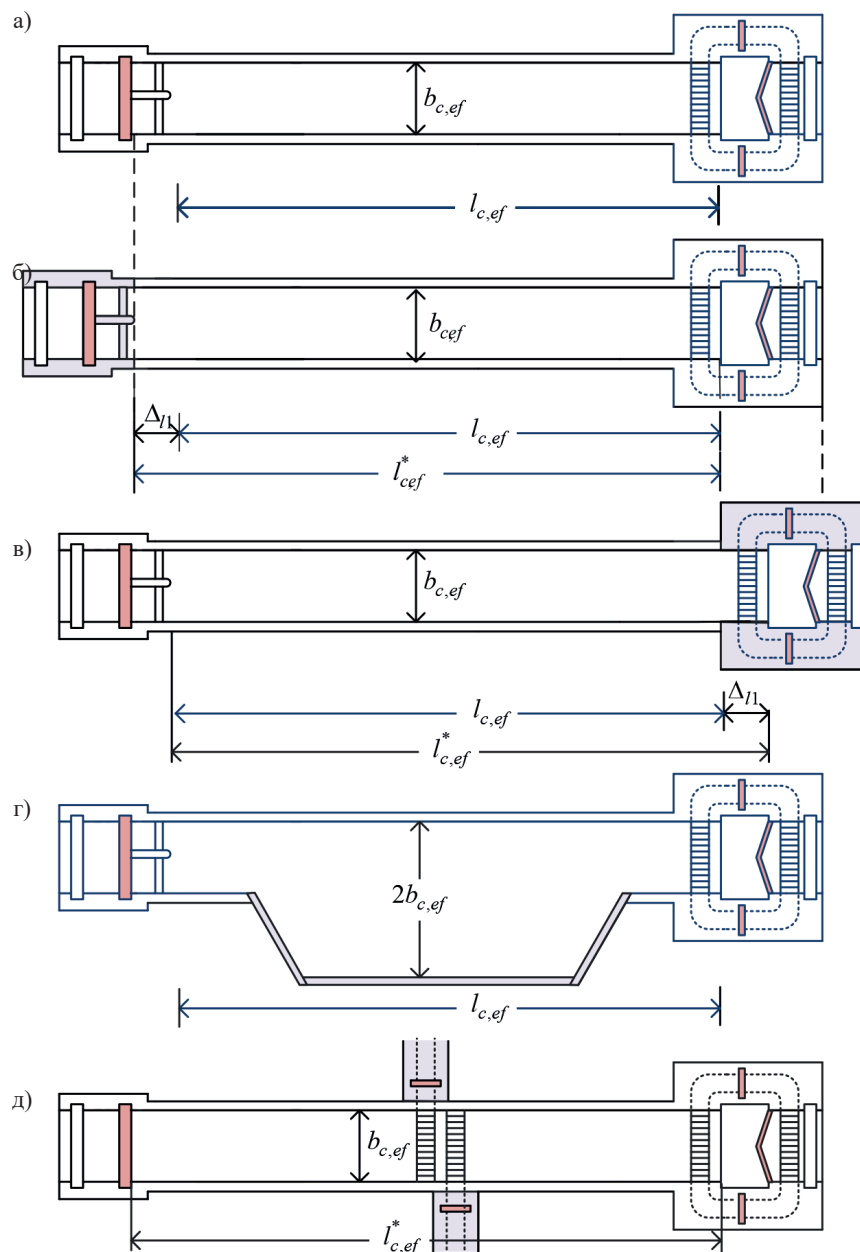


Рис. 3. Принципиальные схемы увеличения полезной длины (ширины) камеры эксплуатируемого шлюза для пропуска двух крупнотоннажных судов г/п 5000–5500 т одновременно:

- a* — эксплуатируемый типовый шлюз № 1–6 ФБУ «Администрация «Волго-Балт» с безгалерейной головной системой наполнения и полезными габаритами $l_{c,ef}$, $b_{c,ef}$;
- б* — вариант увеличения полезной длины камеры без изменения системы питания за счет переноса верхней головы в верхний бьеф на величину Δl_1 ;
- в* — вариант увеличения полезной длины камеры без изменения системы питания за счет переноса нижней головы в нижний бьеф на величину Δl_1 ;
- г* — вариант увеличения полезной ширины камеры для шлюзования крупнотоннажных судов в два пьжа без изменения типа системы питания;
- д* — вариант увеличения полезной длины камеры за счет изменения типа системы питания

