

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196

EXPERIMENTAL STUDIES OF FLOW HYDRAULICS AND BEDLOAD TRANSPORT PARAMETERS IN UNSTEADY FLOW

G. L. Gladkov¹, P. S. Rzhakovskaya¹, R. V. Zavarzin^{1,2}

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation;

² — State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The results of experimental studies of water flow characteristics and sediment transport parameters carried out in a hydraulic flume with a sandy deformable bottom under steady and unsteady water flow conditions are considered in the paper. The experiments were carried out in the hydraulic flume 8.0 meters long and 0.21 meters width. The flume is equipped with devices for changing the bottom slope in the range of values: straight — up to 0.025, reverse — up to 0.015, as well as for automatic reproduction of the flow hydrograph according to a given program. The range of flow rates in the experiments varied in the range from 2.0 to 6.0 l/s. Quartz sand with a diameter of 0.1 to 0.3 mm was used as channel material. The intensity values of changes in the main characteristics of the river flow during the propagation of wave are determined in the work; and this intensity including the nature of changes in the level regime and slopes of the free surface, as well as the regime of water flow velocities, is evaluated. The parameters of bedload transport including the length and height of dunes, the speed of dunes movement and the sediments flow rate are studied. Statistical processing of the dunes relief parameters with steady and unsteady water movement is carried out. Hydraulic studies and numerical experiments have made it possible to identify the specifics of sediment movement in conditions of unsteady movement. It has been experimentally established that with unsteady movement of water, sediment transport is activated at the moments of the water release wave passage. At the same time, the main parameters of the sediment transport, namely, the dunes movement speed and sediment consumption, increase in comparison with the steady movement of water.

Keywords: water flow rate, water discharge, bedload sediment transport, sediment discharge, parameters of dunes, Froude number, Chézy's coefficient, unsteady flow.

For citation:

Gladkov, Gennadii L., Polina S. Rzhakovskaya, and Ruslan V. Zavarzin. “Experimental studies of flow hydraulics and bedload transport parameters in unsteady flow.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196.

УДК 556.536

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИКИ ПОТОКА И ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТА ДОННЫХ НАНОСОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ

Г. А. Гладков¹, П. С. Ржаковская¹, Р. В. Заварзин^{1,2}

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² — ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик течения воды и параметров транспорта наносов, выполненных в гидравлическом лотке с песчаным деформируемым дном при установившемся и неустойчивом режиме течения воды. Эксперименты проведены

в гидравлическом лотке длиной 8,0 м и шириной 0,21 м, оборудованном устройствами для изменения уклона дна в диапазоне значений: прямым — до 0,025, обратным — до 0,015, а также для автоматического воспроизведения гидрографа стока по заданной программе. Диапазон расходов в экспериментах изменялся в диапазоне от 2,0 л/с до 6,0 л/с. В качестве руслового материала использовался кварцевый песок диаметром 0,1–0,3 мм. В работе определены значения и дана оценка интенсивности изменения основных характеристик речного потока при распространении волны попуска, включая характер изменения уровенного режима и уклонов свободной поверхности, а также режим скоростей течения воды. Изучены параметры транспорта влекомых наносов, в том числе длины и высоты донных гряд, скорости перемещения гряд и расход наносов. Выполнена статистическая обработка параметров грядового рельефа при установившемся и неустойчивом движении воды. Гидравлические исследования и численные эксперименты позволили выявить специфику движения наносов в условиях неустойчивого движения. Экспериментально подтверждено, что при неустойчивом движении воды транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны попуска воды. При этом основные параметры транспорта наносов — скорость перемещения гряд и расход наносов — возрастают по сравнению со стационарным движением воды.

Ключевые слова: скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, параметры донных гряд, число Фруда, коэффициент Шези, неустойчивое течение воды.

Для цитирования:

Гладков Г. Л. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустойчивом движении воды / Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская, Р. В. Заварзин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 181–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-181-196.

Введение (Introduction)

Инженерное обоснование вопросов проектирования и строительства инфраструктурных объектов на судоходных реках заключается в необходимости оценки влияния проектируемого сооружения на гидравлику речного потока в процессе строительства и на момент его завершения, а также в составлении прогноза изменения характеристик речного потока и русловых переформирований на долгосрочный период его эксплуатации. При кардинальном улучшении судоходных условий и содержании судовых ходов на реках первая задача решается достаточно надежно в результате проведения исследований на пространственных гидравлических моделях [1], а также при выполнении гидравлических расчетов по апробированным на практике методикам.

При составлении прогнозов русловых деформаций в реках на перспективу выполняется анализ руслового процесса в соответствии с рекомендациями, учитывающими гидроморфологический режим судоходных рек [2], [3], геоморфологические типы формирования русел и их морфодинамику [4]–[6]. При численном моделировании русловых переформирований и составлении русловых прогнозов в реках используются теоретические основы динамики русловых потоков [7], [8], результаты гидравлических и гидроморфологических исследований, а также современный аппарат математического моделирования [9]–[11]. На зарегулированных участках рек основные затруднения для судоходства проявляются, как правило, вследствие развития эрозионных процессов в нижних бьефах гидроузлов, не имеющих подпора со стороны нижнего бьефа. В границах Единой глубоководной системы европейской части РФ в настоящее время не обеспечиваются проходные судоходные глубины на реке Волге в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла [12], на участке реки Камы ниже Чайковского шлюза, на реке Дон в нижнем бьефе Кочетовского гидроузла, а также на реке Волге ниже Волгоградского гидроузла. На сибирских реках аналогичные проблемы проявились в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла, на реке Обь и на других объектах. Подобные затруднения для судоходства встречаются повсеместно, в том числе на водных путях Западной Европы [13], [14].

