

УДК 551.4.042

## ГИДРАВЛИКА РЕЧНОГО ПОТОКА И ПАРАМЕТРЫ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГИДРОУЗЛОВ НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХ

Г.Л. Гладков, П.С. Ржаковская

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова  
gladkovgl@gumrf.ru, przhakovskaya@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.09.2024

После доработки 01.10.2024

Принята к публикации 10.11.2024

**Аннотация:** В работе представлены численные эксперименты по оценке гидравлических характеристик речного потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах гидроузлов на крупных судоходных реках. Полученные результаты позволили изучить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды и разработать определенные рекомендации для установления граничных условий при моделировании русловых переформирований. Основные выводы по материалам численных экспериментов заключаются в следующем: при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла отмечается активизация транспорта наносов, как в летний период наблюдений, так и зимой; наибольшие расхождения между почасовыми и среднесуточными данными наблюдаются в створах, расположенных в непосредственной близости от гидроузла; степень увеличения расхода наносов при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла зависит от неравномерности регулирования стока воды, удаления расчетного гидроствора от створа плотины и от характера изменения водности в течение навигации; в непосредственной близости от створа гидроузла интенсивность транспорта наносов в зимний период становится существенно меньше, чем летом, по мере удаления от створа ГЭС эта разница сокращается; по длине реки, по мере удаления от створа гидроузла, интенсивность транспорта наносов снижается. Для апробации результатов численного моделирования в работе выполнены эксперименты в гидравлическом лотке. Полученные данные качественно согласуются с результатами численных экспериментов. В ходе проведения экспериментов было установлено, что применяемые формулы расхода наносов показывают завышение расчетных данных по сравнению с результатами измерений.

**Ключевые слова:** скорость течения воды, расход воды, расход наносов, параметры донных гряд, число Фруда, коэффициент Шези

### ВВЕДЕНИЕ

При содержании судовых ходов на свободных и зарегулированных реках в современных условиях необходимо учитывать, с одной стороны, происходящие климатообусловленные изменения характеристик речного стока, с другой — антропогенные изменения речного режима судоходных рек вследствие проведения инженерных мероприятий на водных путях.

На свободных реках имеет место врезание речных русел вследствие добычи нерудных строительных материалов. К настоящему времени на

целом ряде участков судоходных рек произошло необратимое снижение уровней воды в результате карьерных разработок. В работах (Русловые процессы и русловые карьеры, 2005; Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге, 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, а также ряда других судоходных рек. Эти изменения негативным

образом сказались на условиях водопользования в целом ряде речных бассейнов и усугубляются с течением времени. Одним из основных возможных путей решения проблемы восстановления уровней воды в данном случае является строительство низконапорных гидроузлов (Гидравлика потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках, 2023).

На зарегулированных участках рек основные затруднения для судоходства проявляются вследствие развития эрозионных процессов в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора со стороны нижнего бьефа. В рамках Единой глубоководной системы (ЕГС) Европейской части РФ на сегодняшний день не обеспечиваются гарантированные судоходные глубины на р. Волге в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла, на участке р. Камы ниже Чайковского шлюза, на р. Дон в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла, а также на р. Волге ниже Волгоградского гидроузла. На ряде участков судоходных рек к настоящему времени ситуация стала критичной.

В настоящее время ведется реконструкция Городецких шлюзов на Волге для обеспечения судоходства от Нижегородской ГЭС до г. Нижнего Новгорода; на Дону строится Багаевский низконапорный гидроузел. Рассматриваются варианты для решения проблемы обеспечения судоходства на участке Камы от Воткинской ГЭС до Камбарки. На нижней Волге есть также ряд других затруднительных участков, в первую очередь Саралевский затруднительный узел, без решения проблемы которого вопрос эффективного использования воднотранспортного коридора на р. Волге остается открытым.

### **ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В НИЖНИХ БЬЕФАХ ГИДРОУЗЛОВ НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХ**

В процессе эксплуатации гидроузлов на реках в нижних бьефах происходят необратимые изменения характеристик потока и речного русла, которые с течением времени начинают оказывать влияние на условия работы всех водопользователей. К настоящему времени сложилась классификация гидроузлов по ряду признаков: по классу ГТС, по месторасположению, по величине напора и т. д. С точки зрения воднотранспортной классификации гидроузлов все нижние бьефы можно разделить на три группы: гидроузлы, находящиеся в постоянном подпоре от нижерасположенного сооружения; гидроузлы, подпор которых в нижнем бьефе наблюда-

ется в ограниченные периоды времени; гидроузлы без подпора со стороны нижнего бьефа (рис. 1). В границах ЕГС ЕЧ РФ на Волжско-Камском каскаде (рис. 2) можно встретить все эти разновидности сооружений. В зависимости от условий обеспечения подпора со стороны нижнего бьефа, в нижних бьефах формируется различный гидравлический режим водного потока, различается ход русловых переформирований и имеют место различные условия содержания судовых ходов.

В настоящей работе исследовались три участка нижних бьефов гидроузлов — верховые участки Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ и нижний бьеф Волгоградского гидроузла.

### ***Климатообусловленные изменения речного стока***

Анализ климатообусловленных изменений стока в бассейне р. Волга в районе г. Нижнего Новгорода, г. Чебоксары и г. Волгограда выполнен по данным наблюдений с конца XIX в. По полученным данным можно сделать вывод о том, что изменения температуры (рис. 3) в бассейне Волги происходят однонаправленно, но с различной интенсивностью, причем с 1978 г. наблюдается устойчивый тренд ее повышения.

Начиная с 2006 г. на р. Волге наступил период маловодья, который можно проследить по данным многолетних наблюдений в районе г. Чебоксары и районе г. Волгограда (рис. 4).

### ***Минимальные навигационные уровни воды в нижних бьефах гидроузлов***

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 Волге отчетливо прослеживается тренд на понижение минимальных уровней воды за весь период наблюдений (Гидроморфология русел судоходных рек, 2023). С момента ввода в эксплуатацию сооружений Чебоксарского гидроузла минимальные навигационные уровни в нижнем бьефе гидроузла понижались со средней интенсивностью 1.7–1.8 см/год, а начиная с 2006 г. этот процесс ускорился (рис. 5): средняя интенсивность снижения уровней воды составила 2.5–3.2 см/год.

В нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС — на верховом участке Куйбышевского водохранилища, находящемся в подпоре от Самарского гидроузла, 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 (см. рис. 5). В свою очередь, в нижнем бьефе



Рис. 1. Инфраструктурные ограничения для судоходства на Единой глубоководной системе Европейской части РФ  
 Fig. 1. Infrastructure restrictions for shipping on the Unified Deep-Water System of the European Part of the Russian Federation

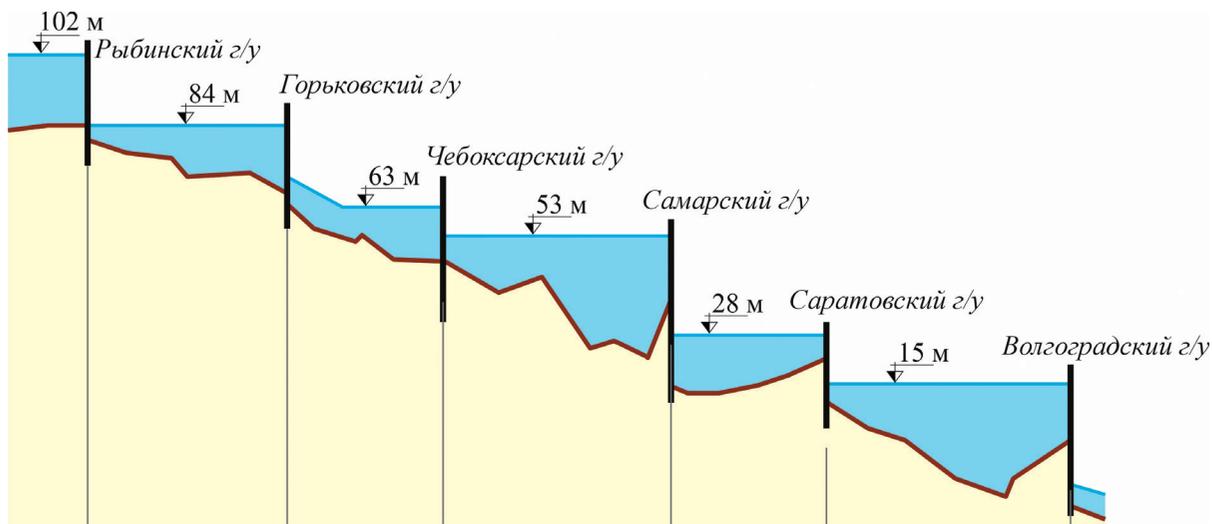


Рис. 2. Волжско-Камский каскад гидроузлов / Fig. 2. Volga-Kama cascade of hydroelectric facilities