Рассмотрим более подробно определение системы наполнения водой камеры реконструируемого шлюза. Для судна массой M , удерживаемого в камере упругими связями при продольном перемещении x , можно написать следующее уравнение движения:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + cx = P(t), \quad (3)$$

где x — перемещение судна вдоль оси шлюза (по оси x); α — коэффициент сопротивления воды; c — коэффициент жесткости связей; $P(t)$ — продольная гидродинамическая сила.

Анализ уравнения движения судна в камере шлюза при ее наполнении показывает, что определяющим воздействием является волновая составляющая продольной гидродинамической силы [6], которая прямо пропорционально зависит от продольного уклона воды i .

Продольная (вдоль оси камеры) составляющая гидродинамического усилия $P_{пр}$, действующего на судно, принимается пропорциональной уклону водной поверхности в камере i и водоизмещению судна W_s :

$$P_{пр}^{max} = iW_s. \quad (4)$$

Продольный уклон водной i поверхности может быть определен по зависимости

$$i = \frac{\left(\frac{dQ}{dt}\right)_0 a_c}{g(\omega_c - \omega_s)}, \quad (5)$$

где $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_0$ — приращение расхода воды поступающей в камеру в начале процесса наполнения;

a_c — коэффициент, характеризующий качество системы питания и определяемый экспериментом (значение a_c может меняться в широких пределах: от единицы для головных систем питания до 0,05 для наиболее совершенных эквивалентных систем); ω_s — площадь смоченного миделевого сечения судна или состава судов; ω_c — площадь живого поперечного сечения камеры в момент начала процесса наполнения; $g = 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ — ускорение силы тяжести.

Таким образом, зависимость (4) для любого типа системы питания может быть представлена в виде

$$P_{пр}^{max} = \frac{W_s \left(\frac{dQ}{dt}\right)_0 a_c}{g(\omega_c - \omega_s)}. \quad (6)$$

Условием выбора типа системы питания служит неравенство

$$P_{пр}^{max} < P_{ш}^{доп}, \quad (7)$$

где $P_{ш}^{доп}$ — допустимое натяжение в зачаливающих судно тросах, т.

В настоящее время нормативной является зависимость, полученная профессором А. В. Михайловым [7] на основе натурных исследований:

$$\frac{P_{ш}^{доп}}{W_s} = \frac{1}{n_{доп}}, \quad (8)$$

где $n_{доп} = 3,3W_s^{2/3}$.

Обобщенная методика выбора типа системы питания, разработанная на основе комплексных лабораторных исследований, была предложена профессором Б. Д. Качановским в монографии «Гидравлика судоходных шлюзов» (М.; Л.: Речиздат, 1951). В соответствии с приведенной в этом издании методикой уравнение (8), после ряда преобразований, можно представить в следующем виде:

$$\frac{P_{пр}^{max}}{W_s} = \frac{1}{n_{max}} = A_0 A_c^{max}; \quad (9)$$

$$\frac{P_{ш}^{доп}}{W_s} = \frac{1}{n_{доп}} = A_0 A_c^{доп}, \quad (10)$$

а условие выбора типа системы питания (7) можно переписать в виде

$$A_c^{max} < A_c^{доп}. \quad (11)$$

В выражениях (9)–(11) приняты следующие условные обозначения: $A_c^{\max}$ и $A_c^{\text{доп}}$ — коэффициенты, соответственно, для максимального и допустимого воздействий, характерных для конкретной системы питания; A_0 — безразмерный коэффициент, в котором сгруппированы все параметры шлюза, не зависящие от типа системы питания и являющиеся исходными данными.

Безразмерный коэффициент определяется по формуле

$$A_0 = \frac{2\Omega_c H_d}{g(\omega_c - \omega_s)T^2}, \quad (12)$$

где $\Omega_c = (b_{c,ef} + l_{c,ef})b_{c,ef}$ — площадь зеркала камеры; T — время наполнения (опорожнения) камеры.

