

ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА СВОБОДНЫХ И ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РЕКАХ

Г.Л. Гладков

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
г. Санкт-Петербург, Россия*

gladkovgl@gumrf.ru

Поступила в редакцию: 10.02.2025

После доработки: 12.02.2025

Принята к публикации: 16.02.2025

Аннотация. В современных условиях при содержании судовых ходов на внутренних водных путях необходимо учитывать естественный ход развития руслового процесса, сезонные и многолетние деформации русел, климатообусловленные изменения характеристик речного стока, а также антропогенные изменения водного и руслового режимов судоходных рек. Последний фактор проявляется вследствие инженерного (техногенного) воздействия, а также в результате регулирования речного стока гидроузлами. Проведенные исследования показали, что к настоящему времени на целом ряде участков крупных судоходных рек России в силу этих причин произошли эрозионное врезание русел и необратимое понижение меженных уровней воды. На отдельных участках водных путей эти изменения стали критическими для обеспечения безопасного судоходства, что потребовало проведения реконструкции существующих судопропускных гидротехнических сооружений и строительства новых низконапорных гидроузлов. В настоящее время на р. Волге проводится реконструкция Городецких шлюзов для обеспечения судоходства на лимитирующем участке от створа Нижегородской ГЭС до г. Нижнего Новгорода; на р. Дон строится Багаевский низконапорный гидроузел. Возобновились строительство Красногорского водоподъемного гидроузла на р. Иртыш в районе г. Омска. Рассматриваются возможные варианты для решения проблемы обеспечения судоходства на участке р. Камы от створа Воткинской ГЭС до п. Камбарки. Исследования скоростного режима речного потока, выполненные в нижних бьефах гидроузлов, показали, что при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе отмечается активизация транспорта наносов, как в летний период наблюдений — в условиях открытого русла, так и зимой, при движении воды подо льдом.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, русловые переформирования

DOI: [10.71367/3034-4638-2025-2-2-68-79](https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-2-2-68-79)

ВВЕДЕНИЕ

Протяженность внутренних водных путей России составляет 101.7 тыс. км, из которых 50.2 тыс. км — пути с гарантированными габаритами. На протяжении 38.8 тыс. км путей обеспечивается возможность круглосуточного движения судов в течение навигации. Потребности внутреннего водного транспорта обслуживает 741 гидротехническое сооружение (Транспортная стратегия..., 2021). Количество грузовых судов внутреннего водного транспорта в настоящее время составляет 21.2 тыс. единиц, в т.ч. пассажирских и грузопассажирских транспортных судов внутреннего водного

транспорта — 2.2 тыс. единиц. Средний возраст судов внутреннего водного транспорта превысил 40 лет. Объем грузовых перевозок внутренним водным транспортом в 2023 г. составил 109.3 млн тонн при средней дальности перевозки около 600 км.

Объем пассажирских перевозок внутренним водным транспортом составил 10.6 млн пассажиров, в том числе объем перевозок в международном сообщении составил более 100 тыс. пассажиров. Объем перевозок на переправах — 4.8 млн пассажиров, объем внутригородских перевозок — 1.5 млн пассажиров, объем пригородных перевозок —

2.17 млн пассажиров, объем туристических круизов — 369.7 тыс. пассажиров.

При проектировании и содержании судовых ходов на внутренних водных путях в современных условиях необходимо учитывать естественный русловой режим и деформации русел, климатобусловленные изменения характеристик речного стока, а также антропогенные изменения водного и руслового режимов судоходных рек.

КЛИМАТООБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА

К настоящему времени практически на всех судоходных реках России произошли значимые изменения характеристик внутригодового распределения речного стока вследствие развития глобальных климатобусловленных процессов. В разных речных бассейнах эти изменения проявились различным образом.

Исследования динамики изменения характеристик водных ресурсов страны, выполненные Государственным гидрологическим институтом за 1936–2012 гг. (Георгиевский, Шалыгин, 2012; Георгиевский и др., 2013), Институтом водных проблем РАН и Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова (Гельфан и др., 2021), а также материалы Третьего оценочного доклада Росгидромета (Третий оценочный доклад..., 2022) показали, что за последние три десятилетия в этом ряду наблюдений водные ресурсы испытывают значительные изменения во времени.

На европейской территории России произошла интенсификация гидрологического цикла, проявившаяся в росте величин осадков, речного стока, испарения и потенциального испарения. При этом для крупнейших рек бассейна Северного Ледовитого океана (Печора, Енисей, Лена) характерно повышение их водности. В изменение величины годового стока основной вклад внесло изменение слоя годовых осадков. Годовой сток рек Сибири и Дальнего Востока в арктические моря России неуклонно растет с 1980-х гг. Наиболее заметен рост в нижней части бассейна Иртыша и на Обь-Иртышском междуречье, на восточном склоне Уральских гор, а также на территории от Хатанги до Колымы. В последние 30 лет в средней и южной части европейской территории России — в бассейнах Волги, Оки, Вятки, Дона — наблюдаются снижение объемов половодья, рост меженных расходов воды и увеличение доли паводочного стока.

Главной особенностью изменения внутригодового распределения стока воды в пределах значительной части ЕТР стало уменьшение роли половодья

в формировании годового стока рек, уменьшение максимальных и значительное увеличение минимальных расходов воды. Типичный для рек региона восточно-европейский тип водного режима с одним годовым максимумом стока трансформируется в режим, для которого характерен гребенчатый тип гидрографа в период максимального стока. Ранее таких изменений водного режима не происходило вследствие доминирующей роли стока за период весеннего половодья. В этих районах в результате повышения зимних температур воздуха возросли число и продолжительность оттепелей, уменьшились предвесенние запасы воды.

