

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE RIVER FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT CONDITIONS IN THE DOWNSTREAM POOL OF THE HYDROELECTRIC COMPLEX

G. L. Gladkov, P. S. Rzhakovskaya

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

In this paper, the navigable section of the Svir River, located in the lower reaches of the Nizhne-Svirsky hydroelectric complex, is considered. Special in-situ observations were made in this section to study the hydraulic regime of the river flow under the conditions of unsteady water movement. The study has showed that the kinematic characteristics of the flow in the downstream pool vary with the distance from the site of the waterworks and depend on the regime of the discharge flows. The nature of the transformation of releases in the downstream under open channel and ice conditions has been studied. The values and intensity of changes in the main characteristics of the river flow during the propagation of the tail water wave in the lower reaches such as the nature of changes in the level regime and the slopes of the free surface on the hydraulic structures, the regime of water flow velocities, have been evaluated. The main hydraulic parameters of the river flow such as the values of the Froude number, the Chézy's coefficient and the water flow modulus are determined. The character of changes in local and convective accelerations is studied and their contribution to the general value of energy losses along the stream length is evaluated. Numerical experiments make it possible to identify the peculiarities of sediment movement in conditions of unsteady water flow and to develop recommendations for modelling channel transformations in such conditions. It is found that during daily and weekly regulation of the river discharge, sediment transport is activated at the moment when a wave of daily water discharge is passing from the upstream reservoir of the hydroelectric power plant. At the same time, the basic parameters of sediment transport such as the speed of dune movement and sediment discharge increase in comparison with the stationary movement of the water.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, sediment discharge, parameters of dunes, Froude number, Chézy's coefficient, channel transformations.

For citation:

Gladkov, Gennadii L., and Polina S. Rzhakovskaya. "Hydraulic characteristics of the river flow and sediment transport conditions in the downstream pool of the hydroelectric complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.

УДК 556.536

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНОГО ПОТОКА И УСЛОВИЯ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА

Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская

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

В работе рассматривается судоходный участок реки Свирь, расположенный в нижнем бьефе Нижне-Свирского гидроузла. На данном участке были проведены специальные натурные наблюдения по изучению гидравлического режима речного потока в условиях неустановившегося движения воды. Выполненные исследования показали, что кинематические характеристики потока в нижнем бьефе изменяются по мере удаления от створа гидроузла и зависят от режима сбросных расходов воды. Изучен характер трансформации попускового расхода воды в нижнем бьефе в условиях открытого русла и подо льдом. Выполнена оценка значений и интенсивности изменения основных характеристик речного потока при распространении волны пуска в нижнем бьефе: характера изменения уровня режима и уклонов свободной поверхности на гидростворах, режима скоростей течения воды. Определены основные гидравлические параметры речного потока: значения числа Фруда, коэффициента Шези и модуля расхода воды. Изучен

характер изменения локальных и конвективных ускорений и выполнена оценка их вклада в общую величину потерь энергии по длине потока. Численные эксперименты позволили выявить специфику движения наносов в условиях неустановившегося движения воды и разработать рекомендации для моделирования русловых переформирований в таких условиях. 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 движением воды.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, число Фруда, коэффициент Шези, русловые переформирования.

Для цитирования:

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

Введение (Introduction)

Кинематическая структура потока и динамика морфологических изменений в нижнем бьефе гидроузла в условиях недельного и суточного регулирования речного стока представляют собой сложную картину. Характеристики неустановившегося движения воды изучались в лабораторных и натуральных условиях в 60–70-е гг. прошлого столетия [1]–[3] в интересах гидроэнергетики. Выполненные исследования показали, что при прохождении волны попуска в нижнем бьефе гидроузла нарушается однозначная связь между расходами и уровнями воды, а моменты наступления максимальных значений уклона свободной поверхности, скорости течения воды, расхода и уровня воды не совпадают по времени.

Волна попуска расплывается по мере своего распространения от створа гидроузла вниз по течению реки, в результате чего амплитуды изменения величины попускового 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.

Гидравлические расчеты характеристик движения воды и переформирований дна в реках обычно выполняются путем решения известной системы уравнений, включающих уравнение неустановившегося неравномерного движения воды в реке, а также уравнения неразрывности и деформаций, которые замыкаются с помощью формулы коэффициента Шези и формулы расхода наносов. При численном моделировании русловых переформирований и составлении русловых прогнозов в реках используются теоретические основы динамики русловых потоков [4], [5], результаты гидравлических и гидроморфологических исследований [6]–[8], а также современный аппарат математического моделирования [9]–[11].

Величина гидравлического сопротивления движению воды в расчетах определяется обычно в зависимости от состава донных отложений и способа их перемещения [5], [12], [13], а величина расхода наносов вычисляется по одной из известных расчетных формул [4], [14], [15]. Гидравлические и экспериментальные исследования параметров транспорта наносов и русловых деформаций на гидравлических моделях и в реках проводились преимущественно в условиях установившегося движения воды [6], [16], [17]. Исследования кинематической структуры потока и русловых деформаций при неустановившемся режиме движения воды в нижних бьефах гидроузлов в последние годы проводились в ограниченных объемах [18], [19]. Вместе с тем проблемы обеспечения судоходства в нижних бьефах гидроузлов, расположенных вне зоны подпора, остаются по-прежнему актуальными [20]. До настоящего времени детальных исследований по вопросам изучения параметров транспорта наносов в нижних бьефах гидроузлов практически не проводилось.

Русловые прогнозы представляют практический интерес при инженерном обосновании вопросов строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры водного транспорта, при проведении

путевых мероприятий на судоходных реках, а также в других областях водопользования. В соответствии с рекомендациями МГУ им. М. В. Ломоносова [21]–[23] анализ руслового процесса в реках выполняется с учетом геоморфологических типов формирования русел и их морфодинамики. Проблема составления прогноза русловых переформирований в нижних бьефах гидроузлов в связи с неустановившимся характером движения воды представляется более сложной и требует проведения специальных натурных и экспериментальных исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе рассматривается участок реки Свирь, расположенный в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС. Река Свирь вытекает из Свирской губы Онежского озера и впадает в Ладожское озеро. Общее падение реки равно 27,5 м. Около 12 м, из которых в настоящее время используется Нижне-Свирской ГЭС (1933 г.), расположенной в 81 км от устья реки. На участке от створа гидроузла до устья река находится в подпоре от Ладожского озера. Падение свободной поверхности на этом участке составляет около 1,5 м.