Исследования гидравлических характеристик речного потока в нижних бьефах гидроузлов стали проводиться в первой половине XX века одновременно с началом активного гидротехнического строительства. В монографиях [15]–[17], посвященных изучению неустойчивого движения воды в реках, приведены сведения о том, что при прохождении волны попуска в нижнем бьефе гидроузла нарушается однозначная связь между расходами и уровнями воды. По мере своего

удаления от створа гидроузла вниз по течению реки волна попуска расплывается, в результате чего амплитуды изменения величины 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 значительные изменения в кинематике потока наблюдаются в непосредственной близости от створа гидроузла.

Проведенные исследования [18]–[22] позволили в целом описать особенности гидравлики потока при изменяющемся во времени расходе воды. Было установлено, что при неустановившемся движении воды две переменные потока (уровень и расход воды) различны для восходящей и нисходящей части попусковой волны. Также было установлено, что пики переменных характеристик потока не совпадают и распределены по времени в следующем порядке: уклон свободной поверхности воды, средняя скорость в поперечном сечении, расход воды и уровень воды. Каких-либо определенных данных о динамике грядового рельефа в условиях неустановившегося движения воды в этих работах не приводится.

При подготовке настоящей работы были выполнены численные эксперименты по оценке гидравлических характеристик речного потока и параметров транспорта наносов в нижних бьефах ряда гидроузлов на крупных судоходных реках [23]–[25] на основе данных почасовых наблюдений за сбросными расходами и уровнями воды. Полученные результаты позволили изучить особенности движения наносов при неустановившемся течении воды и получить определенные рекомендации для установления граничных условий при моделировании русловых переформирований. Численные эксперименты показали, что при суточном и недельном регулировании речного стока транспорт наносов активизируется в моменты прохождения волны сбросного попуска воды из верхнего бьефа гидроузла. При этом основные параметры транспорта наносов: скорость перемещения гряд и расход наносов, возрастают по сравнению со стационарным течением воды. Определяющим фактором русловых переформирований в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками воды.

В естественных русловых потоках с подвижным дном характеристики грядового рельефа дна: размеры гряд и скорость их перемещения, определяются скоростью течения воды и глубиной потока — от крупности донных частиц размеры гряд зависят слабо. Результаты численных экспериментов, выполненных для трех гидроузлов [23]–[25], 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 при равных значениях среднесуточных расходов воды за расчетный период времени.

Полученные результаты необходимо проверить в ходе экспериментальных исследований. Для изучения гидравлических характеристик потока и параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды в рамках настоящей работы выполнен анализ имеющихся на сегодняшний день экспериментальных данных, а также проведен новый цикл экспериментов в гидравлическом лотке с песчаным руслом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Экспериментальные исследования движения наносов. Обширное исследование параметров транспорта наносов при неустановившемся движении воды было проведено группой авторов в работе [21]. Эксперименты проводились в 22-метровом гидравлическом лотке шириной 0,75 м. Переменный расход контролировался программируемым насосом с частотным инвертором, способным производить плавный непрерывный гидрограф любой формы. Продолжительность одного цикла эксперимента, включая фазу подъема и спада уровней воды составляла 4–6 ч. Величина подаваемого расхода изменялась до 100 л/с. Данное исследование проводилось для изучения процесса развития интенсивности эрозии дна в верховой части гидравлического лотка при изменяющимся во времени расходе воды. Нестационарность потока оценивалась с использованием коэффициентов, рекомендованных в работе [18]. Полученные результаты демонстрируют, что величина

расхода наносов в лотке в значительной степени связана с интенсивностью изменения сбросного расхода воды. В данной работе был зафиксирован эффект образования гистерезиса наносов при меняющемся во времени расходе воды. В разных экспериментах максимум расхода наносов наблюдался как на пике попуска воды, так и с опережением или запаздыванием относительно момента его наступления.

В работе [26] приведены 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 попуска треугольного вида и трапецеидального вида. В качестве материала в лотке применялся гравий средней крупности диаметром 4,8 мм, формирования гряд в экспериментах не происходило. Полученные данные показали, 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 воды. В работе [27] выполнено аналогичное исследование для бимодального грунта — смеси частиц песка и гравия в лабораторном лотке. В экспериментах использовались пять различных по продолжительности сбросных треугольных гидрографов стока продолжительностью 250–600 с. Согласно полученным в этой работе данным на разных фазах гидрографа изменялось соотношение между объемами песка и гравия в транспортируемом материале. Процент мелкозернистости на плато кривой распределения бимодальных отложений по размерам имел более высокие значения на начальной и конечной фазах гидрографа.

Коэффициент нестационарности неустановившегося движения воды учитывался в соответствии с рекомендациями [18], [28]. В реальных условиях при суточном регулировании стока обычно имеют место трапецеидальный вид сбросного расхода, в котором фаза подъема занимает относительно непродолжительное время [23]–[25]. Причем анализируя диапазон изменения скорости течения воды, следует полагать, что транспорт наносов в данном случае будет осуществляться эпизодически, исключительно в моменты прохождения волны сбросного попуска воды.

Вопрос практической значимости заключается в численной оценке величины расхода наносов при неустановившемся движении воды в нижнем бьефе гидроузла. В работах [23]–[25] численные эксперименты выполнялись с использованием двух апробированных расчетных формул. Данные эксперименты показали значительное увеличение величины расхода наносов при прохождении волны попуска в нижнем бьефе по сравнению со стационарным движением воды.

Расчетная формула (1), полученная в работе [2], впоследствии уточнялась в работах [29], [30] по данным измерений параметров грядового рельефа, выполненных 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}). Данная расчетная формула записывается в виде

$$q_s / HV = 0,0014(V / \sqrt{gH})^{3,11}. \quad (1)$$

Приведем формулу, полученную К. В. Гришаниным [31] по данным о деформациях русла и элементах движения гряд на нескольких участках больших равнинных рек России:

$$q_s = 0,015(V / V_{нр})^3 d(V - V_{нр}). \quad (2)$$

Основная разница в структуре этих формул заключается в том, что в формуле К. В. Гришанина содержится сомножитель, в котором вычисляется разность между средней V и неразмывающей $V_{нр}$ скоростью течения воды. На данном этапе работы необходимо проверить точность результатов численных экспериментов по материалам дополнительных исследований в гидравлическом лотке.