Увеличение водности рек в зимний сезон года характерно практически для всей территории страны. Зимний сток в бассейнах Волги, Дона, рек запада ЕТР возрос на 50–120%. В колебаниях минимального стока холодного периода выявлены статистически значимые положительные тренды. Они обусловлены увеличением увлажненности, подземного питания рек и значительным возрастанием естественной зарегулированности стока.

Летне-осенний сток рек во многих регионах России также возрос. Наиболее существенное его увеличение (на 40–70%) характерно для рек южной части лесной, лесостепной и степной зон ЕТР. В верхней части бассейна Северной Двины это увеличение не превышало 25%. На реках юга Западной Сибири минимальные расходы воды в целом возрастали (на фоне увеличения коэффициента вариации стока), увеличение зимнего стока на 20–40% произошло на реках бассейна Лены, а также в бассейнах рек Оленёк, Яны, Индигирки.

В результате проявления на реках однонаправленных положительных линейных трендов стока в летне-осенний и зимний периоды произошли нарушения однородности (стационарности) многолетних рядов наблюдений. Эти изменения необходимо будет учитывать в дальнейшем в практической деятельности при гидрологическом обосновании путевых мероприятий на внутренних водных путях. Использование новых данных в области речной гидрологии позволит существенным образом улучшить качество гидрологического обеспечения условий судоходства на внутренних водных путях.

Можно предположить, что в отдельных бассейнах водных путей вследствие перераспределения внутригодового стока в пользу меженно-осеннего периода произойдет заметное повышение уровней воды в маловодные периоды навигации. В этих бассейнах возможно ослабление зависимости качества судоходных условий на плёсах от объемов эксплуатационного землечерпания. Вместе с изменением гидрологического режима на судоходных

реках будут происходить изменения характера и интенсивности сезонных деформаций перекатов, их морфологии, переформирований разветвлений речных русел в связи с новыми условиями рассредоточения стока по рукавам, изменения условий спрямления излучин и отторжения побочней и др.

В связи с этим придется вносить определенные корректировки в сложившиеся и апробированные за длительный период методы проектирования и выполнения дноуглубительных работ на судоходных плёсах, в практику трассирования эксплуатационных прорезей и капитальных выправительных работ.

АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛОВОГО РЕЖИМА

Другим аргументом, обуславливающим необходимость разработки гидрологического обеспечения условий судоходства на внутренних водных путях, является то, что к настоящему времени на целом ряде крупных судоходных рек России произошли значимые изменения руслового режима в результате разработки русловых карьеров нерудных строительных материалов и обусловленных этими мероприятиями врезания русел рек и понижения (посадки) уровня воды.

В работах (Беркович, 2005; Гладков и др., 2023) приведены результаты анализа гидрологического режима и трансформации русел рек Томи в районе г. Томска, Оки на участке г. Калуга — г. Рязань, Белой на участке г. Уфа — г. Бирск, Иртыша в районе г. Омска, Оби у г. Новосибирска, Вятки в районе г. Кирова. Добыча НСМ производится из русел многих других судоходных рек. Эти изменения негативно сказываются не только на судоходных качествах рек, но и в целом на условиях водопользования (на работе водозаборов, устойчивости инженерных объектов и т.д.), усугубляясь с течением времени из-за нарушения допустимых объемов добычи, игнорирования научно обоснованных и согласованных методических указаний.

Одним из основных возможных путей решения проблемы восстановления уровней воды в данном случае является строительство низконапорных гидроузлов (Гладков и др., 2018).

На зарегулированных участках рек основные затруднения для судоходства проявляются вследствие развития эрозионных процессов в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора от ниже расположенных водохранилищ. В границах Единой глубоководной системы европейской части РФ на сегодняшний день не обеспечиваются необходимые для судоходства глубины на р. Волге в нижнем бье-

фе Нижегородского гидроузла, на участке р. Камы ниже Чайковского шлюза, на р. Дон в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла, на р. Волге ниже Волгоградского гидроузла. На ряде участков судоходных рек к настоящему времени ситуация стала критичной.

В настоящее время на р. Волге проводится реконструкция Городецких шлюзов для обеспечения судоходства на лимитирующем участке от створа Нижегородской ГЭС до г. Нижнего Новгорода; на р. Дон строится Багаевский низконапорный гидроузел. Возобновились строительство Красногорского водоподъемного гидроузла на р. Иртыш в районе г. Омска. Рассматриваются возможные варианты для решения проблемы обеспечения судоходства на участке р. Камы от створа Воткинской ГЭС до п. Камбарки.

На Нижней Волге есть также ряд других затруднительных участков, в первую очередь — Саралевский узел (Чалов, Завадский, 2019), без решения проблемы которого вопрос эффективного использования воднотранспортного коридора на р. Волге остается открытым.

Красногорский водоподъемный гидроузел на реке Иртыш

Река Иртыш в своем верхнем течении на территории Республики Казахстан зарегулирована каскадом из трех гидроузлов — Бухтарминским, Усть-Каменогорским и Шульбинским. Бухтарминский гидроузел осуществляет многолетнее регулирование и является основным регулятором стока на р. Иртыш. Шульбинский гидроузел, являющийся последней на сегодняшний день ступенью Верхне-Иртышского каскада гидроузлов, расположен в 1094 км выше по течению от г. Омска. Его водохранилище с полезным объемом 1,47 км³ осуществляет сезонное регулирование стока.

На участке от створа Шульбинской ГЭС до г. Омска естественная боковая приточность практически отсутствует. С конца XX в. и по настоящее время г. Омск находится в условиях дефицита водных ресурсов (Кожевников, Стазаева, 1983). Негативные последствия при этом проявляются в нарушении условий работы водозаборов и других инженерных коммуникаций, оголении свайных оснований гидротехнических сооружений, заболачивании и зарастании дна на мелководьях. Причинами низкой водности р. Иртыш в районе г. Омска являются отбор воды из р. Иртыш в границах Китайской Народной Республики и Республики Казахстан, изменение гидрологического режима р. Иртыш после ввода в эксплуатацию гидроузлов на верхнем Иртыше, а также хозяйственная дея-

тельность, включая добычу речного аллювия из русла реки в районе г. Омска.