Допустимое значение коэффициента определяется с использованием формул (8) и (12):

$$A_c^{\text{доп}} = \frac{1}{n_{\text{доп}} A_0}. \quad (13)$$

Условие выбора системы питания (11) реализуется при помощи вспомогательных расчетных графиков (рис. 4). Время наполнения (опорожнения) камеры шлюза T , мин, в формуле (12) на предварительных стадиях проектирования следует определять по зависимости

$$T = \alpha \sqrt[3]{H_d \cdot l_{c,ef} \cdot b_{c,ef}}, \quad (14)$$

где α — коэффициент, зависящий от типа системы питания шлюза ($\alpha = 0,27$ — для головных систем питания, $\alpha = 0,19$ — для распределительных систем питания).

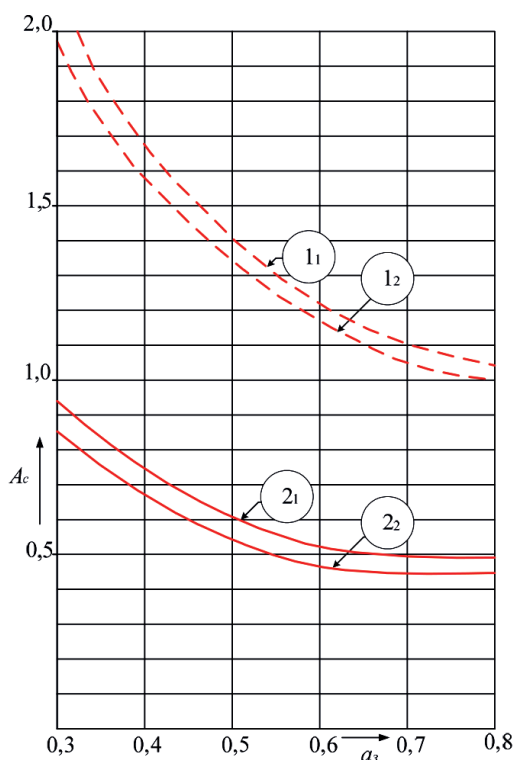


Рис. 4. Графики зависимости $A_c = f(a_3)$

Зависимости $A_c = f(a_3)$ приведены как для наибольшего значения коэффициента расхода системы питания (индекс 1), так и для наименьшего (индекс 2) — см. рис. 4. Значение относительно времени открытия затворов наполнения / опорожнения камеры $a_3 = t_3 / T$ (t_3 — время открытия затвора) для распределительных систем питания принимается не более 0,6.

В результате выполненных расчетов установлено, что для решения поставленной задачи: замены системы питания при всех ограничениях наиболее перспективными являются простые распределительные системы питания с боковой подачей воды (рис. 5).

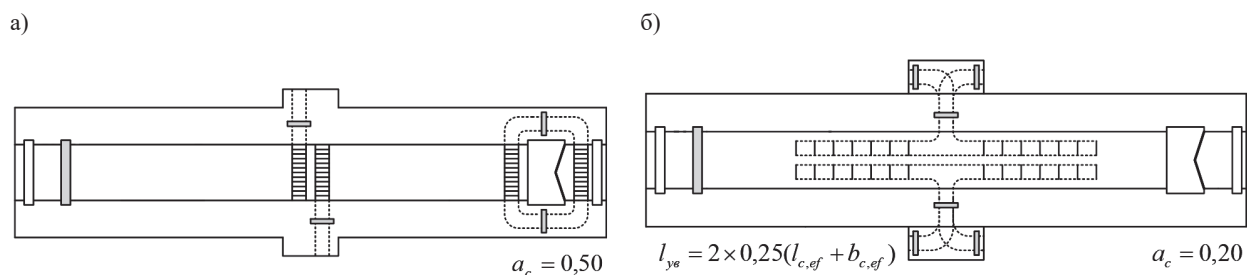


Рис. 5. Схемы простых распределительных систем питания с боковой подачей воды:

а — с одним поперечным водоводом ($\mu = 0,7-0,65$);

б — с продольными донными водоводами и поступлением воды в середину водоводов ($\mu = 0,6-0,65$)

Обсуждение (Discussion)

В Российской Федерации существует успешный опыт эксплуатации крупногабаритных шлюзов с боковой подачей воды: Угличский и Рыбинский шлюзы на р. Волга. Конструктивно подача воды осуществляется по-разному в зависимости от типа камеры и компоновки шлюза в составе гидроузла. Камеры шлюзов № 1–6 ВБВП, в зависимости от природных условий, могут быть двух типов: с разрезным днищем — шлюзы № 1–3 и 6 и доковой конструкции — шлюзы № 4 и 5 (рис. 6).