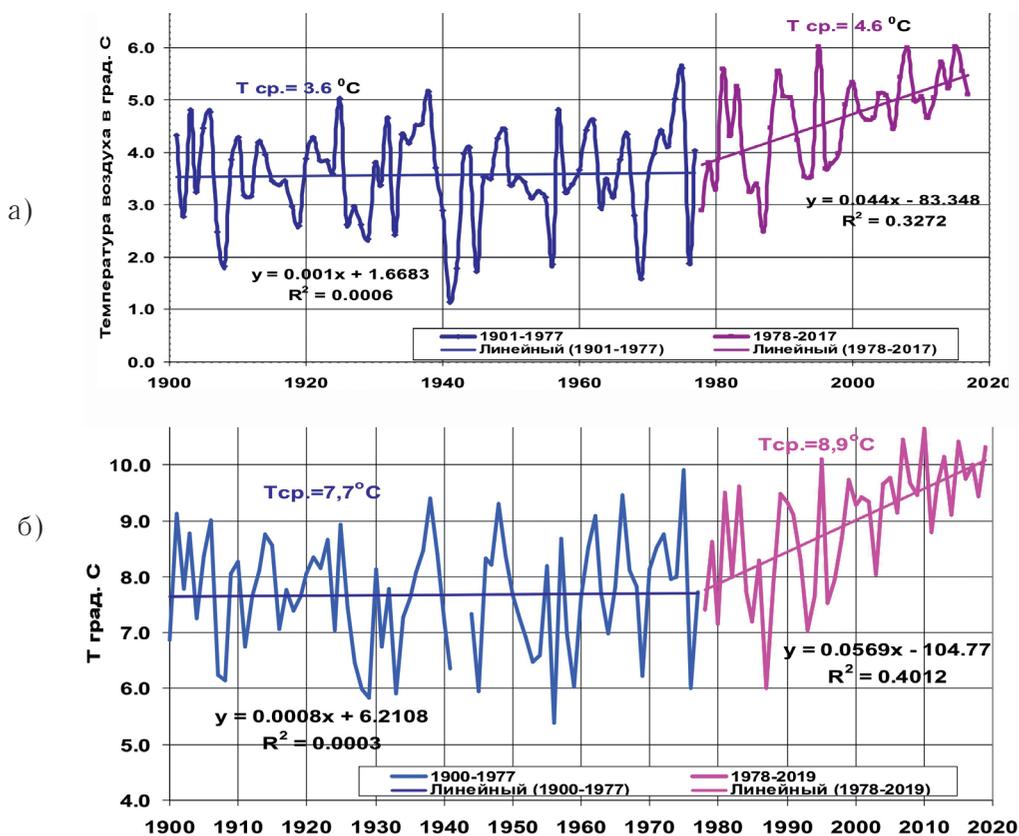


Рис. 3. Временной ход среднегодовой температуры воздуха: а) по м/ст Чебоксары; б) по м/ст Волгоград

Fig. 3. Time course of average annual air temperature: a) by m/st Cheboksary; b) by m/st Volgograd

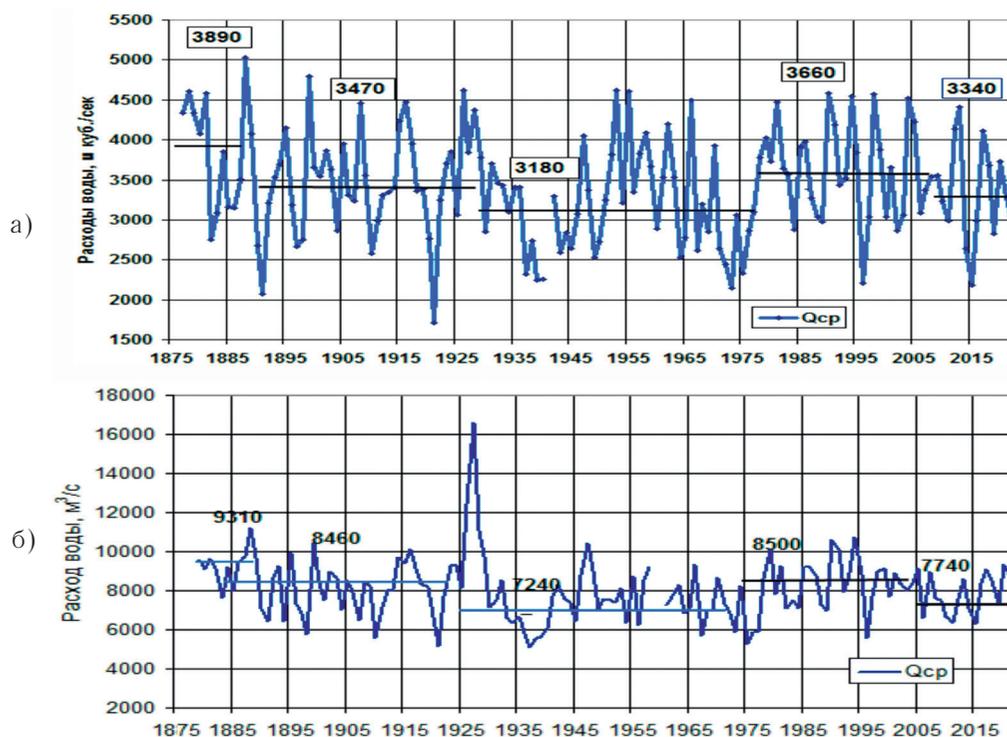


Рис. 4. Хронологический ход среднегодовых расходов воды: а) в створе г. Чебоксары; б) в створе г. Волгограда

Fig. 4. Chronological course of average annual water consumption: a) in the alignment of Cheboksary; b) in the alignment of Volgograd