Основной фазой водного режима р. Иртыш и ее притоков является весенне-летнее половодье, в период которого проходит в среднем 45% годового стока и формируются максимальные в году расходы и наивысшие уровни воды. Максимальные расходы воды чаще всего проходят в мае, средняя дата наступления максимальных расходов воды р. Иртыш — г. Омск приходится на третью декаду мая. Наивысшие уровни воды проходят в период весеннего половодья при свободном русле. Наивысший уровень воды составил 73.37 м БС, высший уровень ледохода составил 72.15 м БС. Низшие уровни отмечаются в период открытого русла (период летне-осенней межени) и в зимний период. Низший уровень р. Иртыш в створе г. Омска в период открытого русла составил 66.81 м БС, в зимний период — 66.73 м БС.

В целях устранения негативных последствий в периоды маловодья в 2008 г. было разработано Техничко-экономическое обоснование мероприятий по регулированию стока р. Иртыш на территории Омской области (Орищук и др., 2024). В качестве основных способов регулирования стока было рассмотрено два основных варианта:

— строительство каскада низконапорных переливных плотин в пределах современного русла;

— водохранилище сезонного регулирования выше г. Омска и переливная плотина ниже г. Омска в Красногорском створе.

По результатам проработок в качестве приоритетного был рекомендован второй вариант, предусматривающий строительство водоподъемного гидроузла.

Схема компоновки основных сооружений Красногорского водоподъемного гидроузла показана на рис. 1.

Левобережная и правобережная водосливные плотины имеют по 6 пролетов по 16 м, пролеты перекрываются плоскими затворами. Отметка порога водосливных секций — 65.1 м БС. Максимальный напор на сооружения — 4.7 м. Камера шлюза имеет длину 150.0 м, ширину в свету 20.0 м и высоту стен от дна до верха парапета 14.9 ÷ 15.1 м. В поперечном сечении камера представляет собой конструкцию докового типа и запроектирована из монолитного железобетона. Шлюз имеет сосредоточенную (головную) систему питания. Наполнение и опорожнение камеры шлюза при принятом механическом оборудовании осуществляется с помощью обходных водопроводных галерей, расположенных в устоях голов.

Нормальный подпорный уровень (НПУ) проектируемого гидроузла принят на абсолютной отметке 70.0 м, форсированный подпорный уровень

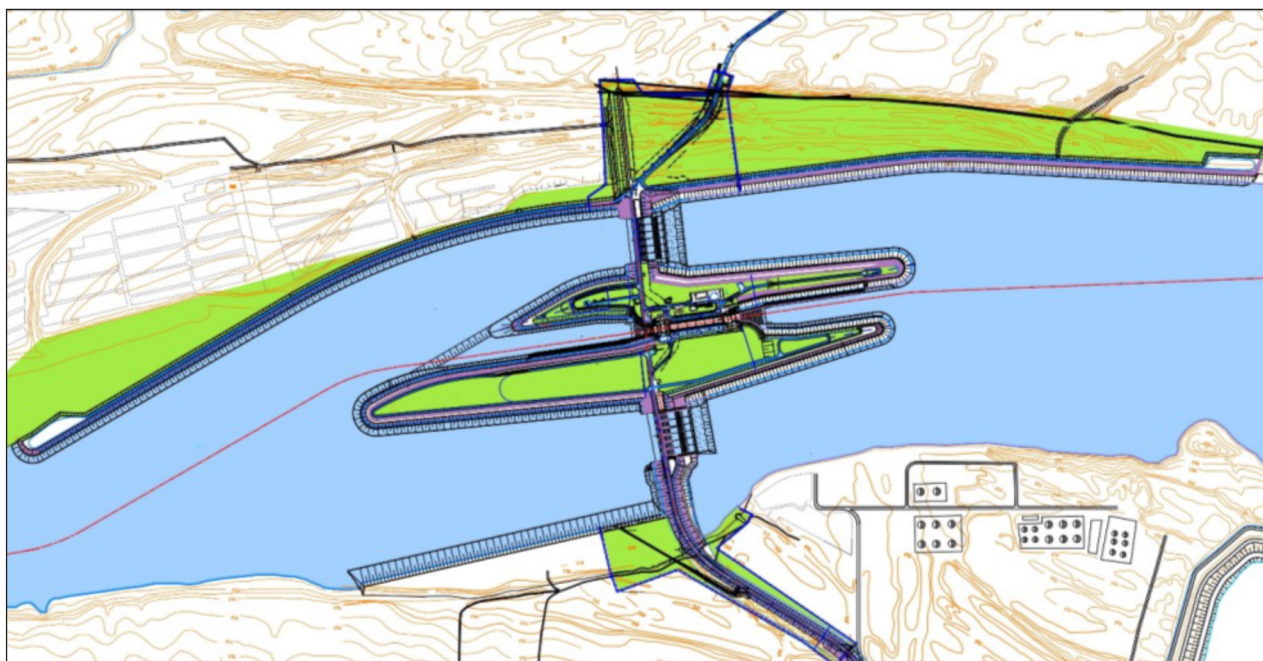


Рис. 1. Схема компоновки Красногорского гидроузла

Fig. 1. Layout diagram of Krasnogorsk hydroelectric complex

(ФПУ) — на абсолютной отметке 74.3 м. Уровень нижнего бьефа принимается равным 66.7 м.

При строительстве и дальнейшей эксплуатации Красногорского гидроузла произойдет изменение гидравлических характеристик русла, изменится скоростной режим потока, а также характер и интенсивность русловых переформирований, как в верхнем бьефе, так и в нижнем бьефе гидроузла. При содержании судовых ходов после ввода гидроузла в эксплуатацию потребуется осуществлять мониторинг руслового режима в зоне влияния подпорных сооружений.