На 128-м км от устья реки расположена Верхне-Свирская ГЭС, сданная в эксплуатацию в 1952 г. В створе гидроузла сосредоточено падение свободной поверхности величиной 14 м. Вышерасположенный участок реки, включая акваторию Онежского озера, находится в подпоре от этого гидроузла. В работе [1] представлены результаты детальных натурных исследований, выполненных на реке Свирь в нижнем бьефе Нижне-Свирской ГЭС с целью изучения гидрологического режима реки в условиях суточного регулирования речного стока.

Натурные измерения проводились в зимний и летний периоды времени. Для проведения наблюдений на участке реки длиной 59,5 км были разбиты шесть гидростворов и 22 уровневых поста. В процессе наблюдений в течение двух недельных циклов (один — зимой, один — летом) проводились систематические синхронные гидрометрические измерения скоростей течения воды на гидростворах и уровней воды на водпостах. В зависимости от фазы прохождения волны пуща временной шаг при выполнении измерений расходов воды изменялся в пределах от 15 мин до 1,0 ч.

Морфометрические характеристики речного русла были определены на 112 поперечниках, равномерно разбитых по длине участка исследований. Помимо наблюдений за уровнями и расходами воды в процессе исследований проводился отбор проб донных отложений, выполнялись гидрогеологические наблюдения за ходом уровней грунтовых вод при суточных колебаниях уровней воды в реке, метеорологические наблюдения за температурой воздуха и воды, а также за характеристиками ледяного покрова и механическими свойствами льда в зимнем цикле экспедиционных исследований.

Исходная система уравнений движения воды и неразрывности в одномерной постановке, используемая для решения поставленной задачи в общем случае неустановившегося неравномерного движения воды [4], записывается в следующем виде:

$$I = -\frac{\partial Z}{\partial l} = \frac{U^2}{C^2 H} + \frac{1}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial l} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t};$$

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

При выполнении расчетов гидравлических характеристик речного потока данные уравнения обычно решаются *методом конечных разностей*. Начальными условиями в данном случае служат распределения величины ширины русла $B_{(l,0)}$ и средней отметки дна $Z_{(l,0)}$ по длине потока на начальный момент времени $t = 0$. В качестве граничных условий на верхней границе расчетной области задается входной гидрограф, характеризующий ход сбросного расхода воды во времени $Q_{(0,t)}$, а на нижней границе — ход изменений уровня воды $Z_{(L,t)}$ во времени.

Надежность гидравлических расчетов в значительной степени зависит от точности определения величины потерь энергии по длине. В расчетной практике в ходе проведения вычислений

при установившемся движении воды величину коэффициента Шези обычно находят через коэффициент шероховатости по формуле Маннинга. Значения коэффициента шероховатости определяется подбором при калибровке и верификации модели по натурным данным при установившемся движении воды. Для случая неустановившегося движения таких рекомендаций в расчетной практике нет.

Экспериментальные и натурные исследования [6], [24], выполненные в гидравлических лотках и на реках с подвижными донными отложениями, показали, что размеры донных гряд изменяются с изменением расхода и уровня воды. Тесная прямая связь высоты донных гряд прослеживается с глубиной потока. В области малых глубин — в гидравлических лотках и малых водотоках, связь высоты гряд с глубиной потока оказалась сильнее, чем на крупных реках. При этом размеры гряд слабо зависят от крупности слагающих их частиц.

Материалы исследований, выполненных в гидравлических лотках с песчаными грядами, а также результаты их научного обобщения [4], [25], показали, что значение коэффициента Шези, отвечающее грядовому сопротивлению дна, оказалось обратно пропорциональным крутизне и относительной высоте гряд. В естественных русловых потоках величина сопротивления движению воды, обусловленная донными грядами, оказалась относительно больше, чем в гидравлических лотках. При этом определяющим фактором для оценки потерь энергии по длине в реках является длина гряд, точнее, шаг расположения водоворотных зон за гребнями гряд.

С увеличением расходов и уровней воды в реке параметры грядового рельефа возрастают, а потери энергии по длине потока уменьшаются. На спаде уровней воды наблюдается обратная картина. При неустановившемся движении воды скорость изменения высот гряд с меняющимся расходом воды в реке оказывается больше, чем скорость изменения их длин. В результате с ростом уровней воды крутизна гряд в потоке возрастает, а на спаде уменьшается.

Параметром, характеризующим величину расхода наносов в реке, является скорость перемещения донных гряд. Формула для вычисления среднего расхода наносов q_s , переносимого одной грядой, записывается в виде

$$q_s = (1 - \varepsilon) C_r \frac{\omega_r}{l_r} = (1 - \varepsilon) \sigma C_r h_r, \quad (2)$$

где ω_r — площадь продольного сечения гряды;

l_r — длина гряды;

h_r — высота гряды;

$\sigma = \omega_r / (l_r \cdot h_r)$ — коэффициент полноты профиля гряды;

ε — коэффициент пористости донных отложений;

C_r — скорость перемещения гряды.

В работе [15] с использованием натуральных и экспериментальных данных [26], [27] были получены расчетные формулы для вычисления основных характеристик параметров транспорта наносов: средних значений высоты и длины донных гряд в зависимости от глубины H речного потока. Расход наносов в данной работе вычислялся по формуле (1) по измеренным элементам движения донных гряд как произведение высоты гряды на скорость ее перемещения. Значения коэффициента полноты формы гряды и коэффициента пористости грунта в данных вычислениях принимались равными их средним значениям: $\sigma = \omega_r / l_r h_r = 0,6$ и $\varepsilon = 0,4$.