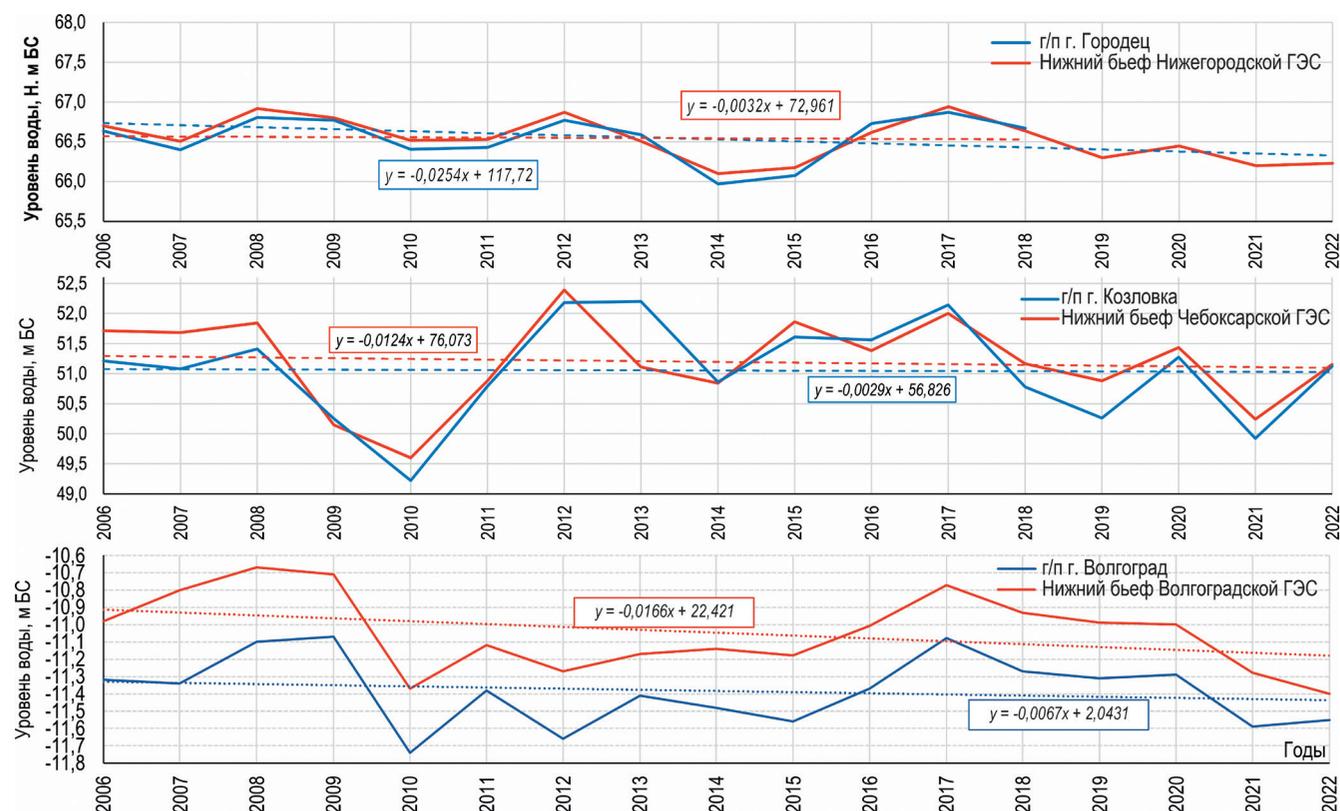


Рис. 5. Хронологические графики минимальных уровней воды за период навигации. Линейные тренды и аналитические решения

Fig. 5. Chronological graphs of minimum water levels during the navigation period. Linear trends and analytical solutions

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. Проектные уровни воды в нижнем бьефе гидроузла гарантируются при расходах воды через Волгоградский гидроузел не менее 5000 м<sup>3</sup>/с.

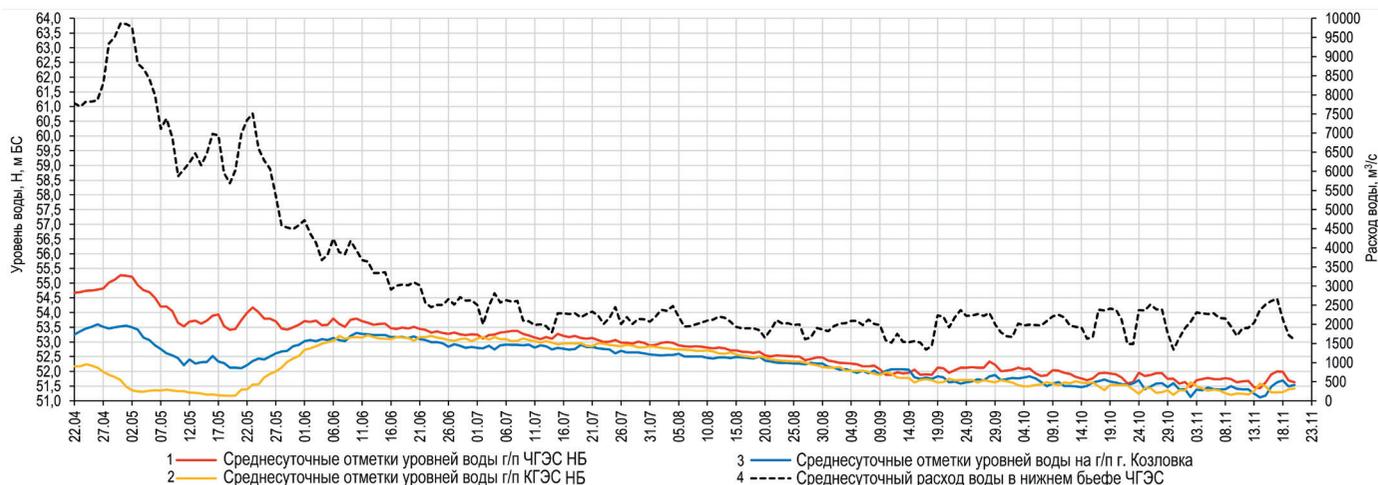
#### Уклоны свободной поверхности в нижних бьефах гидроузлов

Режим уклонов свободной поверхности в нижних бьефах гидроузлов на реке Волге проявляется в зависимости от наличия (отсутствия) подпора со стороны нижерасположенного водохранилища.

В нижнем бьефе Нижегородского гидроузла в период прохождения весеннего половодья уклоны свободной поверхности выравниваются на всем протяжении свободного участка реки Волги и составляют в среднем 0.025–0.05 ‰. По мере уменьшения сбросных расходов воды при переходе к летней межени эта картина меняется (Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла, 2023). Значительная часть падения

свободной поверхности воды сосредотачивается на участке от Городца до Балахны, где средние уклоны свободной поверхности до самого окончания навигации устанавливаются равными в среднем около 0.075 ‰. Ниже по течению реки на участке от Балахны до Сормово величина падения свободной поверхности уменьшается; средние уклоны составляют около 0.05 ‰. В нижнем конце рассматриваемого судоходного участка от Сормово до Нижнего Новгорода уклоны уменьшаются в еще большей степени и составляют при малых сбросных расходах воды 0.02–0.025 ‰.

В нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС режим уклонов свободной поверхности определяется регулирующим воздействием Куйбышевского водохранилища. На пике весеннего половодья на приплотинном участке от створа Чебоксарского гидроузла до г.п. Козловка наблюдаются максимальные значения сбросных расходов и наибольшее падение уровня воды (рис. 6). При этом средний уклон свободной поверхности на данном участке оказался достаточно небольшим и составил величину около 0.028 ‰. На нижерасположенном



**Рис. 6.** Совмещенные хронологические графики сбросных среднесуточных расходов и уровней воды в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла за навигационный период 2022 г. Отметки уровней воды: 1 – г.п. Нижний бьеф Чебоксарской ГЭС; 2 – г.п. Нижний бьеф Куйбышевской ГЭС; 3 – г.п. Козловка; 4 – среднесуточный расход в нижнем бьефе Чебоксарской ГЭС

**Fig. 6.** Combined chronological graphs of discharge average daily flow rates and water levels in the downstream of the Cheboksary hydroelectric complex for the navigation period of 2022. Water level marks: 1 – g.p. Lower bay of the Cheboksary hydroelectric station, 2 – g.p. Lower bay of the Kuibyshev hydroelectric station, 3 – g.p. Kozlovka, 4 – average daily flow rate in the downstream of the Cheboksary hydroelectric station

участке, от Козловки до створа Самарского гидроузла, его величина в половодье оказалась еще меньше – около 0.005 ‰.

С момента начала наполнения Куйбышевского водохранилища в весенний период подпор от створа Самарского гидроузла распространяется вверх по реке и при достижении отметки нормального подпорного уровня воды в верхнем бьефе Самарского гидроузла отметки свободной поверхности выравниваются по длине водохранилища. Величина падения свободной поверхности от створа Чебоксарского гидроузла до створа Самарского гидроузла становится минимальной. После пропуска весеннего половодья определяющим фактором русловых переформирований в нижнем бьефе гидроузла становится суточный режим регулирования стока воды.

После завершения строительства Волжско-Камского каскада гидроузлов на реке Волге участок, расположенный ниже Волгоградского гидроузла, остался в свободном состоянии. Уровненный режим на этом участке реки зависит от условий прохождения весеннего половодья и характера затопления поймы в паводковый период. Проведенные исследования показали, что в половодье однозначная связь уровней воды между опорными постами на нижней Волге нарушается.