Реконструкция Городецких шлюзов на реке Волге

Первые проблемы, связанные с обеспечением судоходства в нижнем бьефе Городецких шлюзов, начали проявляться уже в конце 60-х — начале 70-х гг. прошлого века. Это было связано с тем, что вследствие развития эрозионных процессов на участке р. Волги, расположенном выше границы зоны выклинивания подпора от Чебоксарского водохранилища, а также в результате проведения дноуглубительных работ на судоходном фарватере и разработки русловых карьеров в русле реки отметки уровня воды в нижнем бьефе гидроузла стали понижаться. В настоящее время величина снижения уровня воды на пороге нижней ступени Городецких шлюзов оценивается величиной порядка 130–150 см, что привело к существенному ограничению транзитного судоходства с использованием крупнотоннажного флота на данном участке Единой глубоководной системы европейской части России.

Возможны два основных пути решения рассматриваемой проблемы обеспечения судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на р. Волге (Гладков и др., 2021). Первый из них, который гарантированно решает проблемы судоходства и обеспечивает сохранность в эксплуатации всех существующих объектов инфраструктуры водного транспорта, заключается в создании дополнительного подпора в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла.

В соответствии с принятым ранее отрицательным решением по вопросу реконструкции Чебоксарского гидроузла, в составе т.н. «Проекта 68», предусматривающего наполнение Чебоксарского водохранилища до отметки 68.0 м БС, в данном случае речь идет о возможности создания подпора на проблемном для судоходства участке р. Волги путем строительства низконапорного гидроузла в районе пос. Большое Козино. Для низконапорного гидроузла (ННГУ) были выполнены необходимые

инженерно-гидрометеорологические изыскания и разработана проектная документация, которая получила в результате отрицательное заключение государственной экспертизы.

В связи с выявленными многочисленными экологическими, социальными и техногенными рисками (Родионов и др., 2022) данный проект в настоящее время не может быть рекомендован для реализации на практике без существенной переработки и изменения ряда основных проектных решений.

Альтернативное решение проблемы судоходства на данном участке заключается в строительстве дополнительного судопропускного сооружения с пониженным порогом и днищем камеры в нижнем бьефе гидроузла. Кроме этого, для обеспечения судоходства от Городца до Нижнего Новгорода необходимо создать в русле р. Волги судоходный канал — дноуглубительную прорезь на участке от Городецких шлюзов до границы зоны выклинивания подпора от Чебоксарского водохранилища.

В качестве основных вариантов, альтернативных строительству ННГУ, рассматривались следующие предложения:

- строительство третьей нитки шлюзов нижней ступени Городецких шлюзов с пониженным заложением порога;
- строительство в составе Городецких шлюзов дополнительной камеры шлюза № 15А.

В соответствии с принятым решением в настоящее время в рамках проекта реконструкции Городецких шлюзов на р. Волге реализуется второй вариант, предусматривающий строительство дополнительной камеры судоходного шлюза и создание судоходного канала в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на свободном от подпора участке р. Волги.

Проблему обеспечения судоходства на участке р. Волги, расположенном ниже Городца, целесообразно решать совместно с проведением оптимизации стока Рыбинского и Горьковского водохранилищ, в том числе путем увеличения сбросных расходов в нижний бьеф Нижегородской ГЭС до 1300 м³/с.

Обеспечение условий судоходства на Нижнем Дону

Транспортное гидротехническое строительство в интересах водного транспорта в бассейне Нижнего Дона началось более ста лет назад, в первом десятилетии XX в. Современное состояние руслового режима р. Нижний Дон характеризуется тем, что к настоящему времени произошло необратимое понижение отметок дна и уровней воды. Эти изменения связаны со строительством и последующей

эксплуатацией каскада гидроузлов на Нижнем Дону (Гладков и др., 2017), а также с проведением в русле реки дноуглубительных работ по обеспечению судоходных условий и работ по добыче нерудных материалов.

Имеющиеся данные показывают, что снижение уровней воды проявилось по всей длине судоходного участка, однако величина понижения бытовых отметок уменьшается вниз по течению реки по мере удаления от Кочетовского гидроузла. В нижнем бьефе Кочетовского гидроузла величина понижения уровня воды при расходе воды 95% обеспеченности в навигационный период составляет, по предварительной оценке, около 180–190 см. В створе Раздорского гидрологического поста уровни воды при таком расходе понизились на величину 120–140 см. На нижерасположенном Багаевском посту снижение составило около 60 см.

В современных условиях транспортная система Нижнего Дона является одним из самых грузонапряженных участков внутренних водных путей Российской Федерации. Наибольшие затруднения для судоходства представляет участок реки от Кочетовского гидроузла до устья притока Дона — р. Маныч. Колебание уровней воды в навигационный период может достигать 1.5 м и в значительной степени зависит от боковой приточности, а также ветровых сгонно-нагонных явлений.

В целях повышения транспортной доступности и улучшения условий работы водохозяйственного комплекса Донского региона, а также обеспечения надежности и безопасности судоходства крупнотоннажного флота на Нижнем Дону в настоящее время ведется строительство низконапорного Багаевского гидроузла. Створ гидроузла расположен на 4.4 км ниже устья притока Дона — р. Маныч. Ширина судоходной части русла реки в створе составляет около 210 м. В створ гидроузла попадают остров Арпачинский (Белый) и левый рукав р. Дон шириной около 160 м.

Русловые переформирования в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла исследовались в нескольких аспектах (Гладков и др., 2018), включая анализ плановых и высотных переформирований на анализируемом участке р. Нижний Дон. Основные затруднения для судоходства в подпорных условиях, после реализации проекта Багаевского гидроузла, возможны в верхней части участка, вблизи границы зоны выклинивания подпора.