Экспериментальные исследования в гидравлическом лотке. 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 песча-

ным дном. Исследования проводились в малом гидравлическом лотке на Главной экспериментальной базе Государственного гидрологического института с мелким песком крупностью 0,1–0,3 мм. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 1. Основные технические характеристики гидравлического лотка приведены в работе [1].



Рис. 1. Общий вид гидравлического лотка
 Fig. 1. General view of the hydraulic flume

Для выбора режимов моделирования на подготовительном этапе работы всего было проведено семь циклов экспериментов при установившемся расходе воды в диапазоне значений от 2,9–6,0 л/с. В каждом цикле исследований на дне лотка формировался устойчивый грядовый рельеф дна с глубиной потока в диапазоне значений 5,2–8,8 см, величина которой устанавливалась в лотке в зависимости от подаваемого расхода воды. В ходе проведения каждого циклов 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. На основе параметров 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 трех циклах экспериментов при трапецидальном гидрографе попуска воды. Основные результаты выполненных исследований приведены в таблице (с. 186).

Методика обработки результатов измерений параметров донных гряд. При определении расхода наносов по параметрам донных гряд предполагается [7], что малые русловые формы (гряды) находятся в равновесии с установившимся русловым потоком, а форма гряд остается неизменной при перемещении их вниз по течению. В этом случае на основе классического уравнения деформации выводится уравнение, определяющее элементарный расход донных наносов в виде

$$q_s = (1 - \varepsilon) C_r \frac{\omega_r}{l_r} = (1 - \varepsilon) \sigma C_r h_r, \quad (3)$$

где ε — коэффициент пористости донных отложений;

C_r — скорость перемещения гряды;

ω_r — площадь продольного сечения гряды;

l_r — длина гряды;

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

h_r — высота гряды.

По данным измерений гряд в реальных условиях как на реках, так и в гидравлических лотках параметры гряд (высота и длина) существенно варьируют по своей величине. В этой связи для повышения качества и надежности результатов обработки данных измерений размеров гряд эхолотом в работе применялась специальная методика [32].

Результаты экспериментов в гидравлическом лотке

№ п/п.	Параметр	Номер эксперимента											
		при установленном режиме течения воды					при неустановившемся режиме течения воды						
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10		
1	Расход воды в лотке, л/с	2,9	3,5	4,4	6,0	5,7	1,8-5,3	1,6-5,1	3,3	3,3	1,8-5,3	1,6-5,1	1,8-5,0
2	Глубина над гребнем гряды ¹ , см	4,5	5,5	5,7	6,6	8,0	5,5-7,5	4,7-7,3	6,0	6,0	5,5-7,5	4,7-7,3	5,3-7,2
3	Средняя глубина в лотке ² , см	5,2	6,3	6,4	7,3	8,8	6,1-8,1	5,4-8,0	6,6	6,6	6,1-8,1	5,4-8,0	6,0-7,9
4	Скорость над гребнем гряды ¹ , см/с	28,2	22,9	33,2	36,7	29,0	13,3-29,3	13,7-32,9	27,4	26,4	13,3-29,3	13,7-32,9	19,3-30,2
5	Средняя скорость в лотке ² , см/с	26,6	26,5	32,7	39,1	30,8	14,1-31,2	14,1-30,4	23,8	23,8	14,1-31,2	14,1-30,4	14,3-30,0
6	Средняя длина гряд $L_{г}$, см	14,72	15,57	12,09	13,28	16,62	11,71	13,18	12,21	13,86	11,71	13,18	11,84
7	Средняя высота гряд $h_{г}$, см	1,38	1,62	1,34	1,48	1,60	1,20	1,30	1,12	1,26	1,20	1,30	1,25
8	Средняя скорость гряд $C_{г}$, см/мин	0,15	0,11	0,18	0,33	0,08	0,13	0,058	0,03	0,05	0,13	0,058	0,113
9	Расход донных наносов $Q_{д}$, см ³ /мин	3,00	2,52	3,42	6,51	1,81	2,16	1,07	0,47	0,84	2,16	1,07	2,00
10	Вынос (ловушка), см ³ /мин	3,05	2,16	3,64	6,92	2,06	0,83	1,18	0,63	0,75	0,83	1,18	1,30
11	Число Фруда ¹ (безразмерная величина)	0,42	0,31	0,44	0,46	0,33	0,18-0,34	0,20-0,39	0,36	0,34	0,18-0,34	0,20-0,39	0,19-0,44
12	Число Фруда ² (безразмерная величина)	0,37	0,34	0,41	0,46	0,33	0,18-0,35	0,19-0,34	0,30	0,30	0,18-0,35	0,19-0,34	0,19-0,34
13	Уклон свободной поверхности, ‰	1,33	1,0	1,33	2,0	1,33	1,0-2,0	1,0-2,0	1,50	1,50	1,0-2,0	1,0-2,0	1,0-2,0
14	Продолжительность эксперимента ³ , мин	312	217	170	143	83	180	140	135	520	180	140	158
15	Расход наносов по формуле (1), см ³ /мин	11,31	10,01	23,54	45,62	15,42	8,44	7,81	6,27	6,27	8,44	7,81	10,64
16	Расход наносов по формуле (2), см ³ /мин	4,36	3,22	13,76	33,38	6,58	3,66	3,29	0,87	0,87	3,66	3,29	4,85

Примечания:

¹ Параметры течения, измеренные / рассчитанные на вертикали над гребнем гряды в потоке.