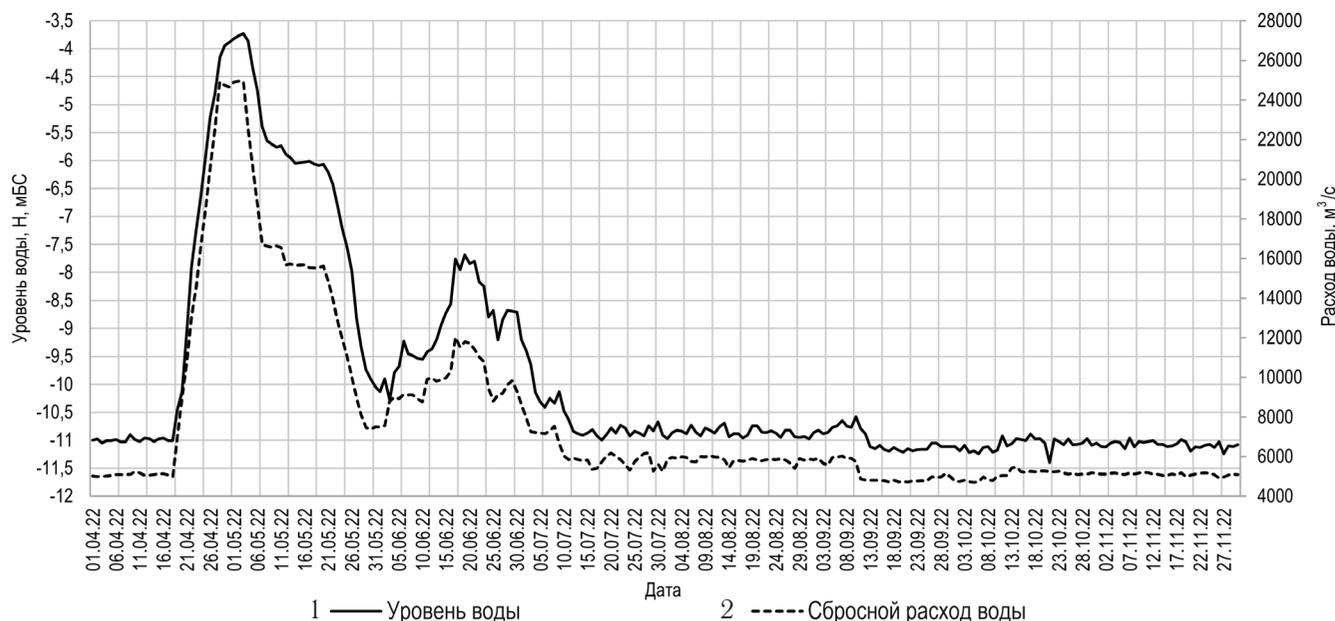
Сложную картину показывает связь между распределением расходов воды по длине реки в по-

ловодье. В начальный период половодья происходит постепенное затопление поймы, ериков, проток и староречий. Затопление поймы идет приблизительно до сбросных расходов ГЭС на уровне 17 000 м<sup>3</sup>/с. По мере затопления поймы, в интенсивную фазу половодья, начинает формироваться основная кривая подъема половодья за счет притока большого объема воды в основное русло. Между г.п. Волжская ГЭС – г.п. Верхнее Лебяжье четкой связи расходов между постами не прослеживается. На спаде половодья, когда русловые расходы в г.п. Верхнее Лебяжье становятся ниже 17 000 м<sup>3</sup>/с, в результате медленного оттока воды с поверхности поймы, расходы начинают постепенно падать до меженных.

После прохождения весеннего половодья определяющим фактором уровня режима реки в нижнем бьефе гидроузла становится суточный режим регулирования стока. На рис. 7 показаны совмещенные хронологические графики сбросных расходов воды через ГЭС и уровней воды в нижнем бьефе Волгоградского гидроузла за навигационный период 2022 г.

#### **Скорости течения воды в нижних бьефах гидроузлов**

Хронологические графики почасовых значений скоростей течения воды за период навигации (рис. 8) построены по почасовым значениям расходов и уровней воды.



**Рис. 7.** Совмещенные хронологические графики сбросных расходов (2) и уровней воды (1) в нижнем бьефе Волгоградского гидроузла за навигационный период 2022 г. (почасовые значения расходов и уровней воды)

**Fig. 7.** Combined chronological graphs of discharge flow rates (2) and water levels (1) in the downstream of the Volgograd hydroelectric complex for the navigation period of 2022 (hourly values of flow rates and water levels)

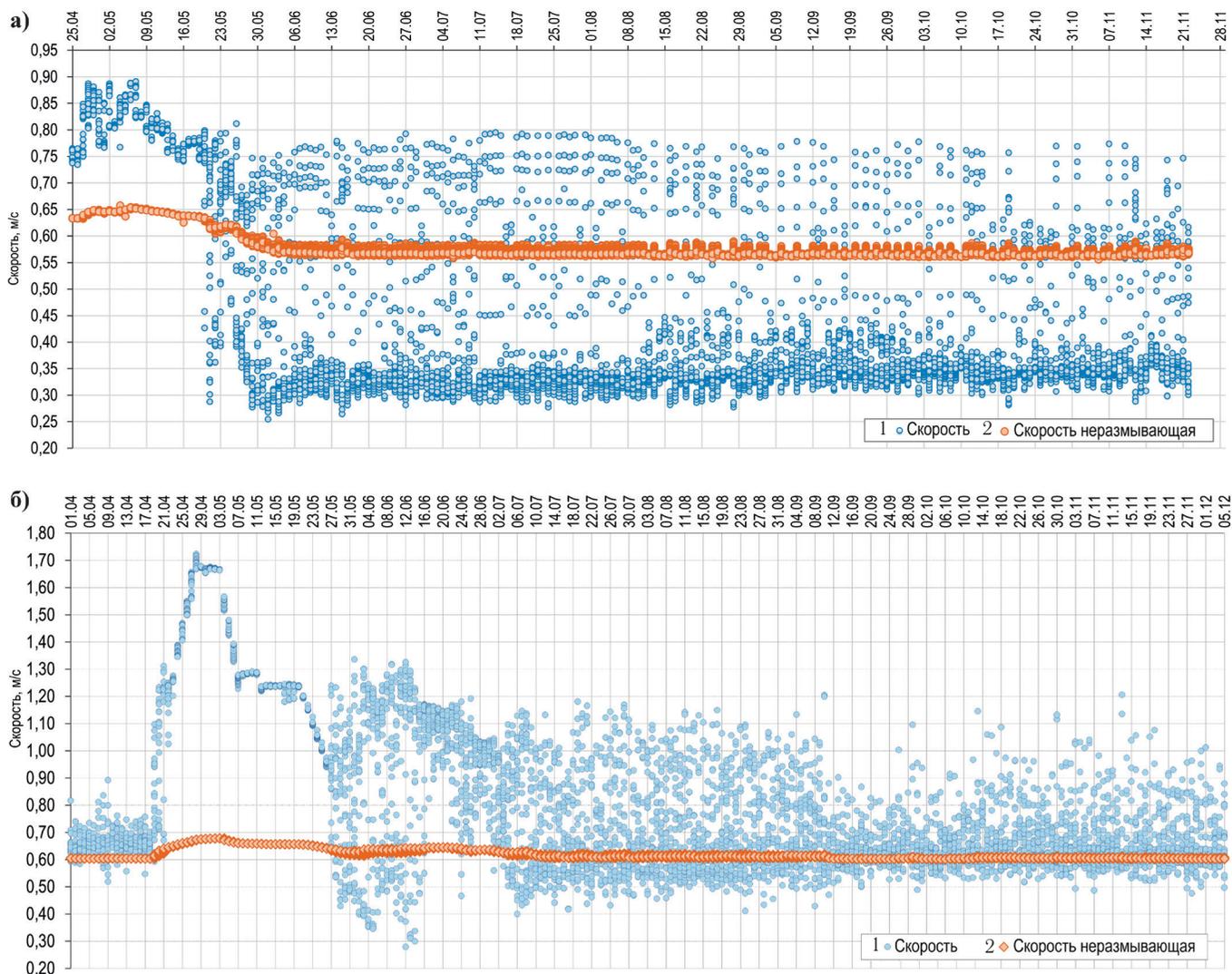
В нижнем бьефе Нижегородской ГЭС значительную часть времени в течение каждого суток и навигации в целом скорость течения воды оказывается меньше неразмывающей скорости, а во время прохождения волны попуска превышает ее. Это свидетельствует о том, что в моменты попуска на участке будет иметь место транспорт наносов, а после прохождения волны попуска движение наносов приостанавливается. На Волгоградской ГЭС эта картина выглядит несколько иначе, а именно, относительная часть времени в течение суток со скоростями течения воды, превышающими неразмывающие значения, оказалась больше, чем в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла.

В результате суточного регулирования стока скорости течения воды изменяются в большом диапазоне значений. На рис. 9 показаны графики зависимости средних по живому сечению скоростей течения от уровня воды, построенные по данным почасовых измерений для двух створов, расположенных, соответственно, в нижних бьефах Нижегородского и Волгоградского гидроузлов. Измерения в створе г.п. Городец проводились в течение одной недели в августе и одной недели в сентябре — октябре 2021 г. Измерения в нижнем бьефе Волгоградского гидроузла проводились в течение трех недель — в июле, августе и ноябре — декабре 2022 г.

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.