Полученная зависимость записывается в виде

$$q_s / HU = 0,0014 (U / \sqrt{gH})^{3,11}. \quad (3)$$

Установленная связь между расходом донных наносов и числом Фруда (U / \sqrt{gH}) оказалась достаточно тесной, с высоким коэффициентом корреляции. В настоящей работе эти расчетные зависимости будут использованы для проведения численного эксперимента при оценке параметров транспорта наносов в условиях неустановившегося движения воды.

На основании материалов специальных гидрологических исследований, выполненных в нижнем бьефе Нижне-Сви́рского гидроузла на реке Сви́ри, результатов наблюдений за сбросными расходами

на гидроузле, данных почасовых и среднесуточных наблюдений за уровнями воды, скоростями течения воды и уклонами свободной поверхности на гидростворах, а также результатов численных экспериментов в настоящей работе решаются следующие задачи:

- изучить характер изменения сбросных расходов, скоростного и уровня режимов в нижнем бьефе гидроузла;
- выполнить анализ гидравлических характеристик речного потока: значений числа Фруда, коэффициента Шези, коэффициента шероховатости речного русла, параметров транспорта наносов, а также значений локальных и конвективных ускорений и изучить характер их изменения при прохождении волны попуска в нижнем бьефе гидроузла в период открытого русла и в зимних условиях при движении воды подо льдом.

Результаты (Results)

Каскад водохранилищ на реке Свирь расположен на основной трассе Волго-Балтийского водного пути. Водные ресурсы водохранилищ, кроме гидроэнергетики и водного транспорта, используются для жилищно-коммунального хозяйства, рыбного хозяйства и промышленности. Объем водохранилища Верхне-Свирской ГЭС составляет 295000 млн м³ (без учета объема Онежского озера), что позволяет осуществлять многолетнее, недельное и суточное регулирование стока. Объем водохранилища Нижне-Свирской ГЭС составляет 119 млн м³ и используется для суточного регулирования стока.

Для анализа параметров неустановившегося движения воды в нижнем бьефе гидроузла была выполнена обработка данных измерений на 1-, 2- и 4-м гидростворах, наблюдения на которых производились в зимний и в летний периоды проведения экспериментов [1]. Общая информация о характеристиках сбросных расходов воды приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сведения о режиме сбросных расходов воды

Гидроствор	Расстояние от гидроузла, км	Амплитуда попусковых расходов, м ³ /с	Средний попусковый расход, м ³ /с	Амплитуда уровней воды, м	Средняя отметка уровня воды, м
Зимняя серия наблюдений (13.02–17.02.61)					
Г/с 1	3,50	1222	462,16	4,48	16,48
Г/с 2	7,41	1233	496,14	4,29	16,38
Г/с 4	29,93	948	464,03	2,37	15,20
Летняя серия наблюдений (23.10–27.10.61)					
Г/с 1	3,50	1270	535,84	2,66	15,75
Г/с 2	7,41	1192	526,01	2,45	15,64
Г/с 4	29,93	1082	552,22	1,35	15,07

Табличные данные показывают, что при проведении экспериментов в летний период времени удалось воспроизвести режим сбросных расходов, аналогичный зимнему циклу. При этом средние значения амплитуды попусковых расходов для двух циклов измерений оказались практически равными. Амплитуда изменения уровней воды в створах постов летом оказалась в 1,6–1,7 раза меньше, чем зимой. Средние отметки уровней воды на постах в летнем цикле также оказались ниже, чем в зимний период наблюдений.

В табл. 2 приведены результаты обработки материалов гидрометрических измерений на гидростворах, выполненных в зимних и летних условиях за одни сутки (79–103 ч эксперимента). В таблице, наряду с данными о гидравлических и морфометрических характеристиках потока и русла реки, дополнительно приведены сведения о рассчитанных значениях числа Фруда, коэффициента Шези, модуля расхода воды и значениях расхода наносов, вычисленных по формуле (3). Расхождение гидравлических характеристик потока в нижнем бьефе гидроузла обусловлены различиями в условиях движения воды при открытом русле и зимой подо льдом. При движении воды подо льдом возрастает общая величина потерь энергии по длине. В результате суточная амплитуда изменения

отметок уровней воды при прохождении волны попуска становится больше, чем при открытом русле. Средние скорости течения воды на гидростворе № 1 зимой в течение суток изменяются в диапазоне 0,064–0,701 м/с. По мере удаления от створа гидроузла амплитуда суточных изменений скорости течения уменьшается почти в два раза.

В летний период скорости течения воды на всех гидростворах возрастают по сравнению с зимой. Максимальные суточные значения средней скорости течения воды вблизи гидроузла достигают значений порядка 1,0 м/с. На гидростворе № 4 суточная амплитуда изменения средней скорости течения при прохождении волны попуска составляет величину около 0,5 м/с, т. е. почти в два раза больше, чем зимой.

Таблица 2

Гидравлические характеристики речного потока по данным наблюдений

Гидравлический параметр потока	Диапазон изменения	Номер гидроствора					
		1		2		4	
		Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето
Расход воды, $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Макс.	1250	1270	1260	1220	1000	1130
	Мин.	66	40	100	67	292	190
	Средн.	622	640	669	641	653	674
Уровень воды, $Z, \text{ м}$	Макс.	18,57	17,14	18,37	16,92	16,38	15,79
	Мин.	15,54	14,74	15,38	14,73	14,97	14,57
	Средн.	17,28	16,10	17,14	15,98	15,75	15,27
Средняя скорость, $U, \text{ м/с}$	Макс.	0,701	0,97	0,72	0,86	0,65	0,68
	Мин.	0,064	0,05	0,088	0,073	0,26	0,16
	Средн.	0,366	0,48	0,40	0,47	0,48	0,45
Число Фруда, $U / \sqrt{gH} (-)$	Макс.	0,106	0,160	0,100	0,127	0,100	0,099
	Мин.	0,011	0,010	0,014	0,012	0,045	0,025
	Средн.	0,053	0,076	0,055	0,069	0,077	0,068
Уклон, $I, \text{ ‰}$	Макс.	0,178	0,103	0,164	0,085	0,094	0,056
	Мин.	0,003	0,003	0,007	0,003	0,028	0,011
	Средн.	0,039	0,034	0,067	0,035	0,064	0,036
Коэффициент Шези, $C / \sqrt{g} (-)$	Макс.	12,01	16,87	10,26	14,72	10,57	14,37
	Мин.	4,30	5,26	3,30	7,39	8,07	8,37
	Средн.	9,22	12,55	7,33	11,76	9,62	11,30
Модуль расхода, $K = \omega C \sqrt{H},$ $\text{ м}^3/\text{с} \cdot 10^4$	Макс.	17,47	16,57	12,00	16,00	10,59	16,44
	Мин.	3,80	2,31	4,05	4,42	5,59	4,42
	Средн.	10,37	10,18	8,30	10,49	8,06	11,07
Расход наносов, $q_s, \text{ м}^2/\text{сут}$	Макс.	0,3513	1,488	0,351	0,784	0,262	0,303
	Мин.	0,00	0,00	0,0007	0,00	0,007	0,0008
	Средн. ¹	0,0158	0,0707	0,0191	0,040	0,0415	0,0320
	Средн. ²	0,0620	0,2512	0,0584	0,150	0,0579	0,0695