² Средние параметры течения, измеренные / рассчитанные для живого сечения лотка.

³ Без учета времени формирования рельефа.

В соответствии с этими рекомендациями при статистической обработке грядового рельефа дна из профиля исключаются незначимые выступы. Мерой оценки значимости принята величина, кратная среднему квадратичному отклонению отметок промерных точек на профиле. Эта характеристика не включает общий тренд и очертания крупных форм на дне потока, а показывает лишь случайный разброс смежных точек на промерном профиле. Величина отклонения определяется методом последовательных разностей, а все пики на профиле размером менее выбранного значения фильтра выбраковываются.

При обработке рельефа дна фильтр принимался равным 0,2 см. Средняя длина и высота гряд находятся как среднеарифметические значения из всех полученных геометрических характеристик гряд. Коэффициент полноты профиля гряды находился для каждого продольного профиля отдельно делением площади всех зафиксированных на профиле гряд, на площадь активного слоя, в границах которого происходит движение русловой формы в момент измерений. Ввиду того, что полученный грядовой рельеф состоит преимущественно из трехмерных гряд, при вычислении расхода наносов по формуле (3), в соответствии с рекомендациями В. И. Замышляева и Б. Ф. Снищенко, приведенными в работе [33], использовался поправочный коэффициент, равный 1,35.

Оценку среднего смещения донных форм на продольном створе между разновременными промерами предлагается выполнять по характеристикам пространственно-временной корреляции массивов полученных промерных данных. Значения корреляционной функции вычисляются по данным двух последовательных промеров глубин эхолотом. На полученном таким образом графике значение первого максимума корреляционной функции равно среднему смещению донных форм по профилю за период времени между измерениями, что позволяет определить среднюю скорость перемещения донных гряд для вычисления расхода наносов. В ходе проведения экспериментов в гидравлическом лотке был получен большой объем новых экспериментальных данных, иллюстрирующих кинематику потока и параметры транспорта наносов при установившемся и неустойчивом движении воды.

Результаты (Results)

Скоростной режим потока при неустойчивом движении воды. На рис. 2, а для иллюстрации уровня и скоростного режимов потока при неустойчивом движении воды в гидравлическом лотке приведены хронологические графики изменения расходов и уровней воды и график изменения средней по живому сечению скорости течения воды. Там же дополнительно показан график изменения величины неразмыывающей скорости течения (по В. Н. Гончарову, 1938). Полученные результаты показывают, что скорости течения, превышающие критические значения (см. рис. 2, б), наблюдаются исключительно в моменты прохождения попусков воды.

В процессе выполнения работы был изучен характер связи между расходами и уровнями воды в гидравлическом лотке. Полученные данные (рис. 3, а) показывают, что при неустойчивом режиме сбросных расходов воды в лотке однозначность связи между расходами и уровнями воды нарушается. Аналогичным образом нарушается однозначность связи между скоростью течения воды и уровнями воды в лотке, а также однозначность связи числа Фруда с уровнями воды. Минимальное значение скорости течения воды в живом сечении (около 12–13 см/с) соответствует моменту окончания сбросного попуска воды. Далее, несмотря на продолжающееся понижение уровней воды в лотке, скорость течения начинает возрастать с небольшой интенсивностью при минимальном сбросном расходе воды до момента достижения самого низкого уровня воды. С этого момента начинается новый сбросной попуск воды и скорость течения воды интенсивно возрастает до своего максимального значения (около 32–34 см/с) при уровне воды 11,2–11,6 см. Своего максимума сбросной расход воды достигает немного позже, при уровне воды 12,7 см.

Общий ход графика изменения числа Фруда с изменением уровня воды (рис. 3, б) соответствует аналогичному графику изменения скорости течения воды. Таким образом, учет глубины потока в составе числа Фруда в связи с небольшим изменением уровня воды, а, соответственно, и глубины потока, при прохождении сбросного расхода попуска оказывается несущественным и не сказывается на очертании графика.

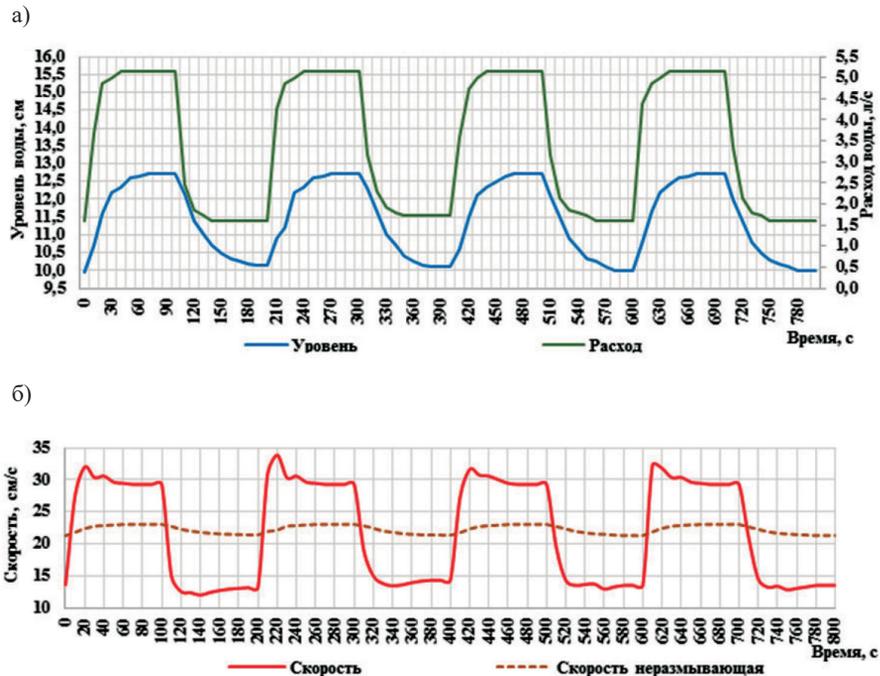


Рис. 2. Хронологические графики изменения расходов и уровней воды (а) и средней по живому сечению скорости течения воды (б)