### **Параметры транспорта наносов в нижних бьефах гидроузлов**

Экспериментальные исследования параметров транспорта наносов и русловых деформаций (Динамика русловых потоков, 1979; Основы гидроморфологической теории руслового процесса, 1982; Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел, 2008; Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса, 2011) проводились в гидравлических лотках, на гидравлических моделях и в реках



**Рис. 8.** Хронологические графики почасовых значений скоростей течения воды (1) за период навигации: а) нижний бьеф Нижегородской ГЭС (2021 г.); б) нижний бьеф Волгоградской ГЭС (2022 г.). 2 – неразмывающая скорость для руслообразующих наносов

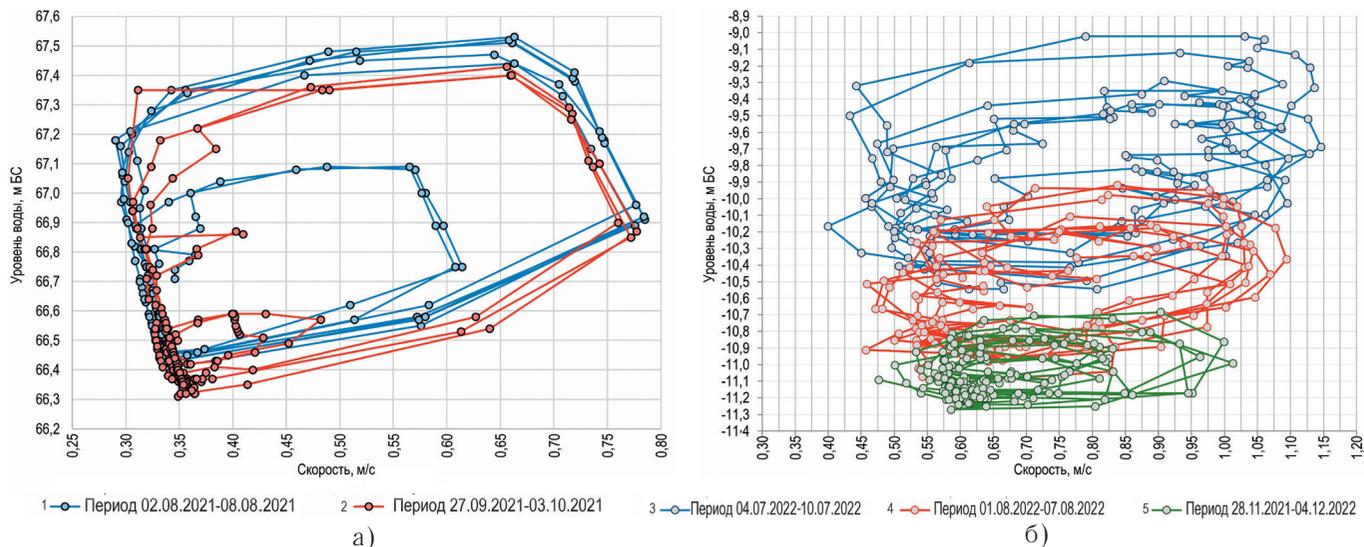
**Fig. 8.** Chronological graphs of hourly water flow rates (1) for the navigation period a) downstream of the Nizhny Novgorod hydroelectric station (2021); b) downstream of the Volgograd hydroelectric station (2022). 2 – non-erosion velocity for channel-forming sediments

преимущественно в условиях установившегося движения воды. Детальные исследования кинематической структуры потока и русловых деформаций при неустановившемся режиме движения воды в нижних бьефах гидроузлов до настоящего времени удалось провести лишь в ограниченных объемах (Исследования неустановившегося движения воды на реке Свири в зимних и летних условиях, 1963). Вместе с тем проблемы обеспечения судоходства в нижних бьефах гидроузлов, расположенных вне зоны подпора, остаются по-прежнему актуальными (Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower, 2013;

Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky Hydraulic Unit on the Volga River, 2023; An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways, 2023).

Для оценки параметров транспорта наносов в условиях неустановившегося движения воды были выполнены численные эксперименты по данным почасовых измерений расходов и уровней воды в нижних бьефах Нижегородского, Волгоградского и Нижнесви́рского гидроузлов.

В вычислениях использовались две расчетных формулы расхода влекомых наносов. Одна из них



**Рис. 9.** Уровни воды и скорости течения при суточном регулировании стока: а) нижний бьеф Нижегородской ГЭС, 2021 г.; б) нижний бьеф Волгоградской ГЭС, 2022 г. Скорости течения: а) 1 – 02.08–08.08.2021, 2 – 27.09–03.10.2021; б) 3 – 04.07–10.07.2022, 4 – 01.08–07.08.2022, 5 – 28.11–04.12.2022

**Fig. 9.** Water levels and flow rates with daily flow control: а) downstream of the Nizhny Novgorod hydroelectric station, 2021; б) downstream of the Volgograd hydroelectric station, 2022. Current speeds: а) 1 – 02.08–08.08.2021, 2 – 27.09–03.10.2021; б) 3 – 04.07–10.07.2022, 4 – 01.08–07.08.2022, 5 – 28.11–04.12.2022

имеет структуру формулы ГГИ и была получена в работе (Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов, 2021) на основании анализа материалов измерений параметров грядового рельефа, выполненных Государственным гидрологическим институтом на равнинных реках, на гидравлических моделях и в гидравлических лотках. Основными определяющими факторами величины расхода наносов в этой формуле являются глубина потока  $H$ , скорость течения воды  $V$  и число Фруда ( $V/\sqrt{gH}$ ):

$$q_s / HV = 0.0014 \cdot (V/\sqrt{gH})^{3.11} \quad (1)$$

Вторая формула была получена К.В. Гришаниным по данным о деформациях русла и элементах движения гряд на нескольких участках больших равнинных рек России:

$$q_s = 0.015 (V/V_{\text{нр}})^3 d (V - V_{\text{нр}}) \quad (2)$$

Основная разница между этими формулами заключается в том, что в формуле К.В. Гришанина содержится множитель, в котором вычисляется разница между средней  $V$  и неразмывающей  $V_{\text{нр}}$  скоростями течения воды. Результаты вычислений величины расхода наносов по данным почасовых измерений расходов и уровней воды на г.п. Городец в Нижний бьеф Нижегородского гидроузла показаны на рис. 10.

Полученные результаты показывают, что обе формулы дают достаточно близкие значения вычисленных расходов наносов. Общий ход графиков расходов наносов, рассчитанных по формулам (1) и (2), оказался примерно одинаковым. При этом максимумы наступления расходов наносов по времени соответствуют временным максимумам скорости течения воды и совпадающим с ними максимумам значений числа Фруда. На пике прохождения суточного попуска воды расход наносов, полученный по первой формуле, оказался в среднем в 1.3 раза больше величины расхода наносов, рассчитанного по второй формуле.

По данным проведенных расчетов по формуле (1) величина расхода наносов в момент прохождения пика суточного попуска оказалась примерно в 60 раз больше, чем при минимальных сбросных расходах воды. По формуле (2), соответственно, расходы наносов в промежутках времени между попусками равны нулю. Результаты численных экспериментов показали, что при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе расход наносов возрастает в 2–6 раз по сравнению с аналогичными данными при установившемся движении воды и равных значениях среднесуточных расходов воды за расчетный период времени.

Полученные результаты необходимо проверить в ходе экспериментальных исследований.