Исследования, выполненные в ходе проектных и изыскательских работ (Гладков и др., 2018), позволили получить детальную информацию о реальных изменениях гидрологического и руслового режимов Нижнего Дона, которые произошли к настоящему

времени в результате эксплуатации каскада вышерасположенных гидроузлов и осуществления хозяйственной деятельности в бассейне реки. Материалы исследований позволили установить проектные характеристики создаваемого водохранилища, а также получить рекомендации по проблеме восстановления водного режима на Нижнем Дону.

В качестве аппарата исследований в работе использовались результаты математического и гидравлического моделирования проектируемых сооружений. Гидравлические расчеты выполнялись с использованием 2D — гидродинамической модели, основанной на решении методом конечных элементов системы уравнений движения и неразрывности в приближении мелкой воды.

Современный аппарат позволяет с достаточной степенью надежности решать задачи о распределении средних на вертикали скоростей течения в речных потоках и моделировать влияние проектируемых мероприятий на скоростной режим и уровни воды.

В процессе разработки проекта Багаевского гидроузла были проведены экспериментальные исследования на пространственной гидравлической модели участка р. Дон и сооружений Багаевского гидроузла, построенной в масштабе 1:100 в Русловой гидравлической лаборатории Государственного гидрологического института. Для строительства пространственной гидравлической модели участка р. Дон были использованы материалы инженерных изысканий и проектные решения по основным сооружениям Багаевского гидроузла. Общий вид гидравлической модели показан на рис. 2.

Гидравлические исследования на модели проводились для нескольких вариантов состояния русла, соответствующих различным этапам строительства запроектированных сооружений. Анализ материалов гидравлических исследований на модели Багаевского гидроузла позволил подтвердить высокую эффективность и обоснованность основных проектных инженерных решений и внести отдельные корректировки, способствующие повышению безопасности и надежности его работы.

ГИДРАВЛИКА ПОТОКА В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГИДРОУЗЛОВ

Исследования гидравлических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов стали проводиться в первой половине прошлого столетия одновременно с началом активного гидротехнического строительства. В монографиях (Исследования..., 1963; Розовский и др., 1967; Грушевский, 1982), посвященных изучению неустановившегося



Рис. 2. Общий вид гидравлической модели Багаевского гидроузла на р. Дон

Fig. 2. General view of the hydraulic model of the Bagaevsky hydroelectric complex on the Don river

движения воды в реках, приведены сведения о том, что при прохождении волн попусков в нижних бьефах гидроузлов нарушается однозначная связь между расходами и уровнями воды. По мере своего удаления от створа гидроузла вниз по течению реки волна попуска расплывается, в результате чего амплитуды изменения величины попускowego расхода воды и высоты волны попуска по длине реки уменьшаются. При прохождении волны попуска эпюра распределения скорости течения воды по вертикали трансформируется; причем наиболее сильные изменения в кинематике потока наблюдаются в непосредственной близости от створа гидроузла.

Проведенные исследования (Graf, Suszka, 1985; Graf, 1998; Mrokwowska, Rowinski, 2019; Wang et al., 2019; Marian Muste et al., 2020) позволили в целом изучить особенности гидравлики потока при меняющемся во времени расходе воды. Было установлено, что при неустановившемся движении воды две переменные потока (уровень и расход воды) различны для восходящей и нисходящей части попускковой волны; пики переменных характеристик потока не совпадают и распределены по времени в следующем порядке: уклон свободной поверхности воды, средняя скорость в поперечном сечении, расход воды и уровень воды. Каких-либо определенных данных о динамике грядового рельефа в условиях неустановившегося движения воды в этих работах не приводится.

Исследования гидрологического режима в нижних бьефах ряда гидроузлов на крупных судоходных реках, а также выполнение численных экспериментов по оценке гидравлических характеристик

речного потока и параметров транспорта наносов по данным почасовых наблюдений за сбросными расходами и уровнями воды позволили выявить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды и получить определенные рекомендации для установления граничных условий при моделировании русловых переформирований в реках (Гладков, Ржаковская, 2023; Гладков и др., 2023; Гладков, Католиков, 2023; Gladkov G. et al., 2024).

Анализ хода уровней воды в нижних бьефах гидроузлов показал, что в многолетнем разрезе на гидрологических постах Нижний бьеф ГЭС, г. Городец и г. Балахна на р. Волге отчетливо прослеживается тренд на понижение минимальных уровней воды за весь период наблюдений. Со времени ввода в эксплуатацию сооружений Чебоксарского гидроузла минимальные навигационные уровни в нижнем бьефе гидроузла понижались со средней интенсивностью 1.7–1.8 см/год; начиная с 2006 г. этот процесс ускорился, и средняя интенсивность снижения уровней воды составила 2.5–3.2 см/год.

В нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС — на верховом участке Куйбышевского водохранилища — ситуация с минимальными навигационными уровнями воды не такая критичная. Снижение уровней воды в нижнем бьефе гидроузла за период последнего маловодья происходит в среднем на величину около 1.2 см за год. В свою очередь, в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС, являющейся нижним (замыкающим) сооружением Волжско-Камского каскада гидроузлов на Волге, средняя величина понижения минимальных уровней воды составляет около 1.7 см за год. В настоящее время проектные уровни воды в нижнем бьефе

гидроузла гарантируются при расходах воды через Волгоградский гидроузел не менее 5000 м³/с.

Результаты анализа гидравлических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов показали, что при суточном регулировании стока скорость течения в нижнем бьефе значительную часть времени в течение каждых суток и навигации в целом оказывается меньше неразмывающей скорости, а во время прохождения волны попуска превышает ее. Это свидетельствует о том, что в моменты попуска на участке будет иметь место транспорт наносов, а после прохождения волны попуска движение наносов приостанавливается.