Fig. 2. Chronological graphs of changes in flow rates and water levels (a) and average over the live section water flow velocity (b)

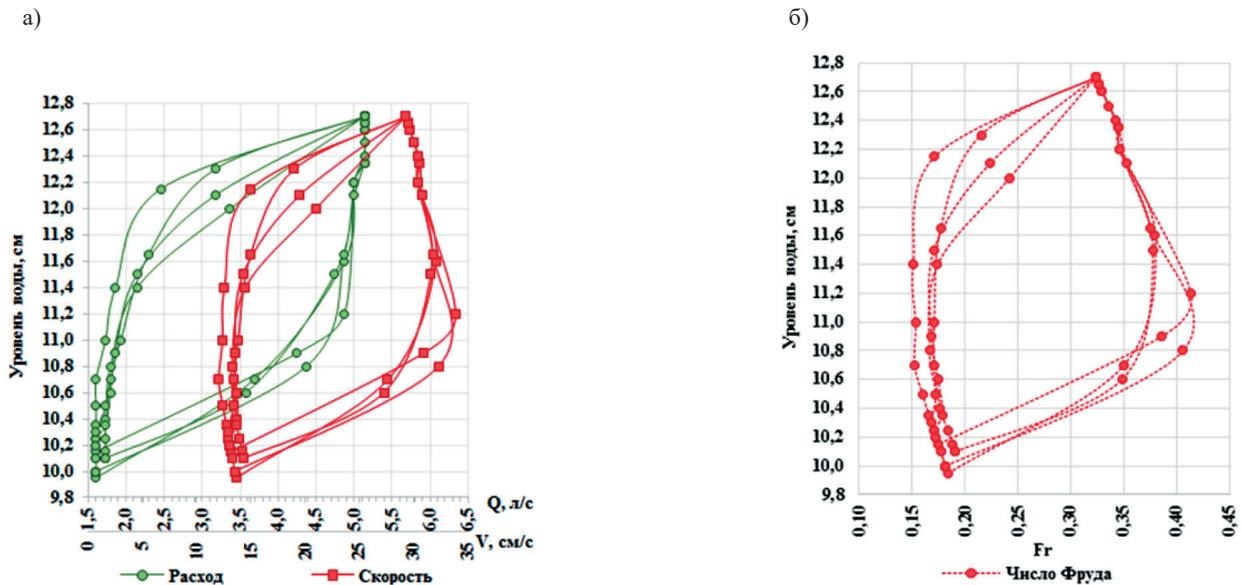


Рис. 3. Графики зависимости расхода воды, скорости течения (а) и числа Фруда от уровня воды (б)

Fig. 3. Graphs of the dependence of water flow, flow speed (a) and the Froude number per water level (b)

Для анализа условий транспорта наносов на рис. 4 приведен совмещенный хронологический график изменения поверхностной и средней по живому сечению скорости течения воды при прохождении волны пускa в гидравлическом лотке. Дополнительно на этом графике показаны результаты измерения продольной и вертикальной составляющих скорости течения в точке 3 см от гребня гряды на дне, а также результаты расчета неразмывающей скорости течения.

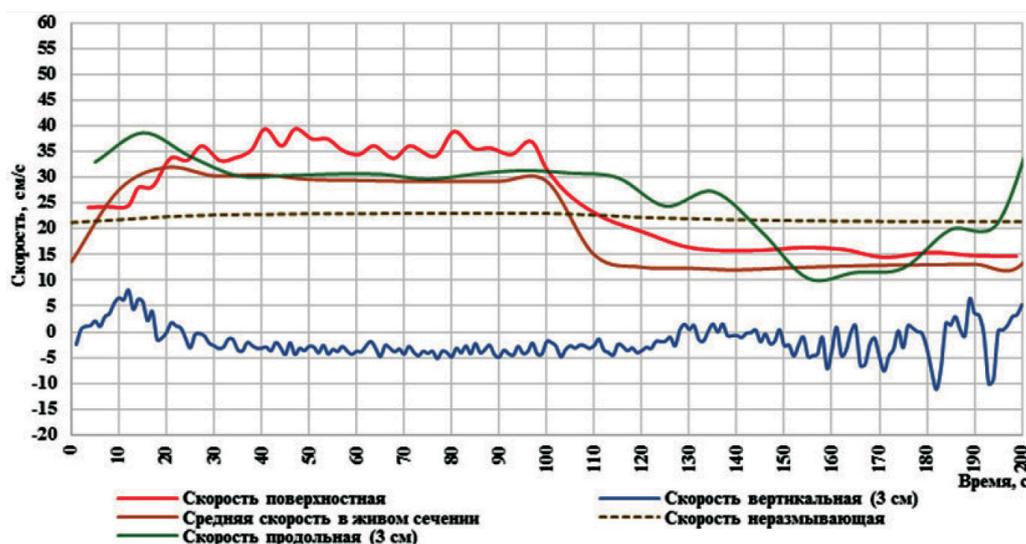


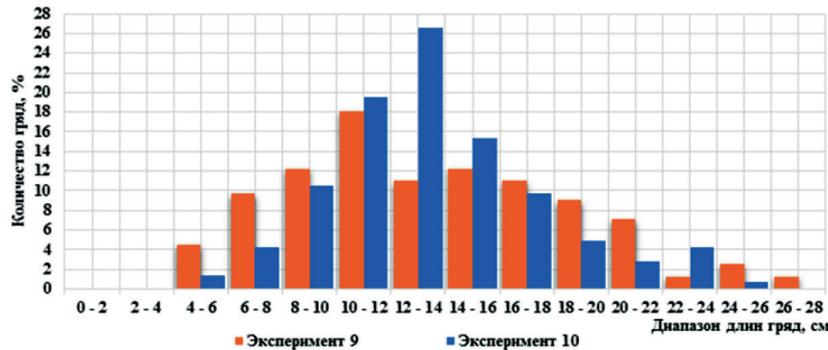
Рис. 4. Хронологические графики изменения скоростей течения воды при прохождении волны попуска в лотке
 Fig. 4. Chronological graphs of changes in water flow velocities during the release wave in the flume

Параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды. Результаты выполненных измерений показали, что при прохождении волны попуска в лотке формируется сложная кинематическая структура потока. При этом максимум вертикальной составляющей скорости течения воды наступает примерно на 10-й – 12-й секунде с момента начала попуска воды. Затем примерно на 15-й секунде наблюдается максимум продольной скорости течения воды на вертикали. Максимум средней по живому сечению скорости наступает примерно на 20-й секунде с момента начала попуска. Самым последним по времени, примерно на 30-й – 40-й секунде с начала попуска воды, в потоке отмечается максимум поверхностной скорости течения воды. Отсюда следует, что в начальный период прохождения волны попуска воды в лотке следует ожидать интенсивного перемещения наносов на дне потока. 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 [7], 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, полученных при установившемся массовом движении наносов. До конца попуска воды скорости течения воды в лотке остаются в среднем на 30 % больше соответствующих значений скоростей течения воды при установившемся движении. Полагая зависимость расхода наносов, пропорциональной скорости течения воды в 3-й – 4-й степени, следует ожидать, что в этот период его величина будет в 2,5–2,7 раза больше, чем при установившемся движении воды. И, наконец, в момент окончания попуска воды скоростной режим в лотке изменяется. Наиболее быстро, в течение первых десяти секунд, уменьшается средняя по живому сечению скорость течения воды. Поверхностная скорость снижается примерно в течение 30 с после уменьшения сбросного расхода воды. Продолжительнее всего по времени (примерно до 50 с) происходит гашение средней на вертикали скорости течения. В течение этого периода следует ожидать продолжение активного перемещения наносов на дне потока. Таким образом, все три аргумента могут явиться причиной увеличения расхода наносов при неустановившемся движении воды по сравнению с установившимся режимом течения. Эти данные подтверждаются ранее выполненными численными экспериментами, а также результатами настоящих исследований в гидравлическом лотке.

Статистический анализ параметров донных гряд позволил оценить характер распределения длин и высот гряд при установившемся и неустановившемся режимах течения воды в гидравлическом лотке. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты обработки данных, полученных в экспериментах № 9 и № 10. Общее количество гряд, зафиксированных в эксперименте № 9, составило 154, в эксперименте № 10 — 141.

а)



б)

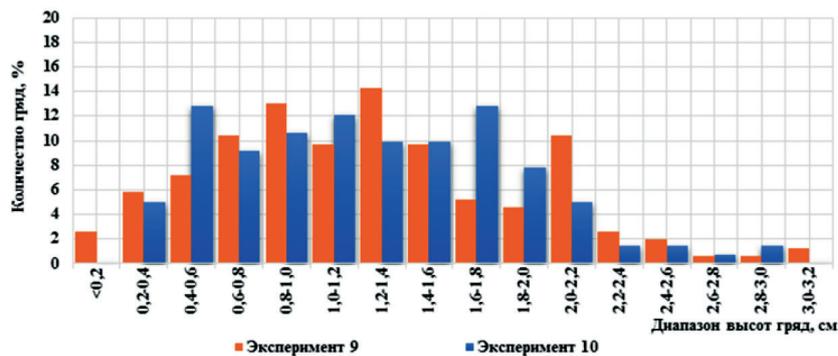


Рис. 5. Совмещенные графики распределения донных гряд по диапазонам длин (а) и высот (б) при установившемся и неустановившемся движении воды: эксперимент № 9 — установившееся движение $Q = 3,3$ л/с, $H = 6,0$ см; эксперимент № 10 — неустановившееся движение $Q = 1,6-4,9$ л/с, $H = 4,7-7,3$ см

Fig. 5. Combined graphs of the dunes distribution over the ranges of lengths (a) and heights (b) under steady and unsteady water movement: Experiment No. 9 — steady flow $Q = 3,3$ l/s, $H = 6,0$ cm; Experiment No. 10 — unsteady flow $Q = 1,6-4,9$ l/s, $H = 4,7-7,3$ cm

Полученные результаты показали, что при установившемся движении воды (рис. 5, а) примерно 80 % значений длин гряд расположены в диапазоне 8–20 см, тогда как при неустановившемся движении тот же процент гряд сконцентрирован в диапазоне значений 8–16 см. В эксперименте № 10 наблюдается отчетливо выраженный экстремум в диапазоне значений длин гряд 12–14 см. При установившемся движении воды максимум длин гряд отмечается в таком же диапазоне значений, однако он выражен не так сильно. Средние длины гряд в обоих экспериментах оказались близкими по величине. Анализируя графики распределения количества гряд по высотам (см. рис. 5, б), можно заметить, что в обоих экспериментах примерно 90 % гряд сконцентрированы в примерно одинаковых диапазонах значений: 0,4–2,4 см в эксперименте № 9 и 0,4–2,2 см в эксперименте № 10. При установившемся движении визуально выделяется локальный максимум в диапазоне высот 2,0–2,2 см.

Опыт обработки грядового рельефа дна в проведенных экспериментах показывает, что при наличии большего количества исходных данных такие локальные максимумы сглаживаются. Таким образом, при исключении этого максимума высоты гряд распределяются в диапазоне 0,4–1,6 см.

Кроме того, можно отметить более плавное распределение высот в эксперименте № 10, что свидетельствует об относительно более широком диапазоне возможных высот гряд при неустановившемся режиме.