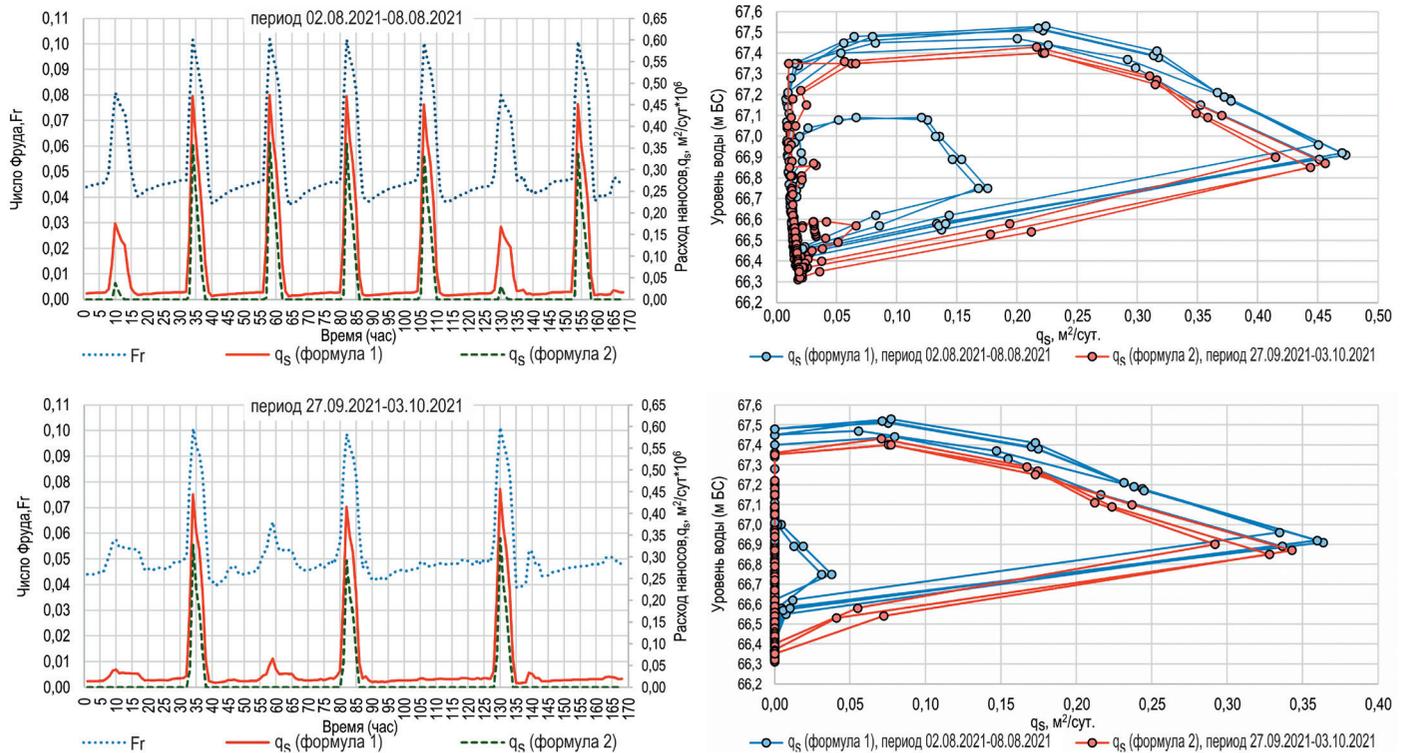


Рис. 10. Расход наносов при суточном регулировании стока

Fig. 10. Sediment flow rate during daily flow control

### Экспериментальные исследования характеристик потока и транспорта наносов при неустановившемся движении воды

В известных монографиях (Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло, 1967; Неустановившееся движение воды в реках и каналах, 1982), посвященных исследованиям неустановившегося движения воды в реках, приведены сведения о том, что в нижних бьефах гидроузлов происходит активизация транспорта наносов и русловых деформаций. Сведений о параметрах движения донных гряд в этих публикациях не приводится.

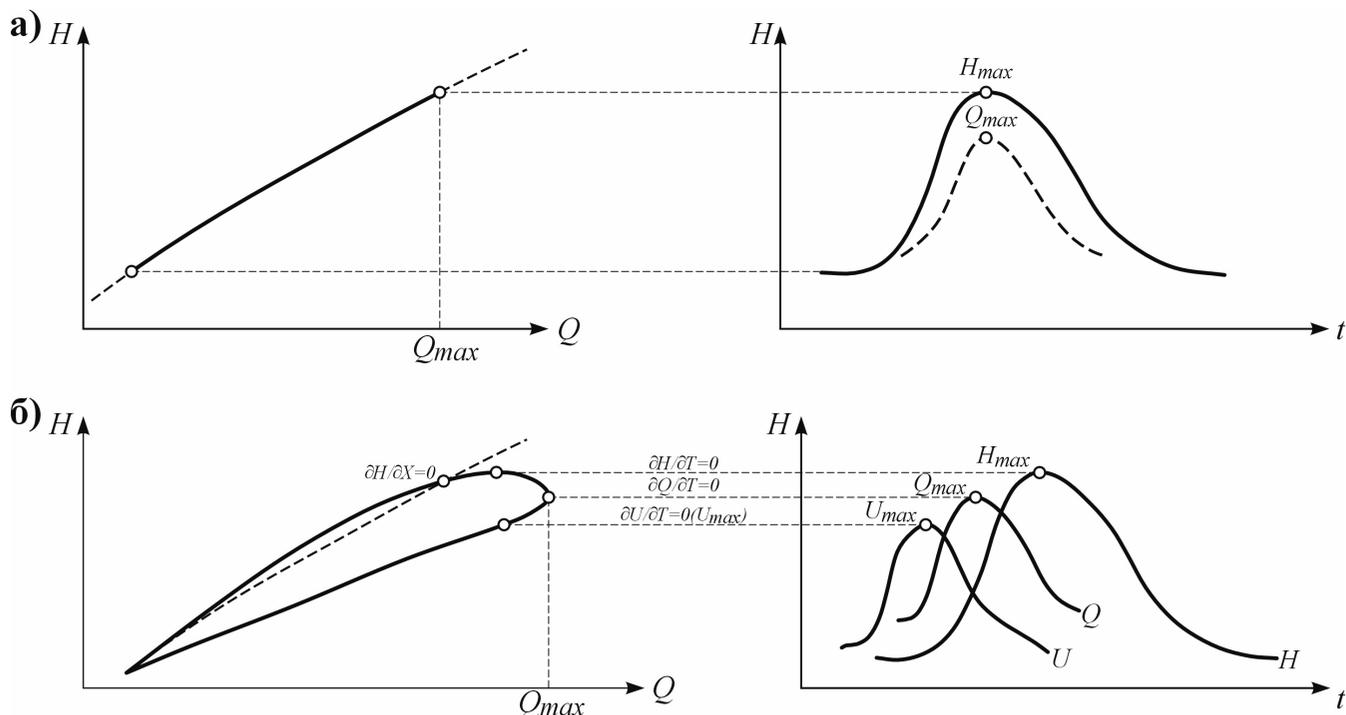
В работе (Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows, 2020) по материалам опубликованных ранее результатов исследований приводится анализ гидравлических характеристик потока при неустановившемся движении воды. Данная работа посвящена проблеме мониторинга характеристик речного стока при неустановившемся движении воды с использованием различных методик. Собственных экспериментальных данных в этой работе не приводится.

Представленные в работе результаты иллюстрируют характер изменения гидравлических параметров речного потока в ходе прохождения

волны пускa. Полученные данные (рис. 11) показывают, что при неустановившемся движении воды две переменные потока (уровень и расход воды) различны для восходящей и нисходящей части волны; также видно, что пики переменных характеристик потока не пересекаются и распределены по времени в следующем порядке: уклон свободной поверхности воды, средняя скорость в поперечном сечении, расход воды и уровень воды. Исследования параметров транспорта наносов в данной работе не проводилось.

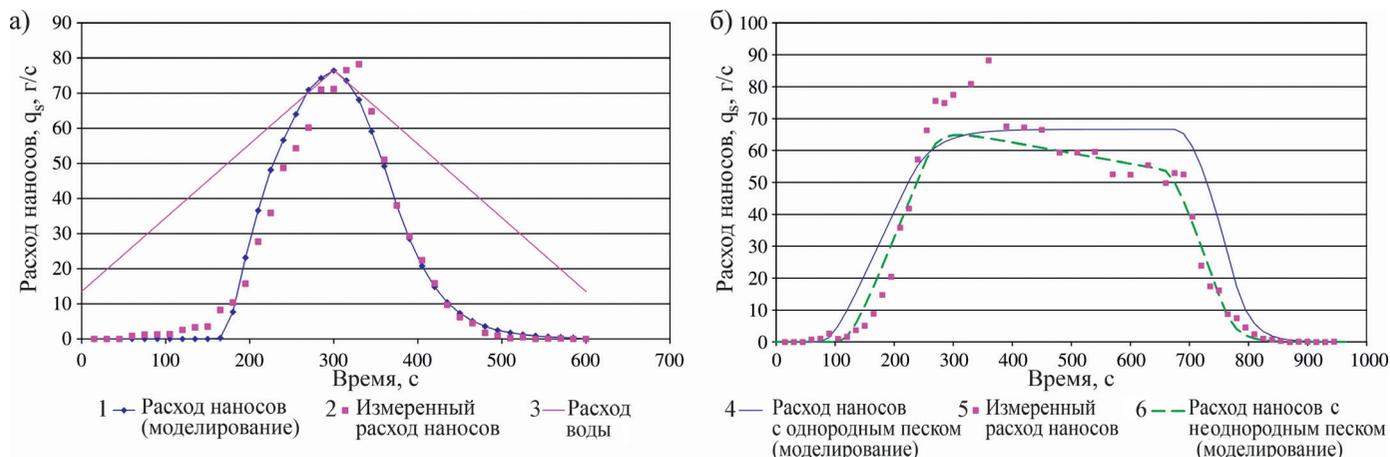
Аналогичную картину, характеризующую особенности формирования гидравлики потока при прохождении пусковой волны в условиях неустановившегося движения воды, авторам удалось получить по результатам обработки материалов наблюдений за уровнями и расходами воды в нижних бьефах гидроузлов на крупных судоходных реках.