¹ — средние значения по среднесуточным данным наблюдений;

² — средние значения по данным почасовых наблюдений.

Суточная амплитуда изменения числа Фруда при прохождении волны попуска подо льдом на гидростворе № 1 изменяется в десять раз в пределах от 0,011 до 0,10. По мере удаления от створа гидроузла она уменьшается примерно в два раза. На всех гидростворах максимальные значения числа Фруда выравниваются по длине рассматриваемого участка реки и составляют в среднем величину около 0,1. Диапазон минимальных значений числа Фруда составляет 0,01–0,045, причем относительно большие значения наблюдаются на гидростворах, удаленных от створа гидроузла.

В период открытого русла характер изменения данного параметра по длине реки и с изменением уровня воды изменяется. На гидростворе № 1 амплитуда суточного изменения числа Фруда

составляет порядка 0,01–0,16, т. е. возрастает в полтора раза по сравнению с зимним периодом. На гидростворе № 4, расположенном ниже по течению, эта величина уменьшается примерно в два раза. При этом максимальные значения данного параметра на гидростворе № 4 зимой и летом оказались практически равными.

Анализ характера изменений уклонов свободной поверхности при прохождении волны попуска позволил установить следующую картину. В зимний период максимальные значения уклонов на всех гидростворах в 1,7–1,9 раза больше, чем летом. По мере удаления от створа гидроузла уклоны уменьшаются примерно в два раза в обоих циклах наблюдений — как в зимний период, так и летом. На фазе прохождения обратной волны попуска в связи со значительной амплитудой изменения сбросного расхода в течение суток происходит опорожнение нижнего бьефа и уклоны свободной поверхности принимают значения, близкие к нулевым.

В процессе работы были выполнены тестовые расчеты по оценке величины потерь энергии по длине. В первом цикле вычислений величина потерь энергии находилась без учета конвективных и локальных ускорений, как это рекомендуется современной практикой [10] решения задач речной гидродинамики. Анализ изменения значений коэффициента Шези показывает, что максимальные значения данного параметра отвечают моментам прохождения волны попуска. При этом по длине реки максимальные значения коэффициента Шези монотонно убывают как в летний, так и в зимний периоды наблюдений. Минимальные значения коэффициента Шези на гидростворах имеют тенденцию к увеличению по длине реки. В период открытого русла коэффициенты Шези в среднем на 40 % больше, чем зимой, что свидетельствует об увеличении потерь энергии при движении воды подо льдом. При прохождении волны попуска значения величины коэффициента Шези на гидростворе изменяются (возрастают почти в два-три раза), причем наибольшая разница между минимальными и максимальными значениями отмечается на створах, расположенных ближе к гидроузлу.

Пропускная способность русла в данной работе оценивалась по величине модуля расхода воды. В целом характер изменения данного параметра как по длине реки, так и на гидростворах в момент прохождения волны попуска примерно соответствует ходу изменений коэффициента Шези. Отличия заключаются на гидростворе № 1, где несмотря на большие значения коэффициента Шези пропускная способность в период открытого русла оказалась меньше, чем зимой.

В зимний период интенсивность транспорта наносов становится меньше, чем летом. В непосредственной близости от створа гидроузла максимальная величина расхода наносов зимой оказалась в 4 раза меньше, чем в период открытого русла. В целом по длине реки, по мере удаления от створа гидроузла, интенсивность транспорта наносов уменьшается. При этом также сокращается разница между зимними и летними значениями расхода наносов.

Результаты численных экспериментов по оценке величины расхода наносов, выполненных по данным почасовых наблюдений, показывают, что в условиях неустановившегося движения воды происходит увеличение расхода наносов в 2–3,5 раза по сравнению с аналогичными вычислениями по среднесуточным параметрам. Наибольшие расхождения между почасовыми и среднесуточными данными наблюдаются в створах, расположенных в непосредственной близости от гидроузла. Активизация транспорта наносов при прохождении волны попуска отмечается на всех гидростворах, как в летний период наблюдений в условиях открытого русла, так и зимой при движении воды подо льдом.

На рис. 1 показаны хронологические графики изменения отметок уровней воды, сбросных расходов воды и рассчитанных значений коэффициентов шероховатости (по Маннингу) на гидростворах № 1, 2 и 4 в зимний и летний периоды наблюдений. Результаты выполненных вычислений показывают, что минимальные значения коэффициентов шероховатости русла отвечают моментам прохождения пиковых расходов воды. В летний период средние величины коэффициентов шероховатости на гидростворах изменяются в диапазоне 0,025–0,035 с/м^{1/3}. Зимой эта амплитуда становится больше и составляет в среднем 0,035–0,055 с/м^{1/3}. Наибольшие значения коэффициентов шероховатости на гидростворах отмечаются в моменты суточных провалов расходов и уровней воды, когда они достигают значений 0,07–0,08 с/м^{1/3} и более.

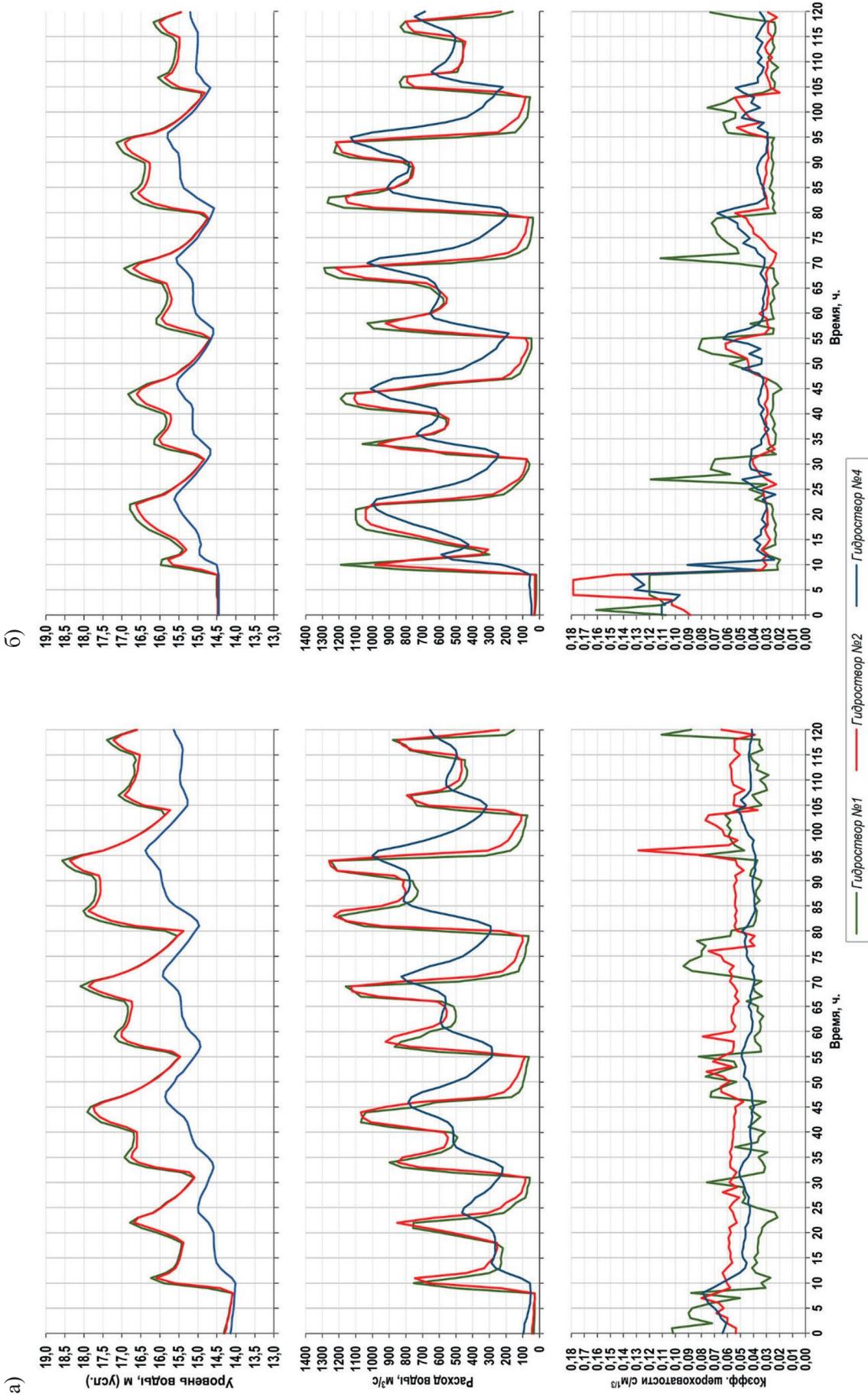


Рис. 1. Хронологические графики изменения отметок уровней воды, сбросных расходов и коэффициентов шероховатости русла на гидростворах № 1, 2 и 4 в зимний (а) и летний (б) периоды наблюдений

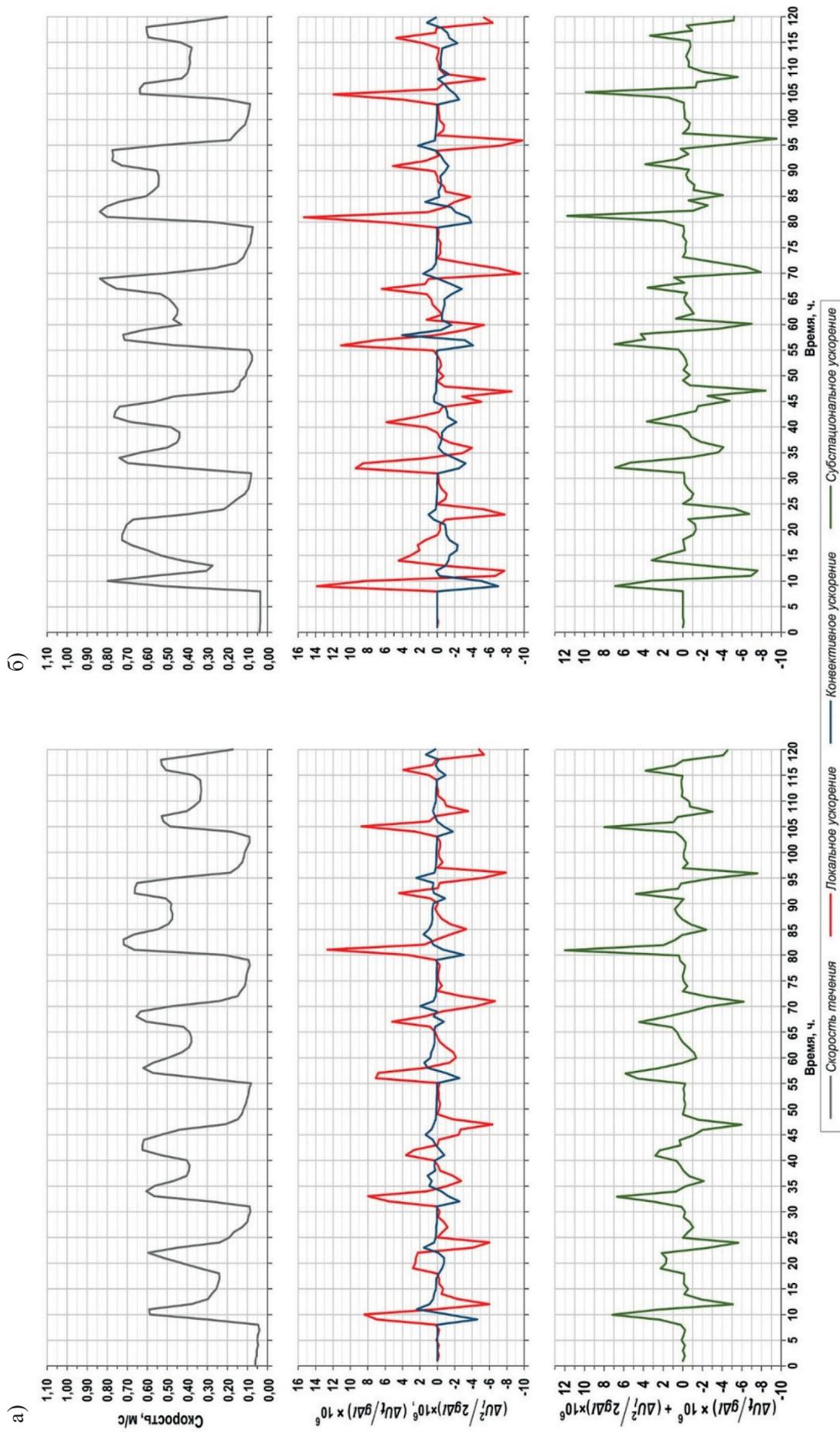


Рис. 2. Хронологические графики изменения скоростей течения воды, конвективных $\Delta U_i^2/2g\Delta t$, локальных $\Delta U_i/g\Delta t$ и субстанциональных $(\Delta U_i^2/2g\Delta t + \Delta U_i/g\Delta t)$ ускорений на гидростворе № 2 в зимний (а) и летний (б) периоды наблюдений

В данной работе выполнена оценка величины конвективного и локального ускорений в уравнении движения воды (1) и определен их вклад в общую величину потерь энергии по длине (рис. 2). На рисунке приведен хронологический график изменения скорости течения воды в створе поста № 2, а также графики изменения конвективных $\Delta U_i^2/2g\Delta l$, локальных $\Delta U_i/g\Delta l$ и субстанциональных ($\Delta U_i^2/2g\Delta l + \Delta U_i/g\Delta l$) ускорений на гидростворе № 2 в зимний и летний периоды наблюдений. Полученные результаты показывают, что положительные значения локальных ускорений на хронологическом графике имеют ряд характерных экстремумов, отвечающих начальному моменту прохождения волны попуска в створе гидрологического поста, а отрицательные максимумы, соответственно, заключительному моменту ее прохождения.

В зимний период наблюдений максимальное значение положительного локального ускорения получилось равным $12,7 \cdot 10^{-6}$, что составляет примерно 8 % от величины уклона свободной поверхности в момент наблюдений на гидростворе № 2. Значение отрицательного локального ускорения равно $-7,9 \cdot 10^{-6}$, что в 1,6 раза меньше положительного ускорения и составляет около 13 % от величины уклона свободной поверхности.

В летний период локальные ускорения становятся больше, чем летом в среднем на 20–25 %. Максимальное значение положительного локального ускорения получилось равным $15,3 \cdot 10^{-6}$, что составляет примерно 19 % от величины уклона свободной поверхности в момент наблюдений на гидростворе № 2. Отрицательное локальное ускорение составило $-9,79 \cdot 10^{-6}$, что примерно в 1,5 раза меньше положительного ускорения и сопоставимо по величине с уклоном свободной поверхности.

Максимальные положительные значения конвективных ускорений отвечают максимальным отрицательным значениям локальных ускорений и наоборот. По абсолютной величине конвективные ускорения оказались меньше, чем локальные, в среднем в 3–4 раза.

Хронологический график, иллюстрирующий изменение во времени суммы конвективных и локальных ускорений, показывает, что целом ход изменения величины субстанционального ускорения зимой и летом оказался достаточно близким, а сами значения максимальных ускорений мало различаются по величине. На графике отмечается ряд характерных временных периодов, в течение которых суммарная величина ускорений оказывается равной или близкой к нулевому значению. Такие временные промежутки соответствуют моментам суточного провала сбросных расходов воды и максимальным значениям пиковых расходов воды на гидростворе. Последняя связь оказалась менее отчетливой в связи с двухступенчатым характером режима суточного попуска расходов воды и обусловленной им перестройкой кинематической структуры речного потока.

Заключение (Conclusion)

Анализ материалов специальных натуральных исследований, выполненных в нижнем бьефе Нижне-Свирского гидроузла в зимний и летний периоды времени, показал, что при прохождении волны суточного попуска воды происходят сложные процессы, связанные с трансформацией (распластыванием) волны попускового расхода по мере удаления от створа гидроузла. В ходе распространения волны попуска изменяются все гидравлические характеристики речного потока: отметки уровня воды, скорости течения воды и уклоны свободной поверхности.

Изменения характеристик речного потока в работе оценивались с помощью гидравлических параметров: значений числа Фруда, коэффициента Шези, коэффициента шероховатости речного русла, параметров транспорта наносов, а также значений локальных и конвективных ускорений. Полученные результаты иллюстрируют кинематику потока в нижнем бьефе гидроузла и характер изменения основных параметров потока в условиях неустановившегося движения воды подо льдом и в условиях открытого русла.

По мере удаления от створа гидроузла уменьшается амплитуда изменения величины попускового расхода воды и отметок уровней воды на гидростворах. В зимний период времени, при движении воды подо льдом, уменьшение амплитуды расходов воды происходит в большей степени, чем в период открытого русла. При этом анализ уровня режима в нижнем бьефе гидроузла показал

обратную картину — зимой амплитуда колебания уровней воды при прохождении волны попуска оказалась больше, чем летом.

