

Динамика потока воды, возникающего при опорожнении камеры судоходного шлюза

*Аспирант Д.А. Мильцын**,

ФБОУ ВПО Волжская государственная академия водного транспорта

Ключевые слова: система опорожнения шлюза; математическое моделирование; гидродинамика потока

Согласно концепции развития транспорта Российской Федерации на период до 2030 года [1] намечается активное вовлечение внутреннего водного транспорта в освоение увеличивающегося грузооборота страны. Наша страна готовится предоставить свои водные пути для транзитного прохождения судов иностранных перевозчиков, в связи с чем увеличение судопотока через Единую глубоководную систему Российской Федерации в среднесрочной перспективе неизбежно.

Анализ возрастного состава судоходных гидротехнических сооружений (СГТС) показывает, что порядка 75% сооружений были возведены более полувека назад и, в настоящее время, нуждаются в значительных финансовых затратах для проведения различного вида ремонтов. Физический и моральный износ сооружений достигает пороговых значений, требуется серьезная техническая модернизация для удовлетворения современным условиям эксплуатации и повышения конкурентоспособности внутреннего водного транспорта.

Как показали последние исследования в области эксплуатации СГТС, наиболее слабым звеном системы внутреннего водного транспорта являются судоходные шлюзы. Это обусловлено как длительным сроком эксплуатации, так и значительным исчерпанием ресурсов увеличения судопропускной способности сооружений. Таким образом, сложилась нынешняя ситуация, при которой судопропускная способность шлюзов становится серьезным препятствием на пути развития транспортной инфраструктуры в нашей стране, а исследования повышения пропускной способности и повышения безопасности эксплуатации судоходных шлюзов становятся с каждым годом всё более востребованными и актуальными.

Систематизация существующих методов увеличения пропускной способности шлюзованных участков представлена в работе А.М. Гапеева [2]. Им был проанализирован большой объем информации по этому вопросу, в результате было выделено четыре основных направления интенсификации и блоки организационно-технических мероприятий по их реализации.

1. Совершенствование организации, методов и средств управления движением судов по шлюзованным водным путям. Для этого предлагается модернизация системы судоходной обстановки, обеспечение рациональных скоростей движения, организация работы диспетчерских служб, внедрение систем автоматизированного управления движением флота, специальная проводка судов на затруднительных участках, организация движения судов в коротких межшлюзовых бьефах, разработка руководящих документов по пропуску флота. В этом направлении велись разработки такими учеными нашей страны, как С.М. Пьяных [3], А.Г. Малышкин [4], В.Н. Белых, В.И. Кожухарь [5], Д.А. Зернов [6], А.Н. Клементьев [7] и другие. Сходными вопросами регулирования движения флота на подходах к судоходным сооружениям и созданием численных имитационных моделей системы «судно-шлюз» занимались зарубежные исследователи [8].

2. Ускорение пропуска судов через судоходные шлюзы. Для этого предлагается рациональное проектирование систем питания, элементов и конструкций шлюза, выбор рациональных режимов наполнения и опорожнения камер, обеспечение оптимальных условий для движения судов в пределах шлюза, проводка судов через шлюзы, использование транзитных пропусков воды, регулирование волновых колебаний в подходных каналах шлюзов, сокращение непроизводительных простоев шлюза, организация работы шлюза и его техническое обслуживание. Большое внимание данным методам ускорения судопропуска уделяется в работах И.В. Липатова [9] и В.А. Кривошея [10].

3. Техническое совершенствование сооружений, их конструкций, оборудования и механизмов с целью увеличения их надежности. Для этого предлагаются устройства для поперечного перемещения судов на ось шлюза, модернизация конструкции плавучих рымов, использование автошвартовых устройств и других средств механизированной учалки, устройство боковых продольных галерей вдоль шлюза, предохранительные устройства для защиты ворот от навала судов, опорно-ходовые устройства ворот и затворов, строительство судопропускных

Мильцын Д.А. Динамика потока воды, возникающего при опорожнении камеры судоходного шлюза

сооружений для пропуска мелкотоннажного флота. Применительно к данному блоку следует выделить работы ученых Санкт-Петербургского университета водных коммуникаций В.В. Баланина [11], В.В. Клюева [12] и ряда других, а также зарубежных авторов [13, 14, 15].

4. Продление навигационного периода работы шлюзованного водного пути. Для этого предлагаются мероприятия по обеспечению работы судов и предприятий речного транспорта в ледовых условиях, обеспечение нормальных путевых условий, обеспечение работы судоходных шлюзов при отрицательных температурах воздуха.