В работе (Experimental and numerical investigation of bedload transport under unsteady flows, 2011) приводятся результаты экспериментальных исследований параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды. Исследования проводились в гидравлическом лотке шириной 0,8 м. В ходе экспериментов использовались различные гидрографы формирования волны пускa — треугольного вида и трапециoidalного вида.



**Рис. 11.** Иллюстрация изменений гидравлических параметров потока при установившемся (а) и неустановившемся (б) движении воды (а – зависимости расхода воды от уровня и изменения расхода (уровня) во времени при установившемся движении воды; б – зависимость расхода от уровня воды и других характеристик потока во времени при неустановившемся движении воды)

**Fig. 11.** Illustration of changes in hydraulic parameters of the flow with steady (a) and unsteady (b) water movement (a – dependence of water flow on level and change in flow (level) over time with steady water movement; b – dependence of flow on water level and other flow characteristics over time with unsteady water movement)



**Рис. 12.** Измеренные расходы наносов при треугольном (а) и трапецидальном (б) видах гидрографов попусковой волны. а) 1 – расход наносов (моделирование), 2 – измеренный расход наносов, 3 – расход воды; б) 4 – расход наносов (однородный песок, моделирование), 5 – измеренный расход наносов, 6 – расход наносов (неоднородный песок, моделирование)

**Fig. 12.** Measured sediment flow rates at triangular (a) and trapezoidal (b) species of scallop wave hydrographs. а) 1 – sediment flow rate (simulation), 2 – measured sediment flow rate, 3 – water flow rate; б) 4 – sediment flow rate (homogeneous sand, modeling), 5 – measured sediment flow rate, 6 – sediment flow rate (heterogeneous sand, modeling)

В качестве материала в лотке применялся гравий средней крупности диаметром 4.8 мм; формирование гряд в экспериментах не происходило.

Результаты, полученные в работе, приведены графически на рис. 12.

Полученные данные показывают, что величина расхода наносов возрастает с ростом попускового расхода, однако максимум его наступает несколько позже, чем максимум расхода воды. При этом общий расход наносов возрастает экспоненциально с увеличением расхода.

Для изучения гидравлических характеристик потока и параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды в рамках настоящей работы был выполнен цикл экспериментов в гидравлическом лотке с песчаным руслом.

Исследования проводились на Главной экспериментальной базе Государственного гидрологического института в гидравлическом лотке длиной 8.0 м и шириной 0.21 м. Расходы 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.

Для выбора режимов моделирования на подготовительном этапе работы всего было проведено шесть экспериментов при установившемся расходе

воды в диапазоне от 2.9 до 6.0 л/с. В каждом цикле исследований на дне лотка формировался устойчивый грядовой рельеф дна с глубиной потока от 5.2 до 8.8 см. В ходе проведения 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. По параметрам донных гряд вычислялся расход наносов в лотке. 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 двух циклах экспериментов при трапецеидальном гидрографе попуска воды.

В ходе проведения экспериментов в гидравлическом лотке был получен большой объем новых экспериментальных данных, иллюстрирующих кинематику потока и параметры транспорта наносов при установившемся и неустановившемся движении воды (табл. 1).

Результаты выполненных экспериментов показали, что осредненная за период прохождения попусковой волны величина расхода наносов при

**Таблица 1.** Результаты выполненных экспериментальных исследований транспорта наносов при неустановившемся движении потока в гидравлическом лотке

**Table 1.** Results of experimental studies of sediment transfer during unsteady flow movement in a hydraulic tray

№	Параметр	Исследования при установившемся режиме течения воды	Исследования при неустановившемся режиме течения воды
1	Расход воды, л/с	3.3	1.6–5.1
2	Средняя глубина, см	6.6	5.4–8.0
3	Средняя скорость, см/с	23.8	14.1–30.4
4	Средняя длина гряд, см	12.21	13.18
5	Средняя высота гряд, см	1.12	1.30
6	Средняя скорость движения гряд, см/мин	0.03	0.058
7	Число Фруда	0.30	0.19–0.34
8	Уклон свободной поверхности, ‰	1.50	1.0–2.0
9	Расход донных наносов (по грядам), см <sup>3</sup> /мин	0.47	1.07
10	Вынос (ловушка), см <sup>3</sup> /мин	0.63	1.18
11	Продолжительность эксперимента <sup>1</sup> , мин	135	140

<sup>1</sup>Без учета времени формирования рельефа.

неустановившемся движении воды в гидравлическом лотке увеличилась в два раза по сравнению с установившимся движением воды в лотке.

Эти данные качественно согласуются с материалами численных экспериментов.

Сопоставление рассчитанных и измеренных значений расхода наносов показало, что точность вычисления параметров твердого стока по используемым в работе расчетным формулам оказалась низкой. Расчетная зависимость расхода наносов, основанная на использовании числа Фруда (1), показала в разных экспериментах завышение рассчитанного расхода наносов на величину до одного порядка по сравнению с измеренными значениями расходов. Расхождение между рассчитанными и измеренными значениями расхода наносов по формуле (2) оказалось меньше.

Исследование данного вопроса, связанного с оценкой точности известных формул расхода наносов, выходит за рамки настоящей работы. При этом следует иметь в виду, что используемые в расчетной практике зависимости были получены по материалам измерений в гидравлических лотках и в реках при установившемся движении воды. Между тем в моменты времени, отвечающие началу сдвига частиц на дне потока, связь между расходом наносов и средней скоростью течения воды (касательным напряжением на дне потока) оказывается существенно более сильной, чем при установившемся массовом движении донных наносов в потоке. По разным оценкам, показатель степени при скорости течения воды в формуле расхода наносов в начале движения частиц грунта на дне потока оказывается в 5–6 раз больше, чем это принято в традиционных расчетных зависимостях.

Таким образом, выявленное несоответствие между рассчитанными и измеренными данными по величине стока наносов требует проведения дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При подготовке настоящей работы авторами были выполнены численные эксперименты по оценке гидравлических характеристик речного потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах гидроузлов на крупных судоходных реках. Полученные результаты позволили изучить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды и разработать определенные рекомендации для установления граничных условий при моделировании русловых переформирований.

Установлено, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны

суточного 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.

*Основные выводы, полученные по материалам численных экспериментов, заключаются в следующем:*

- при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла отмечается активизация транспорта наносов, как в летний период наблюдений — в условиях открытого русла, так и зимой, при движении воды подо льдом;

- наибольшие расхождения между почасовыми и среднесуточными данными наблюдаются в створах, расположенных в непосредственной близости от гидроузла. При этом расход наносов в приплотинной области увеличивается в 3.5–4 раза по сравнению с установившимся движением воды при равных значениях среднесуточных расходов воды за расчетный период времени;

- 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;

- в непосредственной близости от створа гидроузла интенсивность транспорта наносов в зимний период становится существенно меньше, чем летом; по мере удаления от створа ГЭС эта разница сокращается;

- в целом по длине реки, по мере удаления от створа гидроузла, интенсивность транспорта наносов снижается;

- суммарный объем стока наносов при суточном регулировании стока воды в нижнем бьефе гидроузла в меженно-летний период навигации сопоставим по величине с величиной стока наносов в половодье.

Для апробации результатов численного моделирования в работе выполнены эксперименты в гидравлическом лотке. Полученные данные качественно согласуются с результатами численных экспериментов. В ходе проведения экспериментов было установлено, что применяемые формулы расхода наносов показывают завышение расчетных данных по сравнению с результатами измерений. Определяющим фактором в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попускной волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками.