Анализ полученных данных показал, что в зимний период наблюдений средние скорости течения и значения числа Фруда оказались меньше, чем летом при аналогичных расходах воды. Таким образом, процесс затухания попусковой волны в зимний период времени подо льдом происходит более интенсивно, чем летом. Отсюда следует ожидать, что в период открытого русла дальность распространения волны попуска будет больше, чем зимой.

Выполненная в работе оценка потерь энергии по длине речного потока свидетельствует о том, что в зимний период времени сопротивление движению воды, оцениваемое с помощью коэффициента шероховатости (по Маннингу), увеличивается на 40–50 % по сравнению с условиями движения воды при открытом русле. Минимальные значения коэффициента шероховатости отвечают пиковым расходам воды при прохождении волны попуска через гидроствор, а максимальные значения — суточным провалам расходов и уровней воды. В зимний период времени разброс значений коэффициента шероховатости между створами наблюдений оказался больше, чем летом. Оценка связи коэффициента Шези с уровнями воды, а также со скоростью течения воды на гидростворах показала низкую корреляцию.

Анализ значений локальных и конвективных ускорений позволил оценить характер и интенсивность их изменений при распространении волны попускового расхода воды в нижнем бьефе гидроузла. Установлено, что максимальные положительные значения локальных ускорений отмечаются в начальный момент прохождения волны попуска на гидростворе, а отрицательные значения приурочены к заключительному моменту. Последние примерно на 50 % меньше по величине, чем положительные ускорения. Летом локальные ускорения оказались больше, чем зимой, а также возрастает их вклад в общую величину потерь энергии по длине. По мере удаления от гидроузла абсолютные значения локальных ускорений будут уменьшаться. Относительная доля величины конвективных ускорений на гидростворе, расположенном вблизи створа гидроузла, оказалась меньше в три-четыре раза, чем локальные ускорения.

Результаты численных экспериментов по оценке параметров транспорта наносов, выполненных по данным почасовых наблюдений, показывают, что в условиях неустановившегося движения воды происходит увеличение расхода наносов в 2–3,5 раза по сравнению с аналогичными значениями, полученными по среднесуточным параметрам речного потока. Наибольшие расхождения между почасовыми и среднесуточными данными наблюдаются в створах, расположенных в непосредственной близости от гидроузла. Активизация транспорта наносов при прохождении волны попуска отмечается на всех гидростворах, как в летний период наблюдений — в условиях открытого русла, так и зимой, при движении воды подо льдом.

В зимний период интенсивность транспорта наносов становится меньше, чем летом. В непосредственной близости от створа гидроузла максимальная величина расхода наносов зимой оказалась в четыре раза меньше, чем в период открытого русла. В целом по длине реки, по мере удаления от створа гидроузла, интенсивность транспорта наносов снижается. При этом также сокращается разница между зимними и летними значениями расхода наносов.

Результаты, полученные в рамках настоящего исследования, позволят улучшить практику гидравлических расчетов гидродинамических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов с целью повышения точности и надежности расчетного обоснования путевых мероприятий на судоходных реках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследования неустановившегося движения воды на реке Свири в зимних и летних условиях / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. ордена Трудового Красного Знамени гидрол. ин-т; под ред. канд. техн. наук Н. Е. Кондратьева и канд. техн. наук В. А. Урываева. — Л.: Гидрометеоздат, 1963. — 252 с.

2. *Розовский И. Л.* Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло / И. Л. Розовский, Е. В. Еременко, В. А. Базилевич. — Киев: Наукова думка, 1967. — 276 с.
3. *Грушевский М. С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах / М. С. Грушевский. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 288 с.
4. *Гришанин К. В.* Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
5. *Гришанин К. В.* Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
6. *Клавен А. Б.* Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 544 с.
7. *Gladkov G.* Hydromorphological substantiation of channel stability of navigable rivers in engineering water transport regulation of river runoff / G. Gladkov, M. Zhuravlev, V. Katolikov // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019: Volume 2. — Springer International Publishing, 2021. — Pp. 661–675. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_63.
8. *Гладков Г. Л.* Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 4-е изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2023. — 432 с.
9. *Belikov V. V.* On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers / V. V. Belikov, N. M. Borisova, T. A. Fedorova, O. A. Petrovskaya, V. M. Katolikov // Water Resources. — 2019. — Vol. 46. — Is. 1. — Pp. S20–S28. DOI: 10.1134/S0097807819070029.
10. *Беликов В. В.* Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики / В. В. Беликов, А. И. Алексюк. — М.: РАН, 2020. — 346 с.
11. *Prokofyev V. A.* Application of unified 3D hydro-thermal model of a reservoir for estimation of HPP construction influence on environment / V. A. Prokofyev // ICOLD, Proceedings of the International Symposium on Dams on changing word. — Kyoto, 2012. — Pp. 69–74.
12. *Гладков Г. Л.* Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
13. *Гладков Г. Л.* Исследование зернистой шероховатости дна речных русел / Г. Л. Гладков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
14. *Gladkov G.* Sediment transport and water flow resistance in alluvial river channels: modified model of transport of non-uniform grain-size sediments / G. Gladkov, M. Habel, Z. Babiński, P. Belyakov // Water. — 2021. — Vol. 13. — Is. 15. — Pp. 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
15. *Гладков Г. Л.* Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
16. *Католиков В. М.* Побочни в руслах рек: условия образования и их динамика / В. М. Католиков, З. Д. Копалиани // Водные ресурсы. — 2001. — Т. 28. — № 5. — С. 579–586.
17. *Гладков Г. Л.* Параметры транспорта наносов в реках с побочным типом руслового процесса / Г. Л. Гладков, В. М. Католиков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 493–507. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-493-507.
18. *Babiński Z.* Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower / Z. Babiński, M. Habel // Acta Energetica. — 2013. — Vol. 4. — Pp. 83–96. DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013206.
19. *Беляков П. В.* Анализ и оценка гидроморфологической ситуации на участке строительства мостового перехода через р. Зею в г. Благовещенске с помощью математического моделирования характеристик движения воды / П. В. Беляков, С. В. Конопацкий, П. С. Ржаковская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 862–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-862-874.
20. *Schoeneich M.* An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways / M. Schoeneich, M. Habel, D. Szatten, D. Absalon, J. Montewka // Water. — 2023. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 141. DOI: 10.3390/w15010141.

21. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. — Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. — 608 с.
22. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — М.: КРАСАНД, 2011. — Том 2. Морфодинамика речных русел. — 960 с.
23. Чалов Р. С. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений / Р. С. Чалов, С. Р. Чалов // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47. — № 3. — С. 259–271. DOI: 10.31857/S0321059620030049.
24. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Смищенко. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
25. Sukhodolov A. N. Flow dynamics in alluvial channels: the legacy of Kirill V. Grishanin / A. N. Sukhodolov, V. I. Nikora, V. M. Katolikov // Journal of Hydraulic Research. — 2011. — Vol. 49. — Is. 3. — Pp. 285–292. DOI: 10.1080/00221686.2011.567760.
26. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». — 2017. — № 9 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).
27. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в гидравлических моделях горных рек и лотковых экспериментах» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». — 2017. — № 8 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

REFERENCES

1. Kondrat'eva, N. E., and V. A. Uryvaeva. *Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody na reke Sviri v zimnikh i letnikh usloviyakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1963.
2. Rozovskii, I. L., E. V. Eremenko, and V. A. Bazilevich. *Neustanovivsheesya dvizhenie vodnogo potoka nizhe gidroelektrostantsii i ego vliyanie na ruslo*. Kiev: Naukova dumka, 1967.
3. Grushevskii, M. S. *Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekakh i kanalakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.
4. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
5. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
6. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Ekspierimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.
7. Gladkov, Gennady, Michail Zhuravlev, and Viktor Katolikov. “Hydromorphological substantiation of channel stability of navigable rivers in engineering water transport regulation of river runoff.” *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019: Volume 2*. Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_63.
8. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2022.
9. Belikov, V. V., N. M. Borisova, T. A. Fedorova, O. A. Petrovskaya, and V. M. Katolikov. “On the Effect of the Froude Number and Hydromorphometric Parameters on Sediment Transport in Rivers.” *Water Resources* 46.1 (2019): S20–S28. DOI: 10.1134/S0097807819070029.
10. Belikov, V. V., and A. I. Aleksyuk. *Modeli melkoi vody v zadachakh rechnoi gidrodinamiki*. M.: RAN, 2020.
11. Prokofyev, V. A. “Application of unified 3D hydro-thermal model of a reservoir for estimation of HPP construction influence on environment.” *ICOLD, Proceedings of the International Symposium on Dams on changing word*. Kyoto, 2012. 69–74.
12. Gladkov, Gennadii L., and Michail V. Zhuravlev. “Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

13. Gladkov, Gennadii L. “Studying the granular roughness of river channels bottom.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
14. Gladkov, Gennady, Michał Habel, Zygmunt Babiński, and Pakhom Belyakov. “Sediment transport and water flow resistance in alluvial river channels: modified model of transport of non-uniform grain-size sediments.” *Water* 13.15 (2021): 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
15. Gladkov, Gennadii L. and Pachom V. Beljakov. “Sediment transport in rivers: dependence of the dunes parameters on the determining factors.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-52-63.
16. Katolikov, V. M., and Z. D. Kopaliani. “Pobochni v ruslakh rek: usloviya obrazovaniya i ikh dinamika.” *Vodnye resursy* 28.5 (2001): 579–586.
17. Gladkov, Gennadii L., Viktor M. Katolikov, and Pachom V. Belyakov. “Parameters of sediments transport in rivers with a side type of the channel process.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 493–507. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-493-507.
18. Babiński, Zygmunt, and Michał Habel. “Hydromorphological conditions of the Lower Vistula in the development of navigation and hydropower.” *Acta Energetica* 4 (2013): 83–96. DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013206.
19. Belyakov, Pachom V., Sergei V. Konopatsky, and Polina S. Rzhakovskaya. “Analysis and assessment of the hydromorphological situation at the construction site of a bridge crossing over the Zeya river in Blagoveshchensk using mathematical modeling of water movement characteristics.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 862–874. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-862-874.
20. Schoeneich, Marta, Michał Habel, Dawid Szatten, Damian Absalon, and Jakub Montewka. “An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways.” *Water* 15.1 (2023): 141. DOI: 10.3390/w15010141.
21. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. M.: Izd-vo LKI, 2008.
22. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND, 2011.
23. Chalov, R. S., and S. R. Chalov. “Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding.” *Water Resources* 47.3 (2020): 374–386.
24. Kondrat’ev, N. E., I. V. Popov, and B. F. Snishchenko. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.
25. Sukhodolov, Alexander N., Vladimir I. Nikora, and Viktor M. Katolikov. “Flow dynamics in alluvial channels: the legacy of Kirill V. Grishanin.” *Journal of Hydraulic Research* 49.3 (2011): 285–292. DOI: 10.1080/00221686.2011.567760.
26. Kopaliani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. “Dannye izmerenii gidravlicheskih kharakteristik transporta donnykh nanosov v bol’shikh, malykh i srednikh ravninnykh rekakh.” *Ofitsial’nyi byulleten’ «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral’nykh mikroskhem»* 9 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM>.
27. Kopaliani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. “Dannye izmerenii gidravlicheskih kharakteristik transporta donnykh nanosov v gidravlicheskih modelyakh gornykh rek i lotkovykh eksperimentakh.” *Ofitsial’nyi byulleten’ «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral’nykh mikroskhem»* 8 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладков Геннадий Леонидович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gladkov, Gennadii L. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
 198035, Russian Federation
 e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

Ржаковская Полина Сергеевна —

аспирант, ассистент

Научный руководитель:

Гладков Геннадий Леонидович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: przhakovskaya@gumrf.ru

Rzhakovskaya, Polina S. —

Postgraduate, assistant

Supervisor:

Gladkov, Gennadii L

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,

198035, Russian Federation

e-mail: przhakovskaya@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.

Received: April 10, 2023.