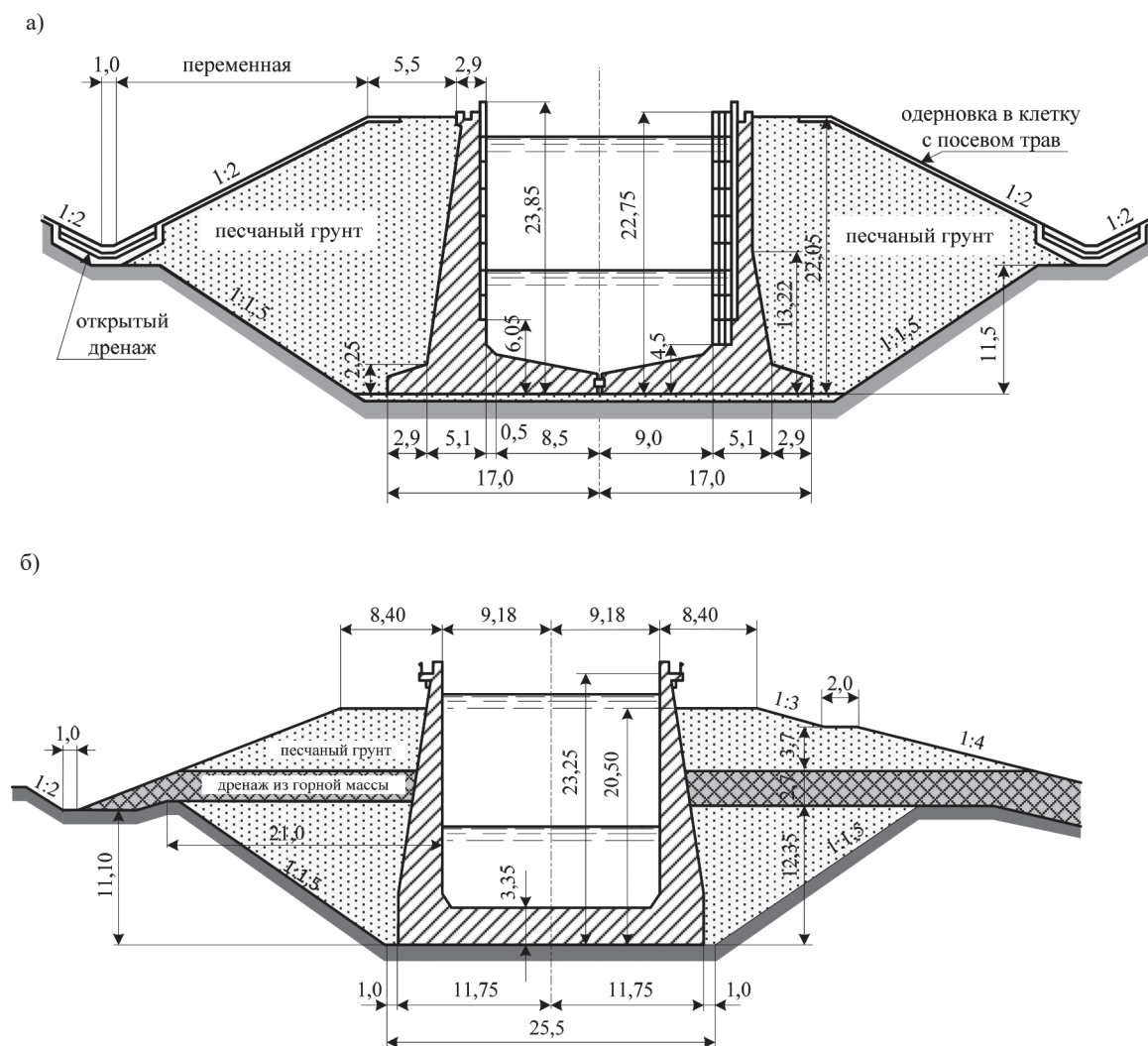


Рис. 6. Типы конструкций камер шлюзов № 1–6 Волго-Балтийского канала:

а — поперечный разрез по камере с разрезным днищем шлюза № 1;

б — поперечный разрез по камере доковой конструкции шлюза № 4

Для шлюзов № 4 и 5 безальтернативным является использование системы подвода и распределения воды (см. рис. 5, а). Для шлюзов № 1–3 и 6 альтернативным является вариант системы подвода и распределения воды (см. рис. 5, б). В камерах с разрезным днищем появляется возможность за счет наклонной конфигурации лицевых консолей стенок подпорных стенок обустроить продольные распределительные галереи с водовыпусками по ширине камеры (см. рис. 5, б).

Подвод воды к камерам предполагается осуществить по полимерным трубам крупных диаметров широко и успешно применяемым для нефти и газопроводов (СНиП 2.05.06–85* «Магистральные трубопроводы»). Предварительные расчеты (табл. 3) показывают, что при использовании предлагаемых систем питания время наполнения камеры сократится примерно на 30 %.

Таблица 3

Время наполнения / опорожнения камеры

Шлюз	Время* наполнения, мин	Планируемое время** наполнения, мин	Время опорожнения, мин	Сокращение времени наполнения, мин	Конструкция камеры
1. Вытегорский гидроузел (шлюз № 1)	13,5	9,5	13,0	4,0	С разрезным днищем
2. Белоусовский гидроузел (шлюз № 2)	13,6	9,6	10,5	4,0	С разрезным днищем
3. Новинкинский гидроузел (шлюз № 3)	14,0	9,9	10,3	4,1	С разрезным днищем
4. Новинкинский гидроузел (шлюз № 4)	11,0	7,7	9,0	3,3	Доковая
5. Десятинский гидроузел (шлюз № 5)	12,5	8,8	10,0	2,7	Доковая
6. Десятинский гидроузел (шлюз № 6)	14,5	10,2	13,5	4,3	С разрезным днищем

* — практическое время наполнения камеры шлюза водой при существующей безгалерейной системе питания;

** — время наполнения камеры шлюза водой при предлагаемой простой распределительной системе питания с подкачкой воды в середину камеры.

Одним из важнейших этапов проектирования судоходных шлюзов является *моделирование движения потока воды через сооружение*. Вследствие того, что шлюзы являются уникальными сооружениями по расположению, конструкции, расходам воды и др., гидравлические явления на них также являются уникальными. Обеспечению безопасных условий стоянки судна в камере шлюза были посвящены теоретические и натурные исследования российских ученых А. А. Атави-на [9], О. Ф. Васильева [8], В. И. Букреева [8], Б. Д. Качановского, В. В. Ключева, В. А. Кривошея [10], А. В. Михайлова [7], Н. А. Семанова [11] и др.

Вопросами численного моделирования гидродинамических явлений в камере шлюза посвящены работы И. В. Липатова [12], А. П. Яненко [13] J. Webb, W. Peng [14], Z. Z. J. Wang, Zou [15]. При реализации численного моделирования важными факторами, определяющими достоверность результатов расчетов, являются задание параметров этих моделей [16], которые зависят главным образом от геометрической формы и, как правило, заранее неизвестны. Одним из инструментов, позволяющих проводить трехмерное моделирование, является программный комплекс FLOW-3D, который предполагается использовать при проверке корректности разработанных рекомендаций.

Заключение (Conclusion)

При выборе варианта реновации шлюза с изменением типа системы питания, можно получить шлюз с полезной длиной камеры $l_{c,ef} = 290$ м. Такой габарит имеют все крупные речные шлю-

зы Волжско-Камского бассейна, запроектированные для пропуска двух крупногабаритных судов, расположенных в камере в кильватер и успешно эксплуатирующиеся более пятидесяти лет.

Дополнительными преимуществами перехода к новой системе питания водой камеры (простой распределительной с боковой подачей воды) являются:

- сохранение сложившейся природно-технической системы;
- возможность проведения строительно-монтажных работ в сжатые сроки в межнавигационный период, без вывода шлюза из эксплуатации;
- ускорение процесса наполнения камеры шлюза водой;
- дополнительный эффект по увеличению пропускной способности вследствие уменьшения времени входа судов из верхнего бьефа в шлюз за счет забора воды помимо подходного канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический отчет о строительстве Волго-Балтийского водного пути им. В. И. Ленина: отчет по теме (закл.). Т. 1 : Проект и эксплуатационное освоение. — М., Центр. ин-т нормативных исследований и науч.-техн. информ. «Оргтрансстрой» М-ва трансп. строит., 1968. — 310 с.
2. Гапеев А. М. Водные пути и гидротехнические сооружения, их эксплуатация и ремонт (Волго-Балтий водный путь): учеб. пособие / А. М. Гапеев, П. А. Гарибин, В. В. Ключев. — СПб.: СПГУВК, 2005. — 201 с.
3. Научное обоснование возможности и целесообразности увеличения полезной длины камер шлюзов № 1–6 / ФБУ «Администрация Волго-Балт» в целях повышения пропускной способности. — № ГР 115080740012. — М.: ЗАО «Акватик», 2015. — 359 с.
4. Богатов А. В. Увеличение пропускной способности шлюзов № 1–6 ВБВП за счет изменения системы наполнения камеры водой / А. В. Богатов, П. А. Гарибин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г.: в 3 ч. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. — Ч. 1. — 308 с.
5. Гапеев А. М. Определение размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер судоходных шлюзов из-под плоских подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 34а–40.
6. Головков С. А. Распределение воды в судоходных шлюзах: моногр. / С. А. Головков, П. А. Гарибин, А. М. Гапеев. — СПб.: СПГУВК, 2009. — 154 с.
7. Михайлов А. В. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Ч. I: Внутренние водные пути / А. В. Михайлов. — Изд-во АСВ, 2004. — 448 с.
8. Васильев О. Ф. Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях: математическое и лабораторное моделирование, натурные испытания / О. Ф. Васильев [и др.] // Вычислительные технологии. — 2001. — Т. 6. — Ч. 2: Спец. вып. — С. 63–69.
9. Атавин А. А. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: монография / А. А. Атавин [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. В. Дегтярева (мл.). — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. — 327 с.
10. Кривошей В. А. Гидросооружения: устранить опасность! / В. А. Кривошей // Речной транспорт. — 2005. — № 4. — С. 32–35.
11. Семанов Н. А. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
12. Липатов И. В. Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений: методология исследований: моногр. / И. В. Липатов. — Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. — 100 с.
13. Atavin A. A. The Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes in Navigation Passes and the Optimal Control of Vessel's Passing through a Shipping Lock / A. A. Atavin [et al.] // XXVIII Congr. IAHR. — Theme D, Graz (Austria), 1999. — 8 p. (CD-ROM).
14. Webb J. Innovations in Lock Filling and Emptying Systems / J. Webb, W. Peng // Paper 5 of PIANC Workshop. — 2009. — Pp. 15–16.
15. Wang H. Z. Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship / H. Z. Wang, Z. J. Zou // IWNTM13: International Workshop on Nautical Traffic Models 2013, Delft, The Netherlands, July 5–7, 2013. — Delft University of Technology, 2013. — Pp. 62–70.

16. Гиргидов А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации / А. А. Гиргидов // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 3(21). — С. 21–27.

REFERENCES

1. Krylov, G. A., ed. *Tekhnicheskii otchet o stroitel'stve Volgo-Baltiiskogo vodnogo puti im. V. I. Lenina. Vol. 1. Proekt i ekspluatatsionnoe osvoenie*. M.: Tsentr. in-t normativnykh issledovaniy i nauch.-tekhn. informatsii «Orgtransstroj» M-va transp. stroitel'stva, 1968.
2. Gapeev, A. M., P. A. Garibin, and V. V. Klyuev. *Vodnye puti i gidrotekhnicheskie sooruzheniya, ikh ekspluatatsiya i remont (Volgo-Baltii vodnyi put')*: Ucheb. Posobie. SPb.: SPGUVK, 2005.
3. *Zaklyuchitel'nyi otchet po teme: Nauchnoe obosnovanie vozmozhnosti i tselesoobraznosti uvelicheniya poleznoi dliny kamer shlyuzov № 1–6 FBU «Administratsiya Volgo-Balt» v tselyakh povysheniya propusknoi sposobnosti*. № GR 115080740012. M.: ZAO «Akvatik», 2015.
4. Bogatov, A. V., and P. A. Garibin. “Uvelichenie propusknoi sposobnosti shlyuzov № 1–6 VBVP za schet izmeneniya sistemy napolneniya kamery vodoi.” *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 18–23 noyabrya 2019 g.; Inzhenerno-stroitel'nyi institut*. Vol. 1. SPb.: POLITEKH-PRESS, 2019.
5. Gapeev, A. M. “Determination of dimentions and relative position of lock chamber system components when flooding from under plain lift-overpour gate.” *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2012): 34a–40.
6. Golovkov, S. A., P. A. Garibin, and A. M. Gapeev. *Raspredelenie vody v sudokhodnykh shlyuzakh. Monografiya*. SPb.: SPGUVK, 2009.
7. Mikhailov, A. V. *Gidrosooruzheniya vodnykh putei, portov i kontinental'nogo shel'fa. Chast' I: Vnutrennie vodnye puti*. Izdatel'stvo ASV, 2004.
8. Vasil'ev, O. F., A. A. Atavin, V. V. Tarasevich, and A. P. Yanenko. “Nestatsionarnye protsessy v sudopropusknykh sooruzheniyakh: matematicheskoe i laboratornoe modelirovanie, naturnye ispytaniya.” *Vychislitel'nye tekhnologii* 6(2. Special Issue) (2001): 63–69.
9. Atavin, A. A., V. I. Bukreev, O. F. Vasil'ev, et al. *Gidrodinamicheskie aspekty neshtatnykh i avariinykh situatsii na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh: monografiya*. Edited by V.V. Degtyarev (jun.). Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2009.
10. Krivoshei, V. A. “Gidrosooruzheniya: ustranit' opasnost'!” *River transport (XXIst century)* 4 (2005): 32–35.
11. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudokhodnye kanaly, shlyuzy i sudopod'emniki*. M.: Transport, 1970.
12. Lipatov, I. V. *Gidrodinamika rechnykh potokov i ee vliyanie na ekspluatatsionnye parametry sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii: metodologiya issledovaniy. Monografiya*. N. Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VGAVT, 2006.
13. Atavin, A. A., P. V. Stepanova, V. V. Tarasevich, and A. P. Yanenko. “The Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes in Navigation Passes and the Optimal Control of Vessel's Passing through a Shipping Lock.” *XXVIII Congr. IAHR. Theme D, Graz (Austria), 1999. (CD-ROM)*.
14. Webb, J., and W. Peng. “Innovations in Lock Filling and Emptying Systems.” *Paper 5 of PIANC Workshop*. 2009. 15–16.
15. Wang, H. Z., and Z. J. Zou. “Behaviours of a Ship Passing through a Lock under the Influence of a Berthed Ship.” *IWNTM13: International Workshop on Nautical Traffic Models 2013, Delft, The Netherlands, July 5-7, 2013*. Delft University of Technology, 2013. 62–70.
16. Girgidov, A. A. “Gibridnoe modelirovanie v proektirovanii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii i FLOW-3D® kak sredstvo ego realizatsii.” *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* 3(21) (2011): 21–27.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарибин Павел Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Garibin, Pavel A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Богатов Александр Владимирович —
главный специалист
ФБУ «Администрация «Волго-Балт»
191014, Российская Федерация,
Санкт-Петербург,
Виленский пер., дом 15, литер Б
e-mail: gbu@volgo-balt.ru

Bogatov, Aleksandr V. —
Chief Specialist
FBI «Administration of the Volga-Baltic basin
of inland waterways»
15/B Vilensky lane, St. Petersburg, 191014,
Russian Federation
e-mail: gbu@volgo-balt.ru

*Статья поступила в редакцию 23 июня 2020 г.
Received: June 23, 2020.*