В связи с этим необходимо продолжить дальнейшее совершенствование методики численного моделирования параметров транспорта наносов применительно к условиям эпизодического движения донных частиц, наблюдаемым при организации суточных попусков расхода воды в нижних бьефах гидроузлов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беркович К.М. Руслые процессы и руслые карьеры. М.: Изд-во МГУ. 2005. 109 с.; ISBN 5-89575-078-8.

Гладков Г.Л., Беляков П.В. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов. Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 1. С. 52–63. doi: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.

Гладков Г.Л., Католиков В.М. Гидроморфологическое обоснование судоходства в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла на реке Волге. В сб.: Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, руслых и устьевых процессов. Доклады и сообщения. Пермь. 2023. С. 27–42.

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. В сб.: Водные пути и руслые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. Вып. 6. Ч. 1 / Под ред. проф. Г.Л. Гладкова, К.П. Моргунова / СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. 2023. С. 24–43.

Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. СПб.: Изд-во «Лань». 2023. 432 с.

Гладков Г.Л., Ржаковская П.С. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла. Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 3. С. 344–358. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358>

Гришанин К.В. Динамика руслых потоков. Л.: Гидрометеиздат. 1979. 311 с.

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

Исследования неустановившегося движения воды на реке Свири в зимних и летних условиях / Под ред. канд. техн. наук Н.Е. Кондратьева, канд. техн. наук В.А. Урываева / Л.: Гидрометеиздат. 1963. 252 с.

Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслвого процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.

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

Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Т. 1. Руслые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 608 с.

Babiński Z., Habel M. Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower. Acta Energetica. 2013. No. 1. P. 91–101.

Bombar G., Elçi Ş., Tayfur G. et al. Experimental and numerical investigation of bedload transport under unsteady flows. Journal of Hydraulic Engineering. 2011. No. 137(10). P. 1276–1282.

Garibin P., G. Gladkov, K. Morgunov et al. Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky Hydraulic Unit on the Volga River. International Scientific Conference “International Transport Scientific Innovation” AIP Conf. Proc. 2023. 2476, 030027-1–030027-8; <https://doi.org/10.1063/5.0103780>.

Marian Muste, Kyutae Lee, Dongsu Kim et al. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows. Journal of Hydraulic Research. 2020. P. 867–887. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1786742>

Schoeneich M., Habel M., Szatten D. et al. An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways. Water. 2023. No. 15. P. 141. <https://doi.org/10.3390/w15010141>.

### ОБ АВТОРАХ

Гладков Геннадий Леонидович – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой водных путей и водных изысканий.

Служебный адрес: 198035, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Е-mail: [gladkovgl@gumrf.ru](mailto:gladkovgl@gumrf.ru)

Ржаковская Полина Сергеевна – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» – ассистент

Служебный адрес: 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. Е-mail: [przhakovskaya@gumrf.ru](mailto:przhakovskaya@gumrf.ru)

# HYDRAULICS OF RIVER FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT PARAMETERS IN CASE OF UNSTEADY WATER MOVEMENT IN THE LOWER REACHES OF HYDROELECTRIC FACILITIES ON NAVIGABLE RIVERS

G.L. Gladkov, P.S. Rzhakovskaya

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
gladkovgl@gumrf.ru,  
przhakovskaya@mail.ru*

**Abstract:** The paper presents numerical experiments to evaluate the hydraulic characteristics of river flow and sediment transport parameters in the lower reaches of hydroelectric power plants on large navigable rivers. The results obtained made it possible to study the features of sediment movement in an unsteady water flow and develop certain recommendations for establishing boundary conditions when modeling channel transformations. The main conclusions obtained from the materials of numerical experiments are as follows: with the unsteady movement of water in the downstream of the hydroelectric power plant, sediment transport is activated, both in the summer observation period and in winter; the greatest discrepancies between hourly and daily average data are observed in the reservoirs located in the immediate vicinity of the hydroelectric power plant; the degree of increase in sediment consumption during the unsteady movement of water in the downstream of the hydroelectric power plant depends on the uneven regulation of water flow, the removal of the calculated hydraulic solution from the dam gate and the nature of changes in water content during navigation; in the immediate vicinity of the hydroelectric power plant, the intensity of sediment transport in winter becomes significantly less than in summer, as it moves away from the hydroelectric power station. The difference is decreasing; along the length of the river, as you move away from the waterworks, the intensity of sediment transport decreases. To test the results of numerical modeling, experiments were performed in a hydraulic tray. The obtained data are in qualitative agreement with the results of numerical experiments. During the experiments, it was found that the applied sediment consumption formulas show an overestimation of the calculated data compared with the measurement results.

**Keywords:** water flow rate, water flow rate, sediment flow rate, parameters of bottom ridges, Froude number, Shezi coefficient

## REFERENCES

- Berkovich K.M. (2005) Riverbed processes and riverbed quarries. Moscow: Publishing House of Moscow State University. 109 P.; ISBN 5-89575-078-8.
- Babiński Z., Habel M. (2013) Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower. *Acta Energetica*. No 1. P. 91–101.
- Bombar G., Elçi Ş., Tayfur G. et al. (2011) Experimental and numerical investigation of bedload transport under unsteady flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. No 137(10). P. 1276–1282.
- Chalov R.S. (2008) Russian studies: theory, geography, practice. Vol. 1. Riverbed processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions of formation of riverbeds. M.: Publishing house LKI. 608 p. (in Russ.)
- Garibin P., Gladkov G., Morgunov K. et al. (2023) Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky Hydraulic Unit on the Volga River. International Scientific Conference “International Transport Scientific Innovation” AIP Conf. Proc. 2476, 030027-1–030027-8; <https://doi.org/10.1063/5.0103780>.
- Gladkov G.L., Belyakov P.V. (2021) Sediment transport in rivers: dependence of bottom ridges parameters on determining factors. “Vestnik” Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping. Vol. 13. No. 1. pp. 52-63. doi: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63. (in Russ.)
- Gladkov G.L., Chalov, R.S. K. Berkovich K.M. (2023) Hydromorphology of navigable riverbeds. St. Petersburg, Publishing house “Lan”. 432 p. (in Russ.)
- Gladkov G.L., Katolikov V.M. (2023) Hydromorphological substantiation of navigation in the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric complex on the Volga River. In the collection: The thirty-eighth interuniversity coordination meeting on the problems of erosion, riverbed and estuarine processes. Reports and communications. Perm. pp. 27-42. (in Russ.)

- Gladkov G.L., Katolikov V.M., Rzhakovskaya P.S. (2023) Flow hydraulics and sediment transport parameters with unsteady water movement in the lower reaches of hydroelectric power plants on navigable rivers. In the collection: Waterways and riverbed processes. Hydraulic engineering structures of waterways. Issue 6. Part 1. / Edited by N. Prof. G.L. Gladkov, K.P. Morgunov). St. Petersburg: Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping. pp. 24-43. (in Russ.)
- Gladkov G.L., Rzhakovskaya P.S. (2023) Hydraulic characteristics of the river flow and conditions of sediment transport in the downstream of the hydroelectric facility. "Vestnik" Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping. Vol. 15. No. 3. pp. 344-358. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358> (in Russ.)
- Grishanin K.V. (1979) Dynamics of riverbed flows. L.: Hydrometeoizdat. 311 S. (in Russ.)
- Grushevsky M.S. (1982) Steady-state movement of water in rivers and canals. L.: Hydrometeoizdat. 288 p. (in Russ.)
- Klaven A.B., Kopaliani Z.D. (2011) Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and riverbed process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya. 544 p. (in Russ.)
- Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. (1982) Fundamentals of the hydromorphological theory of the riverbed process. L.: Hydrometeoizdat. 272 p. (in Russ.)
- Muste M., Lee K., Kim D. et al. (2020) Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows. Journal of Hydraulic Research. P. 867-887. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1786742>
- Rozovsky I.L., Eremenko E.V., Bazilevich V.A. (1967) Established the movement of the water flow below the hydroelectric power station and its influence on the riverbed. Kiev: Naukova dumka. 276 p. (in Russ.)
- Schoeneich M., Habel M., Szatten D. et al. (2023) An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways. Water. No 15. P. 141. <https://doi.org/10.3390/w15010141>.
- Studies have shown the instability of water movement on the Sviri rivers in winter and summer conditions (1963) / Edited by N. E. Kondratiev, Candidate of Technical Sciences, V. A. Uryvaev, Candidate of Technical Sciences. / L.: Hydrometeoizdat. 252 p. (in Russ.)