В результате суточного регулирования стока скорости течения воды изменяются в достаточно большом диапазоне значений. Минимальные значения скорости течения воды в живом сечении отвечают моменту окончания сбросного попуска воды на гидроузле. Далее, несмотря на продолжающееся понижение уровней воды в створе поста, скорость течения начинает возрастать с небольшой интенсивностью при минимальном сбросном расходе воды до момента наступления самого низкого уровня воды на гидростворе. С этого момента начинается новый попуск воды, и скорость течения воды интенсивно возрастает до своего максимального значения. Своего максимума сбросной расход воды достигает несколько позже по времени.

В естественных русловых потоках с подвижным дном характеристики грядового рельефа дна — размеры гряд и скорость их перемещения — определяются скоростью течения воды и глубиной потока. Численные эксперименты (Гладков, Ржаковская, 2023; Гладков и др., 2023; Гладков, Католиков, 2023; Gladkov G. et al., 2024) показали, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны сбросного попуска воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов — скорость перемещения гряд и расход наносов — возрастают по сравнению со стационарным течением воды. Определяющим фактором русловых переформирований в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками воды.

Результаты численных экспериментов, выполненных для трех гидроузлов, показали, что при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла средний за сутки расход наносов возрастает в 2 раза и более по сравнению с аналогичными данными при установившемся движении воды при

равных значениях среднесуточных расходов воды за расчетный период времени. Полученные результаты далее были проверены в ходе экспериментальных исследований в гидравлическом лотке.

Для апробации результатов численного моделирования (Гладков и др., 2024) был выполнен анализ имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, а также проведены новые эксперименты в гидравлическом лотке с песчаным дном. Исследования проводились на Главной экспериментальной базе ГГИ в гидравлическом лотке длиной 8.0 м и шириной 0.21 м.

Лоток оборудован устройствами для изменения уклона дна в диапазоне значений: прямой — до 0.025, обратный — до 0.015, а также для автоматического воспроизведения гидрографа стока по заданной программе. Расходы в экспериментах изменялись в диапазоне от 2.0 до 6.0 л/с. В качестве руслового материала использовался кварцевый песок диаметром от 0.1 до 0.3 мм. Основные технические характеристики гидравлического лотка приведены в работе (Клавен, Копалиани, 2011).

На подготовительном этапе работы было выполнено семь циклов экспериментов при установленном расходе воды в диапазоне его значений от 2.9 до 6.0 л/с. В каждом цикле исследований на дне лотка формировался устойчивый грядовой рельеф дна с глубиной потока в диапазоне значений от 5.2 до 8.8 см, величина которой устанавливалась в лотке в зависимости от подаваемого расхода воды. В ходе проведения каждого цикла экспериментов измерялись размеры гряд на дне лотка и скорости их перемещения, уклоны свободной поверхности, а также скорости течения воды в лотке в различных точках по глубине потока.

Расход наносов в лотке вычислялся по параметрам донных гряд. Для контроля величины твердого стока дополнительно измерялась величина выноса перемещаемых наносов с помощью специальной ловушки, расположенной в концевой части лотка. Гидравлические характеристики потока и параметры гряд при неустановившемся движении воды были измерены в трех циклах экспериментов при трапецеидальном гидрографе попуска воды.

Экспериментальные исследования подтвердили результаты численных экспериментов.

Анализ результатов проведенных исследований (Гладков, Ржаковская, 2024) позволил сформулировать особенности движения наносов при неустановившемся течении воды. Определяющим фактором в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками.

ВЫВОДЫ

Гидроморфологический режим судоходных рек в настоящее время в значительной степени подвержен влиянию антропогенных и климатообусловленных факторов. Повышение значений среднегодовой температуры в речных бассейнах привело к изменению характеристик речного стока и сказалось на изменении водного и ледового режимов. Нарушение условий формирования и прохождения весенних паводков привело к изменению характера и интенсивности сезонных переформирований перекатов.

На свободных реках антропогенные изменения руслового режима обусловлены в основном добычей нерудных строительных материалов из русел рек, которая в прежние годы осуществлялась повсеместно и в значительных объемах. В результате на отдельных участках рек большого протяжения произошло эрозионное врезание русел и понизились меженные уровни воды.

Эрозионные процессы наблюдаются также и в нижних бьефах гидроузлов. Исследования, проведенные на Нижегородском, Чебоксарском, Волгоградском гидроузлах на р. Волге, а также на ряде других гидроузлов на крупных судоходных реках, позволили установить устойчивые односторонние тренды на понижение минимальных уровней воды. Наиболее сильные изменения уровней воды происходят в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора со стороны нижерасположенных водохранилищ.

Происходящие изменения руслового режима на судоходных реках негативно сказались на условиях содержания судовых ходов. На отдельных участках внутренних водных путей снижение меженных уровней воды стало критическим с точки зрения обеспечения безопасности судоходства, что обусловило необходимость проведения реконструкции существующих судопропускных сооружений и строительства дополнительных низконапорных гидроузлов.

Натурные и экспериментальные исследования гидравлики потока в нижних бьефах гидроузлов показали, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны суточного ппуска воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов — скорость перемещения гряд и расход наносов — возрастают по сравнению со стационарным течением воды. Степень увеличения расхода наносов при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла зависит от неравномерности регулирования стока воды (параметров входного гидрографа), удаления расчетного гидроствора от

створа плотины, а также от характера изменения водности в течение навигации.

Прогноз русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов при неустановившемся движении воды представляется сложной задачей и требует проведения дополнительных натурных и экспериментальных исследований. Новые результаты, полученные в данной области исследования, позволяют улучшить практику гидравлических расчетов гидродинамических характеристик речного потока при обосновании путевых мероприятий на судоходных реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р.

Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.

Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Тезисы пленар. докладов VII Всеросс. гидрол. съезда. СПб.: Гидрометеиздат, 2013. С. 26–32.

Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В. и др. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические исследования, 2022. 124 с.

Беркович К.М. Русловые процессы и русловые карьеры. М.: МГУ. 2005. 105 с.

Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. 4-е изд., стер. СПб.: Лань. 2023. 432 с.

Гладков Г.Л., Католиков В.М., Шурухин Л.А. Строительство низконапорных гидроузлов на судоходных реках // Транспорт РФ. 2018. № 5 (78). С. 39–42.

Чалов Р.С., Завадский А.С. Саралевский воднотранспортный узел и проблемы улучшения судоходных условий на нижней Волге // Речной транспорт (XXI век). 2019. № 4 (92). С. 20–23.

Кожевников В.С., Стазаева Н.А. Анализ снижения уровня воды вследствие преобразования русла р. Иртыш у г. Омска под влиянием хозяй-

ственной деятельности. Труды ГГИ, вып. 288. 1983. С. 96–105.

Орищук Р.Н., Обоймов С.В., Орхидеева О.Г. Особенности проектирования и строительства Красногорского водоподъемного гидроузла на реке Иртыш // Проблемы строительства и гидравлики гидротехнических сооружений: сб. мат. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2024. С. 90–96.

Гладков Г.Л., Моргунов К.П., Гарибин П.А. Гидроморфологический режим и судоходные условия в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: Сб. науч. тр.: Вып. 5. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2021. С. 10–27.

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. С. 109–131.

doi: 10.48612/fpg/abfh-m2n7-9mnb

Гладков Г.Л., Католиков В.М., Шурухин Л.А. Обеспечение судоходных условий на нижнем Дону. Сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени профессора В.Е. Тимонова. Т. 1. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2017. С. 196–216.

Исследования неустановившегося движения воды на реке Свири в зимних и летних условиях. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 252 с.

Розовский И.Л., Еременко Е.В., Базилевич В.А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. Киев: Наукова думка. 1967. 276 с.

Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 288 с.

Graf W., Suszka L. Unsteady flow and its effect on sediment transport [Paper presentation]. 21st IAHR Congress, 13–18 August 1985, Melbourne, Australia. 1985.

Graf W.H. Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry. Chichester. New York: Wiley. 1998.

Mrokowska M., Rowinski P. Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments // Water. 2019. No 11(5). 2019. 907 p.

Wang L., Cuthbertson A., Pender G., Zhong D. Bed load sediment transport and morphological evolution in

a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs // Water Resources Research. 2019. No 55(7). P. 5431–5452.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng, Felipe Quintero. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows // Journal of Hydraulic Research. 2020. No 58:6. P. 867–887

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 3. С. 344–358.

Гладков Г.Л., Католиков В.М., Ржаковская П.С. Гидравлика потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Вып. 6. Ч. 1. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2023. С. 24–43.

Гладков Г.Л., Католиков В.М. Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге // Тридцать восьмое пленар. межвуз. координац. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Доклады и сообщения. Пермь. 2023. С. 27–42.

Gladkov G. et al. Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River // International Journal of Sediment Research, <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.01.004>.

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С., Заварзин Р.В. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустановившемся движении воды // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2024. Т. 16. № 2. С. 181–196.

Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История. 2011. 544 с.

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С. Гидравлика речного потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках // Эрозия почв и русловые процессы. М.: НИЛ ЭПиРП. 2024. № 1. С. 70–83.

ОБ АВТОРЕ

Гладков Геннадий Леонидович, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных путей и водных изысканий. Сл. адрес: 198035, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. E-mail: gladkovgl@gumrf.ru

INLAND WATERWAYS OF RUSSIA: PROBLEMS OF HYDROLOGICAL REGIME AND CHANNEL PROCESSES ON FREE AND REGULATED RIVERS

G.L. Gladkov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

gladkovgl@gumrf.ru

Abstract: In modern conditions, when maintaining ship passages on inland waterways, it is necessary to take into account the natural course of the development of the channel process, seasonal and long-term deformations of channels, climatically conditioned changes in the characteristics of river flow, as well as anthropogenic changes in the water and channel regimes of ship rivers. The latter factor is manifested both as a result of engineering (technogenic) impact, as well as a result of regulation of river runoff by hydroelectric facilities. Studies have shown that to date, in a number of sections of large navigable rivers of Russia, for these reasons, erosion cutting of channels and an irreversible decrease in low-water levels have occurred. In some sections of waterways, these changes became critical safe navigation, which required the reconstruction of existing ship-passing hydraulic structures and the construction of new low-pressure hydroelectric structures. Currently, the Gorodetsky locks are being reconstructed on the Volga River to ensure navigation on the limiting section from the target of the Nizhny Novgorod hydroelectric station to Nizhny Novgorod; Bagaevsky low-pressure hydroelectric complex is being built on the Don. The construction of the Krasnogorsk water-lifting hydroelectric complex on the Irtysh in the Omsk region has resumed. Possible options are being considered to solve the problem of ensuring navigation on the Kama River section from the Votkinskaya hydroelectric station to Kambarka. Studies of the speed regime of the river flow, carried out in the lower reaches of hydroelectric facilities, showed that with unsteady water movement in the lower reach, there is an activation of sediment transport, both in the summer observation period — in an open channel, and in winter, when water moves under ice.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, sediment discharge, parameters of dunes, channel transformations

REFERENCES

Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda, utverzhdyonnaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27.11.2021 № 3363-r.

Georgievskij V.Yu., Shalygin A.L. Gidrologicheskij rezhim i vodnye resursy // Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem. M.: Rosgidromet, 2012. S. 53–86.

Georgievskij V.Yu., Koronkevich N.I., Alekseevskij N.I. Vodnye resursy i gidrologicheskij rezhim rek RF v usloviyah izmeneniya klimata // Tezisy plenar. doklady VII Vseross. gidrol. s'ezda. SPb.: Gidrometeoizdat, 2013. S. 26–32.