Средние значения высоты гряд в обоих экспериментах оказались практически одинаковыми. При этом коэффициент полноты профиля гряды, вычисляемый для каждого продольного профиля во всех экспериментах, находился в узком диапазоне значений 0,50–0,53 вне зависимости от режима подачи сбросного расхода воды.

На рис. 6 показаны совмещенные графики корреляционных функций скорости перемещения донных гряд на центральном продольнике, полученные в результате статистической обработки параметров грядового рельефа при установившемся и неустановившемся движении воды в гидравлическом лотке.

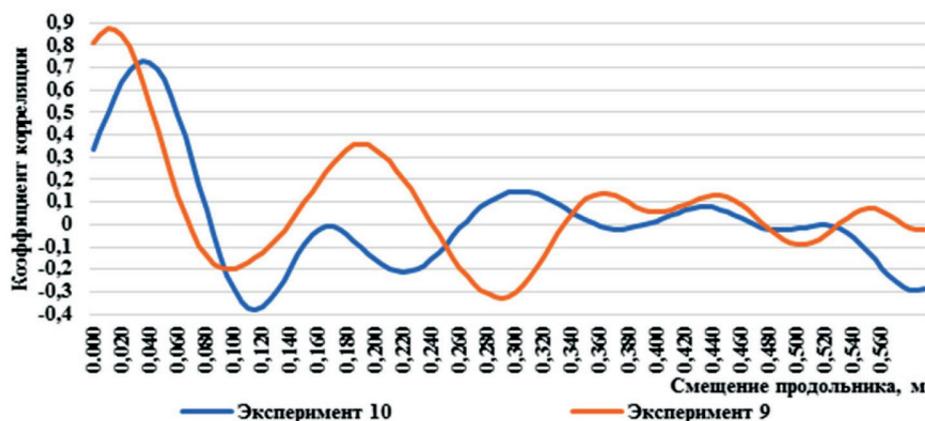


Рис. 6. Совмещенные графики корреляционной функции по данным измерения смещения донных гряд при установившемся и неустановившемся движении воды
Fig. 6. Combined graphs of the correlation function based on the measurement data of the antidunes displacement during steady and unsteady water flow

Как видно на графике, максимальное значение коэффициента корреляции в эксперименте № 9 наблюдается в точке 0,015 м, тогда как в эксперименте № 10 — в точке 0,035 м. Временной интервал между измерениями в обоих случаях составлял 30 мин. Таким образом, скорость гряд в эксперименте № 9 составляет 0,05 см/мин, в эксперименте № 10 — 0,11 см/мин. Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод о том, что основной причиной увеличения расхода донных наносов при неустановившемся режиме течения является возрастание скорости перемещения гряд в моменты прохождения сбросных попусков воды.

Заключение (Conclusion)

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. Определяющим фактором в данном случае является чередование во времени фазы интенсивного перемещения наносов в моменты прохождения попусковой волны с фазами покоя частиц речного аллювия между попусками. Для апробации результатов численного моделирования в настоящей работе были проведены эксперименты в гидравлическом лотке с подвижным дном при установившемся и неустановившемся режимах движения воды. Выполненные эксперименты позволили установить, что длины и высоты донных гряд слабо зависят от режима подачи сбросного расхода воды в лотке. При этом характер распределения параметров гряд по величине различается.

Результаты статистической обработки материалов измерений параметров грядового рельефа показали, что при неустановившемся движении воды скорость перемещения донных гряд возрастает по сравнению со стационарным течением воды. При этом осредненная за период прохождения попусковой волны величина расхода наносов при 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. Таким образом, экспериментально установлено, что основной причиной интенсификации транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов следует считать увеличение скорости перемещения донных гряд.

Сопоставление рассчитанных и измеренных значений расхода наносов показало, что точность вычисления параметров твердого стока по используемым в работе расчетным формулам оказалась низкой. Формула (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.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Сنيщенко. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
3. 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.
4. 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.
5. Чалов Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. — М.: КРАСАНД, 2011. — Т. 2: Морфодинамика речных русел. — 960 с.
6. 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.
7. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
8. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 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. Garibin P. Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky hydraulic unit on the Volga River / P. Garibin, G. Gladkov, K. Morgunov, M. Kolosov // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. DOI: 10.1063/5.0103780.

13. *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.

14. *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. — P. 141. DOI: 10.3390/w15010141.

15. 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.: Гидрометеиздат, 1963. — 252 с.

16. *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.

17. *Грушевский М. С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах / *М. С. Грушевский*. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 288 с.

18. *Graf W.* Unsteady flow and its effect on sediment transport / *W. Graf, L. Suszka* // *Proceedings, 21st IAHR Congress*. — Melbourne, Australia, 1985. — Pp. 540–544.

19. *Graf W. H.* Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry / *W. H. Graf*. — Wiley, 1998. — 692 p.

20. *Mrokowska M. M.* Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments / *M. M. Mrokowska, P. M. Rowiński* // *Water*. — 2019. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 907. DOI: 10.3390/w11050907.

21. *Wang L.* Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs / *L. Wang, A. Cuthbertson, G. Pender, D. Zhong* // *Water Resources Research*. — 2019. — Vol. 55. — Is. 7. — Pp. 5431–5452. DOI: 10.1029/2018WR024413.

22. *Muste M.* Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows / *M. Muste, K. Lee, D. Kim, C. Bacotiu, M. R. Oliveros, Z. Cheng, F. Quintero* // *Journal of hydraulic research*. — 2020. — Vol. 58. — Is. 6. — Pp. 867–887. DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742.

23. *Гладков Г. Л.* Гидравлика потока и параметры транспорта наносов при неустановившемся движении воды в нижних бьефах гидроузлов на судоходных реках / *Г. Л. Гладков, В. М. Католиков, П. С. Ржаковская* // *Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции*. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 24–43.