В работах, посвященных ускорению пропуска судов через судоходные сооружения, процесс опорожнения камеры судоходного шлюза затрагивался достаточно редко. При этом сокращение времени опорожнения камеры шлюза ведет к ускорению процесса шлюзования и увеличению пропускной способности сооружения, а поток воды, поступающий из камеры в нижний подходной канал, определяет условия отстоя судов на подходах к шлюзу. Следовательно, процесс опорожнения непосредственным образом связан как с машинной, так и с движущей составляющей пропускной способности сооружения, а его исследования могут открыть новые резервы пропускной способности СГТС и повысить их эксплуатационную надежность.

Натурные испытания на действующих судоходных шлюзах являются крайне дорогостоящими и не всегда способны предоставить исследователям всю необходимую информацию об особенностях гидродинамики потока. В связи с этим одним из наиболее перспективных методов проведения исследований, связанных с изучением структуры потока воды, возникающего при опорожнении камеры судоходного шлюза, становится математическое моделирование.

В отличие от традиционных гидравлических подходов математическое моделирование позволяет использовать не осредненные величины таких характеристик, как давление, скорость и ряда других, а значения в конкретных точках, что дает возможность рассматривать структуру потока на более качественном уровне.

С развитием в последнее десятилетие расчетных возможностей персональных компьютеров и появлением мощных кластерных систем методика численного моделирования гидродинамики получила широкое распространение. Математическое моделирование применяется при исследовании структуры потока воды, возникающего при наполнении камеры судоходного шлюза [16], при расчетах прочности гидротехнических сооружений с учетом действия сейсмических нагрузок [17], водосбросных сооружений крупнейших гидроузлов [18], для определения динамических нагрузок на сооружения [19].

Основой математического моделирования опорожнения камеры шлюза через короткие обходные галереи является решение системы, состоящей из гидродинамических уравнений, включающих уравнения движения реальной вязкой жидкости (например, в форме, предложенной Навье-Стоксом), уравнения неразрывности, математической модели турбулентности и ряда других [20].

Рассмотрим более подробно результаты моделирования, связанные с выходом потока из системы опорожнения шлюза в нижний подходной канал.

При моделировании были рассчитаны две типовые для ЕГС РФ системы опорожнения шлюзов: Городецкого района гидротехнических сооружений, в которой выпуск воды в нижний бьеф осуществлялся через систему из 31 водовыпуска шириной 0,3 метра, расположенных между балками гашения шириной 0,7 метра, а также Чайковского района гидротехнических сооружений, где выход потока воды из галерей в нижний подходной канал осуществляется по всей ширине нижнего бьефа без гашения энергии потока балками.

Результаты моделирования описанных систем опорожнения представлены на рис. 1 и 2.

Результаты расчетов показывают, что для системы гашения с балками расход распределяется по ширине нижнего бьефа крайне неравномерно со значительным пиком ближе к середине. Начиная от края камеры, расход через водовыпуски растет достаточно интенсивно и равномерно, увеличиваясь по направлению к оси симметрии (у двенадцатого выпуска) более чем вдвое. После этого наблюдается небольшой спад у центральных выпусков. Распределение расхода в галереях А (ближняя к воротам шлюза) и Б (дальняя от ворот шлюза) сходны и различаются только средней величиной.

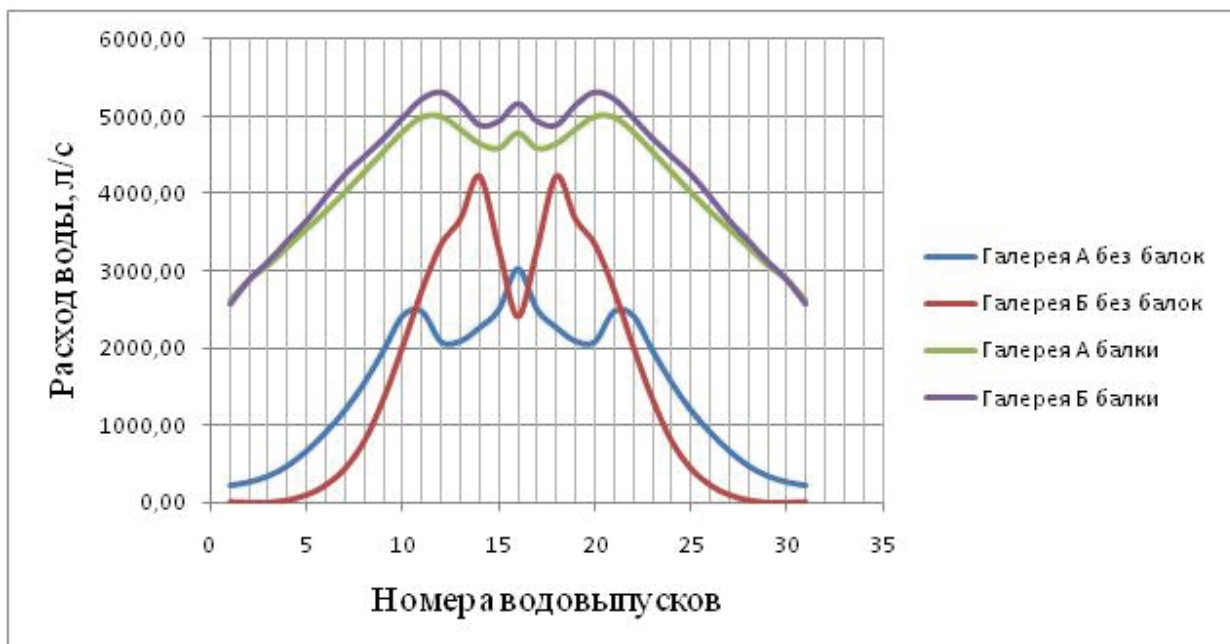


Рисунок 1. Распределение расхода воды при выходе потока из галерей в нижний подходной канал

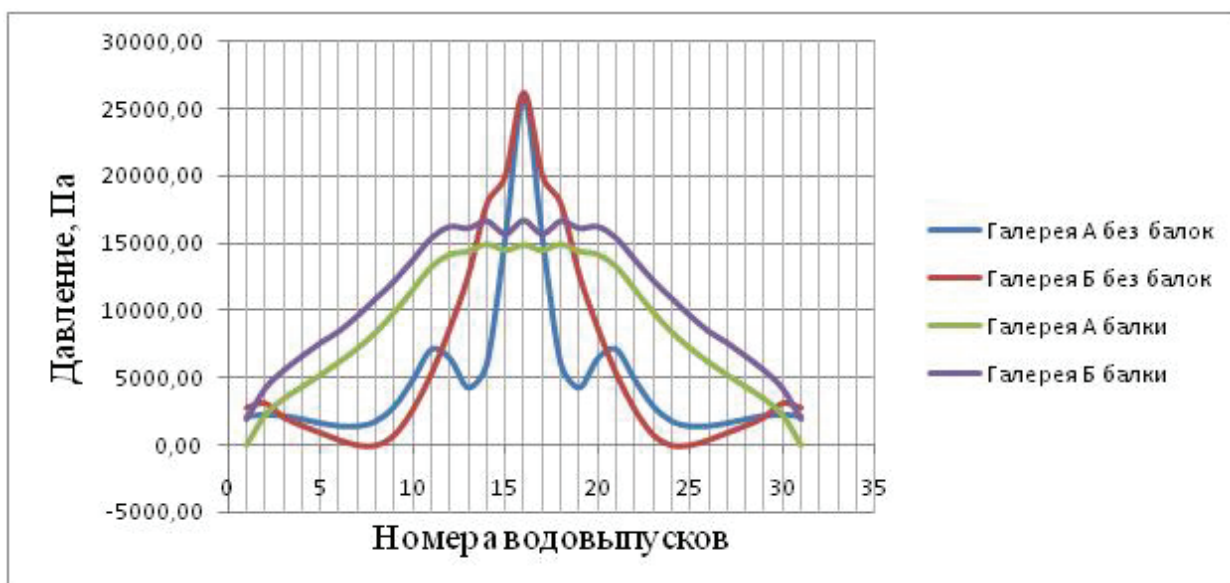


Рисунок 2. Превышение давления в средней части нижнего подходного канала при выходе потока из галерей в нижний бьеф

Рассмотрим подробнее, с чем связано такое поведение потока при обтекании балок гашения в нижнем бьефе. На рис. 3 представлено распределение скоростей в области под балками гашения и между ними при опорожнении камеры шлюза.

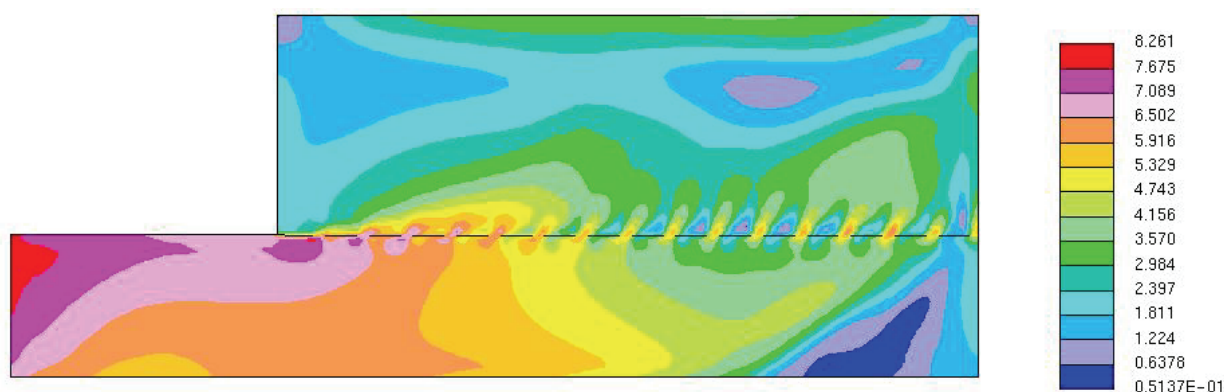


Рисунок 3. Поле скоростей воды при выходе из опорожняющих галерей в нижний бьеф

При выходе потока воды под балки гашения в галереях преобладают векторы скорости, направленные в горизонтальной плоскости XY. В связи с этим под первыми выпускными отверстиями поток проходит транзитом, и расход воды через них крайне мал. По мере удаления от края галереи в потоке начинают возрастать восходящие скорости, и расход через водовыпуски равномерно увеличивается. Небольшой спад выпуска воды в середине сечения подходного канала связан со столкновением двух противоположно направленных потоков воды в галерее. В результате этого столкновения под центральными балками гашения образуется сложная вихревая зона, которая сжимает живое сечение галереи и снижает расход через водовыпуски. Таким образом, на выходе потока воды из системы опорожнения в нижний бьеф формируется сложная эпюра скоростей, плавно изменяющаяся по мере продвижения к плоскости симметрии шлюза.

Неравномерность распределения расхода при выходе в нижний бьеф приводит к более быстрому износу центральных балок, а также к замедлению процесса опорожнения камеры.

В процессе выхода потока из системы опорожнения в нижний бьеф наблюдается значительное повышение уровня воды над центральными балками гашения, что приводит к формированию продольного (вдоль направления течения потока) и поперечного (от центральных балок к крайним) уклонов. Величины этих уклонов оказывают непосредственное влияние на формирование волновых явлений и условия отстоя судов в нижнем подходном канале шлюза.

Распределение расхода по всей ширине нижнего бьефа для системы опорожнения без балок гашения крайне неравномерно. Основной поток (порядка 80% от общего расхода) сосредоточен в центральной зоне сечения и приходится не более чем на треть ширины нижнего подходного канала. Расход воды через крайние участки выхода практически равен нулю. При этом амплитуда колебания расхода по длине галерей достигает местами $4000 \text{ см}^3/\text{с}$ против $2000 \text{ см}^3/\text{с}$ у системы с балками гашения.

Повышение градиентов давления в центральной части сечения галерей над крайними участками, характеризующее поперечный уклон в нижнем подходном канале, показывает значительное повышение уровня воды в середине сечения. Мгновенный поперечный уклон для данной системы может достигать величин 0,15-0,17 против не более 0,10 для системы с балками гашения.

Максимальная величина мгновенного повышения уровня воды в нижнем бьефе напрямую определяет продольный уклон воды в нижнем подходном канале и волновые явления при опорожении камеры шлюза. Для системы с балками гашения эта величина не превышает 1,5 метров, тогда как для системы без балок она достигает 2,5 метров.

Сравнение результатов расчета для системы опорожнения судоводного шлюза с балками гашения и без них показывает значительные преимущества первой системы. Наличие балок гашения обеспечивает более плавное распределение расхода потока при выходе в нижний бьеф, уменьшение поперечного и продольного уклонов воды и, как следствие, лучшие условия отстоя судов в нижнем подходном канале.

Несмотря на описанные преимущества системы выпуска воды в нижний бьеф с балками гашения, типовая схема расположения балок не обеспечивает в полной мере возложенных на неё функций. Поскольку система выпуска воды в нижний бьеф состоит из балок равного размера, расположенных на равных расстояниях друг от друга, она способна только частично гасить энергию потока, практически не влияя на распределение расхода воды по ширине нижнего подходного канала.

Мильцын Д.А. Динамика потока воды, возникающего при опорожении камеры судоводного шлюза

В связи с этим были предложены две новые схемы расположения балок гашения и выпускных отверстий системы опорожнения судоходного шлюза, представленные на рис. 4.

Первая схема (Б на рис. 4) с дифференцированной шириной выпусков воды характеризуется сужением отверстий от краев к середине поперечного сечения нижнего бьефа. При этом количество выпусков и их местоположение принято таким же, как и в типовой схеме водовыпусков Городецких шлюзов.

Вторая схема (В на рис. 4) с дифференцированным расположением выпусков предполагает изменение не размеров выпусков, а их местоположение. Расстояние между выпусками, то есть ширина балок гашения, увеличивается по мере движения от крайних балок к центральным.

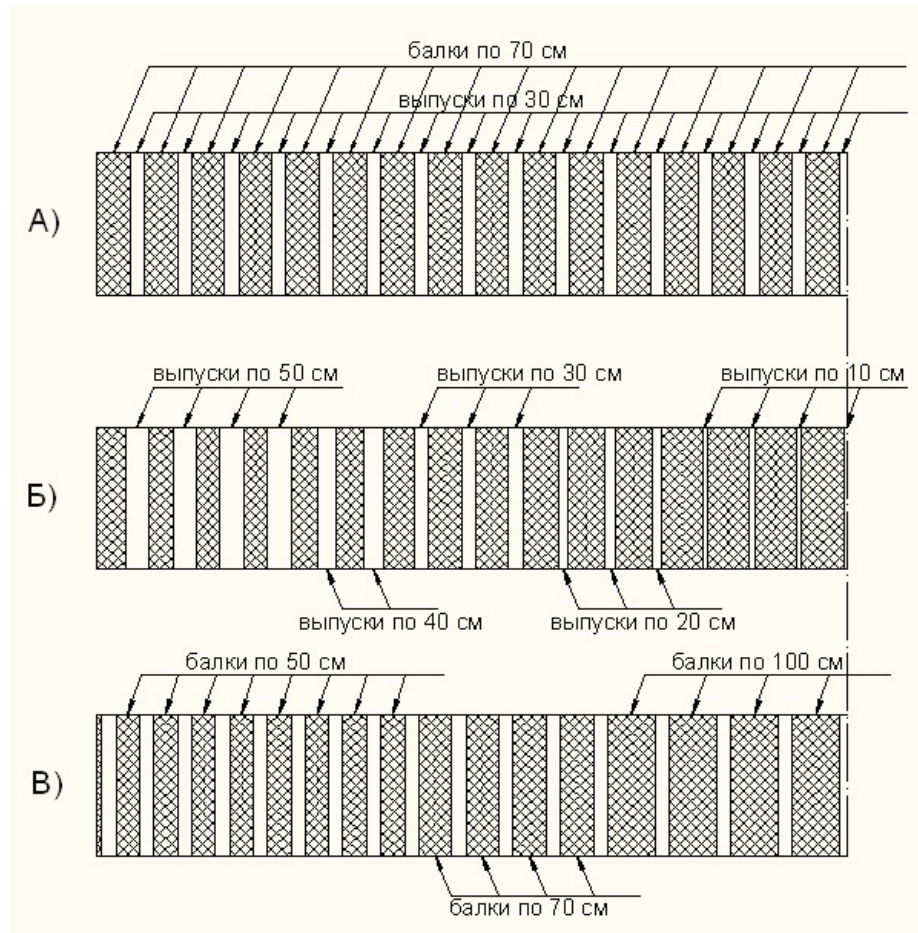


Рисунок 4. Схемы расположения балок гашения и водовыпусков при выходе потока в нижний бьеф: а) типовая схема Городецких шлюзов; б) предложенная схема с дифференцированной шириной выпусков; в) предложенная схема с дифференцированным расположением выпусков

Аппарат математического моделирования позволяет, внося небольшие изменения в геометрические характеристики модели, рассчитать необходимые параметры системы опорожнения для предложенных схем расположения выпусков воды. При этом в отличие от традиционных лабораторных исследований подобного класса задач численное моделирование позволяет избежать влияния на расчеты масштабного фактора и получить достоверные результаты исследуемых параметров.

Мгновенные повышения уровней воды в центральной части выпусков для рассматриваемых схем представлены на рис. 5 и 6.

Анализ расчетов показывает, что для предложенных схем расположения водовыпусков повышение уровня воды над центральными балками ниже, чем для типовой схемы системы опорожнения Городецких шлюзов. Для галереи А максимальное поднятие уровня снижается с 1,5 м при типовой схеме до 1,1 м – при схеме Б и 1,2 м – при схеме В. Для галереи Б максимальное поднятие снижается с 1,6 м при типовой схеме А до 1,0 м – при схеме Б и 1,4 м – при схеме В. Следует отметить, что для галереи Б также наблюдается расширение зоны подъема уровня вдвое при расположении балок гашения по схеме Б.

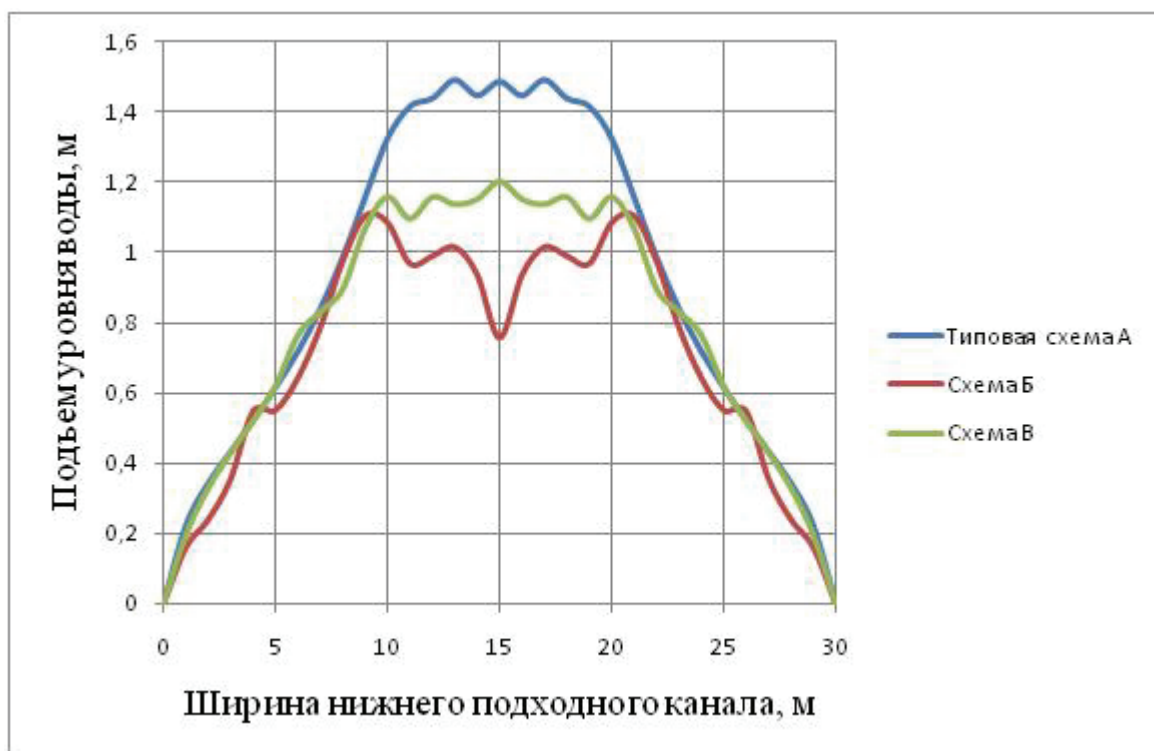


Рисунок 5. Подъем уровня воды в центральной части галереи А



Рисунок 6. Подъем уровня воды в центральной части галереи Б

Снижение максимальной величины подъема уровня воды и расширение зоны подъема приводит к уменьшению продольного и поперечного уклона поверхности воды в нижнем подходном канале и улучшению условий отстоя судов.

Предложенные схемы расположения водовыпусков системы опорожнения Б и В имеют ряд несомненных преимуществ перед типовой схемой А. Применительно к данной исследуемой системе опорожнения Городецких шлюзов наилучшие условия отстоя судов будут наблюдаться при схеме балок гашения с дифференцированной шириной водовыпусков.

Таким образом, исследования на численной модели позволили проанализировать гидродинамику потока на выходе из системы опорожнения судоходного шлюза в нижний подходной канал и показать недостатки некоторых применяемых в настоящее время типовых систем гашения энергии потока. Для типовой системы опорожнения с короткими обходными галереями были разработаны два варианта новой системы гашения энергии при выходе потока воды в нижний бьеф. Расчеты предложенных схем показали, что их использование способно привести к уменьшению продольного и поперечного уклонов поверхности воды в нижнем подходном канале и улучшению условий отстоя судов, ожидающих шлюзования.

Литература

1. Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации (одобрена Правительством РФ № 909-р от 03.07.2003) // Речной транспорт. 2003. № 5. С. 21–37.
2. Гапеев А. М. Совершенствование эксплуатационных качеств судоходных шлюзов с головной системой питания: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22.19. СПб.: СПГУВК, 1998. 20 с.
3. Пьяных С. М. Ускорение пропуска судов через шлюзы // Производственно-технический сборник ТУ МРФ. Вып. 4. М.: Транспорт, 1965. С. 15–17.
4. Малышкин А. Г. Организация и планирование работы речного флота. М.: Транспорт, 1985. 215 с.
5. Белых В. Н., Кожухарь В. И. Об одном из возможных вариантов оптимизации судопропуска на шлюзованных системах // Труды ГИИВТа. 1989. Вып. 219. С. 3–15.
6. Зернов Д. А. Пути повышения пропускной способности судоходных сооружений // Проблемы повышения эффективности водного транспорта. М.: Транспорт, 1983. С. 82–88.
7. Клементьев А. Н. Движение и маневрирование судов при прохождении судопропускных гидротехнических сооружений: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22.19. Н. Новгород: ВГАВТ, 1998. 54 с.
8. Vačkalić Todor, Bukurov Maša. Modelling of the ship locking process in the zone of ship lock with two parallel chambers // Annals of faculty engineering Hunedoara. TomelX. 2011. Fascicule 1. Pp. 187–192.
9. Липатов И. В. Совершенствование процесса судопропуска через шлюзы на примере Городецкого района гидросооружений: автореф. дис. кан. техн. наук: 05.22.19. Н. Новгород: ВГАВТ, 1996. 21 с.
10. Кривошей В. А. Гидродинамические нагрузки, действующие на подъемно-опускные ворота шлюзов: автореф. дис. кан. тех. наук: 05.23.07. Л.: 1985. 31 с.
11. Баланин В. В. Оптимальные запасы в камерах шлюзов // Речной транспорт. 1982. № 10. С. 40–41.
12. Ключев В. В., Гапеев А. М. Ускорение пропуска судов через шлюзы // Речной транспорт. 1980. № 11. С. 38–39.
13. Kuhn R. Die Schleusen des Main-Donau-Kanals // Bauingenieur. 1971. Bd. 46, № 5. Pp. 163-184.
14. Lausen R. Gutachten über die Steuerung der Schütze im Fill – und Entleierbetrieb. Karlsruhe: BAW, 2000. 94 p.
15. Torenz K. Gutachten über die seitliche Einleitung von eberschuss wasser in den Einfahrtsbereich der Schleuse Nurnberg. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). № 3.03.10043.00, 2003. 68 p.
16. Липатов И. В. Разработка средств и методов улучшения технико-эксплуатационных параметров работы судоходных шлюзов: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.22. Н. Новгород : ВГАВТ, 2006. 31 с.
17. Абдикаримов Р. А., Эшматов Х., Бобаназаров Ш. П., Ходжаев Д. А., Эшматов Б. Х. Математическое моделирование и расчет гидротехнических сооружений типа плотины-пластины с учетом сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 59–70.
18. Гиргидов А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 21–27.
19. Козинец Г. Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5 (23). С. 43–48.
20. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1975. 552 с.

**Дмитрий Алексеевич Мильцын, Нижний Новгород, Россия
Тел. моб.: +7(905)86-86-044; эл. почта: mantikor5@rambler.ru*

doi: 10.5862/MCE.28.10

Dynamics of the water flow, appearing during navigation lock chamber drawdown

D.A. Miltsin*The Volga State Academy of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia
+7(905)86-86-044; e-mail: mantikor5@rambler.ru*

Key words

navigation lock drawdown system; mathematical modeling; flow hydrodynamics

Abstract

Increasing the capacity of navigation locks is a very important sector of the Russian Federation inland waterway transport development. One of its directions is the structure of the flow in the navigation lock discharge system investigation, using modern methods of mathematical modeling.

Calculations on the numerical model, described in this paper, allow to analyze the hydrodynamics of water flow that occurs when the chamber is drawdowned, and evaluate the work of flow energy quenching system at the outlet of the tailrace. This article presents a standard dampers design and their disadvantages, two new flow energy dissipation systems are proposed.