Gel'fan A.N., Frolova N.L., Magrickij D.V. i dr. Vliyanie izmeneniya klimata na godovoj i maksimal'nyj stok rek Rossii: ocenka i prognoz // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2021. T. 7. № 1. S. 36–79.

Tretij ochenchnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshchee rezyume. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2022. 124 s.

Berkovich K.M. Ruslovyje processy i ruslovyje kar'ery. M.: MGU. 2005. 105 s.

Gladkov, G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. Gidromorfologiya rusel sudohodnyh rek. 4-e izd., ster. SPb.: Lan'. 2023. 432 s.

Gladkov G.L., Katolikov V.M., Shuruhin L.A. Stroitel'stvo nizkonapornyh gidrouzlov na sudohodnyh rekah // Transport RF. 2018. № 5 (78). S. 39–42.

Chalov R.S., Zavadskij A.S. Saralevskij vodnotransportnyj uzel i problemy uluchsheniya sudohodnyh uslovij na nizhnej Volge // Rechnoj transport (XXI vek). 2019. № 4 (92). S. 20–23.

Kozhevnikov V.S., Stazaeva N.A. Analiz snizheniya urovnya vody vsledstvie preobrazovaniya rusla r. Irtysha u g. Omska pod vliyaniem hozhaystvennoj deyatel'nosti. Trudy GGI, vyp. 288. 1983. S. 96–105.

Orishchuk R.N., Obojmov S.V. Orhideeva O.G. Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva Krasnogorskogo vodopod'yomnogo gidrouzla na reke Irtysh // Problemy stroitel'stva i gidravliki gidrotekhnicheskikh sooruzhenij: sb. mat. nauch.- prakt. konf. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2024. S. 90–96.

Gladkov G.L., Morgunov K.P., Garibin P.A. Gidromorfologicheskij rezhim i sudohodnye usloviya v nizhnem b'eфе Nizhegorodskogo gidrouzla na reke Volge

// *Vodnye puti i ruslovye processy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnyh putej*: Sb. nauch. tr.: Vyp. 5. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2021. S. 10–27.

Rodionov A.A., Romyancev V.A., Fyodorov M.P. i dr. Varianty resheniya problem sudohodstva na limitirovannom uchastke reki Volgi ot Gorodeckogo gidrouzla do Nizhnego Novgoroda, v tom chisle s uchetom ocenki vliyaniya na sanitarno-epidemiologicheskuyu i ekologicheskuyu situaciyu v regione // *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2022. T. 15. № 4. S. 109–131. doi:10.48612/fpg/abfh-m2n7–9mn6

Gladkov G.L., Katolikov V.M., Shuruhin L.A. Obespechenie sudohodnykh uslovij na nizhnem Donu. Sbornik materialov yubilejnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 110-letiyu sozdaniya gidrotekhnicheskoy laboratorii imeni professora V.E. Timonova. Tom 1.- SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. S. 196–216.

Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody na reke Sviri v zimnih i letnih usloviyah. L.: Gidrometeoizdat, 1963. 252 s.

Rozovskij I.L., Eremenko E. V., Bazilevich V.A. Neustanovivsheesya dvizhenie vodnogo potoka nizhe gidroelektrostantsij i ego vliyanie na ruslo. Kiev: Naukova dumka. 1967. 276 s.

Grushevskij M. S. Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekah i kanalah. L.: Gidrometeoizdat. 1982. 288 s.

Graf W., Suszka L. Unsteady flow and its effect on sediment transport [Paper presentation]. 21st IAHR Congress, 13–18 August 1985. Melbourne, Australia. 1985.

Graf W.H. Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry. Chichester. New York: Wiley. 1998.

Mrokowska M., Rowinski P. Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments // *Water*. 2019. No 11(5). 2019. 907 p.

Wang L., Cuthbertson A., Pender G., Zhong D. Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs // *Water Resources Research*. 2019. No 55(7). P. 5431–5452.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng, Felipe Quintero. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows // *Journal of Hydraulic Research*. 2020. No 58:6. P. 867–887

Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. Gidravlicheskie karakteristiki rechnogo potoka i usloviya transporta nanosov v nizhnem b'efe gidrouzla // *Vest. Gos. un-ta morskogo i rechnogo flota im. adm. S. O. Makarova*. 2023. T. 15. № 3. S. 344–358.

Gladkov G.L., Katolikov V.M., Rzhakovskaya P.S. Gidravlika potoka i parametry transporta nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody v nizhnih b'efah gidrouzlov na sudohodnykh rekah // *Vodnye puti i ruslovye processy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnyh putej*. Vyp. 6. Ch. 1. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2023. S. 24–43.

Gladkov G.L., Katolikov V.M. Gidromorfologicheskoe obosnovanie sudohodstva v nizhnem b'efe Nizhegorodskogo gidrouzla na reke Volge // *Tridcat' vos'moe plenar. mezhvuz. koordinac. soveshch. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh processov. Doklady i soobshcheniya*. Perm'. 2023. S. 27–42.

Gladkov G. et al. Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River // *International Journal of Sediment Research*, <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.01.004>.

Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S., Zavarzin R.V. Eksperimental'nye issledovaniya gidravliki potoka i parametrov transporta donnykh nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody // *Vestn. Gos. Un-ta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova*. 2024. T. 16. № 2. S. 181–196.

Klaven A.B., Kopalani Z.D. Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlicheskie modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo processa. SPb.: Nestor-Istoriya. 2011. 544 s.

Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. Gidravlika rechnogo potoka i parametry transporta nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody v nizhnih b'efah gidrouzlov na sudohodnykh rekah // *Eroziya pochv i ruslovye processy*. M.: NIL EPIRP. 2024. № 1. S. 70–83.

ABOUT THE AUTHOR

Gladkov Gennady Leonidovich, Admiral S.O. Makarov GUMRF. Doctor of technical sciences, Professor. Head of the Department of Waterways and Water Surveys. Office address: 198035, Russian Federation, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru