

УДК 656.6

ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛЮЗОВАНИЯ: ОПЫТ ГОРОДЕЦКОГО ГИДРОУЗЛА

Ковалев Данил Алексеевич¹, аспирант

e-mail: kovalev.dankov@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено поиску путей роста пропускной способности шлюзовой системы Городецкого гидроузла на фоне ее масштабной модернизации. Ключевой проблемой выступает увеличение длительности шлюзования, обусловленное переходом системы в двухступенчатый режим и стохастичностью судопотока. Целью работы является концептуальное обоснование алгоритмов оптимального распределения судов по шлюзовым ниткам и максимизации использования полезной площади камер. Новизна предложенного подхода заключается в отказе от детерминированных методов в пользу гибридных систем, сочетающих математическое моделирование и инструменты искусственного интеллекта для адаптивной диспетчеризации.

Ключевые слова: судоходные шлюзы, оптимизация логистики, математическое моделирование, Городецкий гидроузел, пропускная способность, искусственный интеллект, водный транспорт.

DIGITAL TOOLS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF SLUICKING: EXPERIENCE OF THE GORODETSK HYDROELECTRIC FACILITY

Danil A. Kovalev¹, Doctoral Student

e-mail: kovalev.dankov@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This study focuses on finding ways to increase the capacity of the Gorodets hydroelectric complex's lock system during its extensive modernization. The key challenge is the increased duration of lock operations due to the system's transition to a two-stage mode and the stochastic nature of the ship traffic. The objective of this research is to provide a conceptual framework for optimal ship distribution across the lock lines and maximize the utilization of the available space in the lock chambers. The novelty of this approach lies in the shift from deterministic methods to hybrid systems that combine mathematical modeling and artificial intelligence tools for adaptive scheduling.

Keywords: navigation locks, logistics optimization, mathematical modeling, Gorodets hydroelectric complex, capacity, artificial intelligence, and water transport.

Введение

Обеспечение связности регионов и бесперебойность грузоперевозок невозможны без постоянной модернизации инфраструктуры внутренних водных путей Российской Федерации. Критическим элементом данной транспортной артерии являются судоходные шлюзы, чья пропускная способность зачастую выступает лимитирующим фактором на наиболее загруженных участках. В частности, Городецкий гидроузел, расположенный на Волге, выполняет стратегическую функцию связующего звена между Верхней и Средней Волгой.

В настоящее время на объекте ведутся масштабные реконструкционные работы, затрагивающие шлюзы №15 и №16. Инвестиционный проект включает возведение дополнительной камеры №15А с пониженным порогом (отметка -60,0 мБс) и формирование подходного канала до Нижнего Новгорода с гарантированной глубиной 4,0 м. Эти меры призваны обеспечить транзит крупнотоннажного флота вне зависимости от режимов сброса воды Нижегородской ГЭС.

Однако физическое расширение инфраструктуры неизбежно влечет за собой усложнение логистических и технологических процессов. Ожидаемый рост интенсивности движения флота может нивелироваться новыми эксплуатационными вызовами. Во-первых, камера №15А фактически формирует вторую ступень существующего шлюза №15, превращая нитку в двухступенчатую систему («15А–15»), что объективно ведет к кратному росту длительности одного цикла шлюзования. Во-вторых, пропуск через одноступенчатый шлюз №16 (отметка порога -64,0 мБс) остается жестко привязанным к суточной неравномерности работы Нижегородской ГЭС. Ситуация отягощается нормативными требованиями, устанавливающими приоритет пассажирского флота, что формирует вынужденные простои для грузовых составов.

В связи с этим, на этапе подготовки к вводу новых мощностей критически важно разработать гибкую модель диспетчеризации, способную учитывать стохастическую природу прибытия судов и динамические изменения судоходных глубин. Целью данной работы является формирование комплексного методологического подхода к оптимизации шлюзования, включающего геометрическое моделирование загрузки камер и оценку перспектив внедрения нейросетевых алгоритмов.

1. Характеристика объекта и новые эксплуатационные ограничения

После завершения строительства камеры №15А Городецкий гидроузел будет эксплуатироваться в режиме двух параллельных ниток пропуска, обладающих различной топологией:

- Нитка шлюза №16: одноступенчатая схема с порогом на отметке 64,0 мБс.
- Нитка шлюзов №15А–15: двухступенчатая схема с пониженным порогом на отметке 60,0 мБс.

Полезные эксплуатационные габариты всех камер сохраняются на уровне 300 м в длину и 30 м в ширину. Безусловным преимуществом новой конфигурации является гарантия беспрепятственного пропуска судов с большой осадкой в меженный период.

Вместе с тем, выявлен ряд дестабилизирующих факторов, способных снизить общую эффективность системы:

1. Технологическое удвоение цикла. Необходимость последовательного наполнения и опорожнения двух камер на нитке №15А–15 увеличивает базовое время шлюзования приблизительно в два раза.

2. Гидрологическая зависимость. Глубины на пороге шлюза №16 подвержены суточным колебаниям, диктуемым графиками работы Нижегородской ГЭС.



3. Сезонная неравномерность. Пиковые нагрузки на гидроузел приходятся на летние месяцы, что приводит к накоплению очередей на рейдах.

4. Нормативные ограничения. Приоритетный пропуск пассажирского флота и запрет на совместное шлюзование пассажиров с наливными судами требуют постоянного маневра очередностью.

Анализ архивных данных показывает, что «чистое» время шлюзования (без учета рейдовых ожиданий и маневров) составляет 30–45 минут. Однако в периоды пиковой нагрузки полный цикл обработки судна может растягиваться до 70 часов. Исторический коэффициент использования камер по времени находится на уровне 0,298, что свидетельствует о наличии значительных резервов, которые необходимо актуализировать с учетом новых реалий.

2. Концептуальная модель оптимизации пространственного и временного распределения

Для повышения эффективности диспетчеризации разработан алгоритм, базирующийся на двух взаимосвязанных критериях: геометрическом (максимизация загрузки камеры) и временном (минимизация простоев).

Геометрический критерий. Целевая функция направлена на максимизацию суммарного коэффициента заполнения полезной площади камер. Алгоритм рассчитывает долю использования длины и ширины шлюзовой камеры путем суммирования габаритов судов с учетом обязательных технологических зазоров (безопасных дистанций). Позиционирование каждого судна или состава описывается в трехмерной системе координат с учетом его длины, ширины и осадки.

Особое внимание уделяется типологической совместимости. Ввиду строгих правил безопасности, алгоритм формирует изолированные группы шлюзования:

Группа 1: исключительно пассажирский флот.

Группа 2: наливные суда и составы.

Группа 3: прочий грузовой флот (балкеры, контейнеровозы, сухогрузные баржи).

Модель динамически оценивает варианты комбинирования этих групп по доступным ниткам, стремясь к тому, чтобы коэффициент заполнения площади каждой отдельной камеры стремился к единице, исключая «холостые» габариты.

Временной критерий. Второй блок модели минимизирует совокупные затраты времени на ожидание и обработку. Система вычисляет оптимальные интервалы между началами циклов наполнения и опорожнения, синхронизируя время подхода судов к камере с моментом ее освобождения. Алгоритм учитывает время в пути от якорных стоянок до шлюза, длительность самих гидротехнических операций и обязательные паузы для безопасного расхождения судов в камерах.

Ключевым ограничением выступает динамический параметр глубины на пороге шлюза №16, который является функцией от текущего расхода воды через створ ГЭС. Если осадка судов в ожидающей группе превышает доступную глубину, алгоритм автоматически перенаправляет поток на двухступенчатую нитку №15А–15, пересчитывая при этом временные затраты на двойной цикл.

3. Верификация модели на основе статистических данных

Для оценки практической эффективности предложенного алгоритма был проведен ретроспективный анализ типичной ситуации пиковой нагрузки (июль-август).

Сценарий моделирования: одновременный подход на рейд пассажирского теплохода типа «Ракета» (60 х 10 м) и грузового состава (толкатель с двумя баржами, 180 х 16,5 м).

Таблица 1 Сравнительная оценка показателей шлюзования

Параметр	Реальная практика (статистика)	Предлагаемая методика (расчет)	Ед. изм.
Время ожидания пассажирского судна	45	15	мин
Время ожидания грузового состава	120	60	мин
Коэффициент использования площади камеры	0,45	0,78	отн. ед.
Общее время цикла обработки группы	165	75	мин
Количество шлюзований в сутки	18	24	ед.

В традиционной практике диспетчеры часто вынуждены пропускать пассажирское судно в одиночном режиме, что оставляет камеру недогруженной (коэффициент 0,45) и блокирует нитку для грузового флота.

Применение разработанной методики позволяет дифференцировать потоки: пассажирское судно направляется на одноступенчатый шлюз №16 (при условии достаточной глубины), а грузовой состав формируется в плотную группу для шлюзования через камеру №15А. Как демонстрируют данные Таблицы 1, такой подход обеспечивает рост суточной пропускной способности на 33% (с 18 до 24 шлюзований) и двукратное сокращение времени ожидания для грузовых составов. Эффект достигается за счет исключения межрейсовых простоев и плотной геометрической упаковки судов в камерах.

4. Интеграция инструментов искусственного интеллекта

Детерминированная математическая модель обладает высокой точностью, однако она уязвима к стохастическим колебаниям: задержкам судов, внезапным изменениям погоды и сбоям в работе ГЭС. Для перехода от реактивного к проактивному управлению предлагается внедрение гибридной системы на базе искусственного интеллекта (ИИ).

1. Нейросетевое прогнозирование прибытия. Применение рекуррентных нейронных сетей (архитектуры LSTM) позволяет анализировать массивы исторических данных, метеосводки и текущие скорости судов. Это обеспечивает высокоточное предсказание момента подхода флота к рейду, что является базой для упреждающего планирования.

2. Маршрутизация на основе обучения с подкреплением. Алгоритмы reinforcement learning используются для выбора оптимальной стратегии распределения судов по ниткам. ИИ-агент обучается минимизировать общее время ожидания, получая «вознаграждение» за успешную группировку и «штраф» за нарушение нормативных пауз. Система способна мгновенно адаптироваться к нештатным ситуациям, таким как авария на шлюзе или экстренный сброс воды ГЭС.

3. Компьютерное зрение для автоматизации замера габаритов. Интеграция камер машинного зрения на подходных каналах позволяет в автоматическом режиме считывать фактические размеры судов и контролировать их позиционирование в камере относительно осей. Это полностью исключает влияние человеческого фактора при вводе данных диспетчером и позволяет динамически корректировать коэффициент заполнения площади в реальном времени.

5. Результаты и ограничения исследования

Практическая значимость предложенного подхода выражается в устранении «геометрического» лимитирующего фактора. Плотная группировка судов по типам и



габаритам еще на этапе подхода к гидроузлу способна дать значительный экономический эффект за счет снижения расхода топлива флотом, находящимся в ожидании, и ускорения оборачиваемости грузов.

Вместе с тем, выявлены и определенные ограничения модели. Алгоритм демонстрирует высокую чувствительность к точности данных о режимах работы Нижегородской ГЭС. В периоды критически низких попусков шлюз №16 выпадает из логистической цепочки из-за ограничений по осадке, что вынуждает систему направлять весь поток на двухступенчатую нитку №15А–15, неизбежно увеличивая общие временные затраты. Тем не менее, даже частичная автоматизация процессов группировки судов способна существенно разгрузить рейды.

Заключение

По итогам проведенного исследования, посвященного оптимизации шлюзования на Городецком гидроузле в период его реконструкции, можно сделать следующие выводы:

1. Ввод камеры №15А, повышая гарантированные глубины, одновременно трансформирует систему в двухступенчатую, что требует кардинального пересмотра алгоритмов диспетчеризации для компенсации возросшего времени цикла.

2. Разработанный концептуальный алгоритм позволяет максимизировать коэффициент использования полезной площади камер и сократить время рейдовых ожиданий за счет интеллектуального распределения судопотоков между нитками №16 и №15А–15.

3. Ретроспективное моделирование подтвердило, что внедрение методики жесткого типологического и геометрического группирования способно увеличить количество суточных шлюзований на 33% и вдвое сократить простои грузового флота.

4. Интеграция технологий искусственного интеллекта (прогнозная аналитика и обучение с подкреплением) является необходимым условием для нивелирования стохастической неопределенности и обеспечения устойчивой работы гидроузла в новых инфраструктурных реалиях.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой полноценного программного прототипа системы поддержки принятия решений (СППР) для диспетчерских служб и апробацией алгоритмов в ходе натурных наблюдений в период предстоящей навигации.

Список литературы:

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 01.04.2024 № 771-р.
2. Родионов А. А., Румянцев В. А., Фёдоров М. П.[и др.]. Варианты решения проблем судоходства на лимитированном участке реки Волги от Городецкого гидроузла до Нижнего Новгорода, в том числе с учетом оценки влияния на санитарно-эпидемиологическую и экологическую ситуацию в регионе// *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 4.
3. Каменский С. Б., Кривошей В. А., Медведева О. Е.[и др.]. Экономические методы выбора варианта улучшения условий судоходства на примере оценки эффективности затрат по реконструкции Городецких шлюзов на Волге// *Проблемы экологии Волжского бассейна: труды 8-й Всерос. науч. конф. «Волга – 2023»*. Вып. 6. 2023.
4. Агеев С. О. Совершенствование обеспечения эксплуатации низконапорных гидроузлов в целях улучшения условий судоходства в их бьефах (на примере Нижегородского гидроузла на р. Волга): дис.... канд. тех. наук. Нижний Новгород, 2021.
5. Правила пропуска судов и составов через шлюзы внутренних водных путей Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 03.03.2014 № 58.



6. Ковалев Д. А. Оценка влияния строительства камеры шлюза №15А на пропускную способность Городецких шлюзов №15–16// Транспорт. Горизонты развития: труды 4-го Междунар. науч.-промышлен. форума. Нижний Новгород, 2024.

7. Анализ заносимости перекатов в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС по итогам проведения транзитных и капитальных дноуглубительных работ в 2021 г. на участке р. Волга(845,5–895,0 км) и оценка влияния капитального дноуглубления на посадку уровня воды на порогах шлюзов №15 и №16 Городецкого гидроузла: отчет о НИР/ ФГБУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». Нижний Новгород, 2022.