The high efficiency of these systems (in comparison with already existing systems) is proved by mathematical modeling, their using can significantly improve the vessels placing conditions and increase the capacity of navigation facilities.

References

1. Concept of the development of the internal water transport in Russian Federation (is approved by Government RF № 909 from 03.07.2003). *Rechnoy transport* [River transport]. Moscow: Transport, 2003. No. 5. Pp. 21-37. (rus)
2. Gapeev A. M. *Sovershenstvovaniye ekspluatatsionnykh kachestv sudokhodnykh shlyuzov s golovnoy sistemoy pitaniya* [Improvement of the navigable locks with the main system of the delivery working quality]. Abstract of thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19]. Saint-Petersburg: SPBUWC, 1998. 20 p. (rus)
3. Pianih S. M. *Production and technical collection TY MRF*. Issue 4. Moscow: Transport, 1965. Pp. 15–17. (rus)
4. Malishkin A. G. *Organizatsiya i planirovaniye raboty rechnogo flota* [Organization and planning of the river fleet functioning]. Moscow: Transport, 1985. 215 p. (rus)
5. Belih V. N. *Trudy GIIVTa* [Proceedings of the GIIWT]. Issue 219. Gorky: GIIWT, 1989. Pp. 3–15. (rus)
6. Zernov D.A. *Problemy povysheniya effektivnosti vodnogo transporta* [Problems of the water transport efficiency improvement]. Moscow: Transport, 1983. Pp. 82–88. (rus)
7. Klementjev A. N. *Dvizheniye i manevrirovaniye sudov pri prokhozhenii sudopropusknykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Movement and maneuvering of vessels in navigation passes of hydraulic structures]. Abstract of thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19. Nizhny Novgorod: VSAWT, 1998. 54 p. (rus)
8. Bačkalić T., Bukurov M. Modelling of the ship locking process in the zone of ship lock with two parallel chambers. *Annals of faculty engineering Hunedoara*. Tome IX. 2011. Fascicule 1. Pp. 187–192.
9. Lipatov I. V. *Sovershenstvovaniye protsessa sudopropuska cherez shlyuzy na primere Gorodetskogo rayona gidrosooruzheniy* [Improvement of the navigable process through the locks on the Gorodec lock example] Abstract of thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19. Nizhny Novgorod: VSAWT, 1996. 21 p. (rus)
10. Krivoshej V.A. *Gidrodinamicheskiye nagruzki, deystvuyushchiye na pod'yemno-opuskiyye vorota shlyuzov* [Hydrodynamic loads, acting on lifting gates of the locks]. Abstract of thesis. Doctor. Technical. Science: 05.23.07. Leningrad: 1985. 31 p. (rus)
11. Balanin V. V. *Rechnoy transport* [River transport]. 1982. No. 10. Pp. 40–41. (rus)
12. Kluev V.V. *Rechnoy transport* [River transport]. 1980. No. 11. Pp. 38–39. (rus)
13. Kuhn R. Die Schleusen des Maln-Donau-Kanals. *Baulingenieur*. 1971. Bd. 46, No. 5. Pp. 163-184.

14. Lausen R. *Gutachten über die Steuerung der Schütze im Füll - und Entleierbetrieb*. Karlsruhe: BAW, 2000. 94 p.
15. Torenz K. *Gutachten über die seitliche Einleitung von eberschuss wasser in den Einfahrtsbereich der Schleuse Nurnberg*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). No. 3.03.10043.00, 2003. 68 p.
16. Lipatov I. V. *Razrabotka sredstv i metodov uluchsheniya tekhniko-ekspluatatsionnykh parametrov raboty sudokhodnykh shlyuzov*[Development of the facilities and methods of the navigable locks worktechnician-working parameterimprovement]. Abstract of. thesis. Doctor. Technical. Science: 05.22.19.Nizhny Novgorod: VSAWT, 2006. 31 p. (rus)
17. AbdikarimovR.A., EshmatovKh., BobanazarovSh. P., HodzhayevD.A., EshmatovB. Kh. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 3 (21). Pp. 59–70. (rus)
18. GirgidovA.A. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 3 (21). Pp. 21–27. (rus)
19. KozinetsG.L. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 5 (23).Pp. 43–48. (rus)
20. Chugaev R.R. *Gidravlika*[Hydraulics]. Leningrad: Energia, 1975. 552 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 61-67.