24. *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.

25. *Gladkov G.* Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River / *G. Gladkov, V. Katolnikov, P. Belyakov, P. Rzhakovskaya, V. Zamyshlyayev* // *International Journal of Sediment Research*. — 2024. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2024.01.004. [In Press, Corrected Proof].

26. *Bombar G.* Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows / *G. Bombar, Ş. Elçi, G. Tayfur, M. Ş. Güney, A. Bor* // *Journal of Hydraulic Engineering*. — 2011. — Vol. 137. — No. 10. — Pp. 1276–1282. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000041.

27. *Bombar G.* Effects of Flow Unsteadiness on the Transport of Bimodal Bed Material / *G. Bombar, A. O. Aksoy, M. Ş. Güney* // *Turkish Journal of Civil Engineering*. — 2023. — Vol. 34. — Is. 6. — Pp. 99–128. DOI: 10.18400/tjce.1226516.

28. *Lee K. T.* Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions / *K. T. Lee, Y. L. Liu, K. H. Cheng* // *Hydrological processes*. — 2004. — Vol. 18. — Is. 13. — Pp. 2439–2454. DOI: 10.1002/hyp.1473.

29. *Petrovskaya O. A.* On the relationship of bed load transport with the Froude number / *O. A. Petrovskaya, G. L. Gladkov* // *Water Resources*. — 2022. — Vol. 49. — Is. 1. — Pp. 88–97. DOI: 10.1134/S0097807822010134.

30. *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.

31. *Гришанин К. В.* Теория руслового процесса / *К. В. Гришанин*. — М.: Транспорт, 1972. — 216 с.

32. Костюченко А. А. Метод выполнения и обработки измерений для определения параметров донных гряд / А. А. Костюченко, Р. В. Заварзин // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 151–164.

33. Заварзин Р. В. Измерения расхода донных наносов, перемещающихся в грядовой форме: экспериментальное исследование косвенных методов измерений / Р. В. Заварзин, О. А. Петровская // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 213–231.

REFERENCES

1. Klaven, A. B., and Z. D. Kopaliani. *Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsesssa*. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011.

2. Kondrat'ev, N. E., I. V. Popov, and B. F. Snishchenko. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesssa*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.

3. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2022.

4. 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.

5. Chalov, R. S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika*. Vol. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND, 2011.

6. Chalov, R. S., and S. R. Chalov. "Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding." *Water Resources* 47.3 (2020): 374–386.

7. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.

8. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.

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. Garibin, Pavel, Gennady Gladkov, Konstantin Morgunov, and Michael Kolosov. "Innovative proposals for providing navigable depths in the downstream of the Gorodetsky hydraulic unit on the Volga River." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0103780.

13. Babi'nski, Zygmunt, and Michal 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

14. 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.

15. Kondrat'eva, N. E., and V. A. Uryvaeva. *Issledovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody na reke Sviri v zimnikh i letnikh usloviyakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1963.

16. 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.

17. Grushevskii, M. S. *Neustanovivsheesya dvizhenie vody v rekakh i kanalakh*. L.: Gidrometeoizdat, 1982.

18. Graf, W., and L. Suszka. "Unsteady flow and its effect on sediment transport." *Proceedings, 21st IAHR Congress*. Melbourne, Australia, 1985. 540–544.

19. Graf, W. H. *Fluvial hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry*. Wiley, 1998.

20. Mrokowska, Magdalena M., and Paweł M. Rowiński. "Impact of unsteady flow events on bedload transport: A review of laboratory experiments." *Water* 11.5 (2019): 907. DOI: 10.3390/w11050907.

21. Wang, Le, Alan Cuthbertson, Gareth Pender, and Deyu Zhong. "Bed load sediment transport and morphological evolution in a degrading uniform sediment channel under unsteady flow hydrographs." *Water Resources Research* 55.7 (2019): 5431–5452. DOI: 10.1029/2018WR024413.
22. Muste, Marian, Kyutae Lee, Dongsu Kim, Ciprian Bacotiu, Marcela Rojas Oliveros, Zhengyang Cheng, and Felipe Quintero. "Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows." *Journal of hydraulic research* 58.6 (2020): 867–887. DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742.
23. Gladkov, G.L., V. M. Katolikov, and P. S. Rzhakovskaya. "Flow hydraulics and sediment transport parameters in case of unsteady water movement in the lower reaches of waterworks on navigable rivers." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 24–43.
24. 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.
25. Gladkov, Gennadii, Viktor Katolikov, Pakhom Belyakov, Polina Rzhakovskaya, and Vitaly Zamyshlyayev. "Hydraulics and bedload in unsteady flow: Example of the Volga River." *International Journal of Sediment Research* (2024). DOI: 10.1016/j.ijsrc.2024.01.004. [In Press, Corrected Proof].
26. Bombar, Gökçen, Şebnem Elçi, Gokmen Tayfur, M. Şükrü Güney, and Aslı Bor. "Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 137.10 (2011): 1276–1282. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000041.
27. Bombar, Gökçen, Aysegül Özgenc Aksoy, and Mehmet Şükrü Güney. "Effects of Flow Unsteadiness on the Transport of Bimodal Bed Material." *Turkish Journal of Civil Engineering* 34.6 (2023). 99–128. DOI: 10.18400/tjce.1226516.
28. Lee, Kwan Tun, Yi-Liang Liu, and Kai-Hung Cheng. "Experimental investigation of bedload transport processes under unsteady flow conditions." *Hydrological processes* 18.13 (2004): 2439–2454. DOI: 10.1002/hyp.1473.
29. Petrovskaya, O. A., and G. L. Gladkov. "On the relationship of bed load transport with the Froude number." *Water Resources* 49.1 (2022): 88–97. DOI: 10.1134/S0097807822010134.
30. Gladkov, Gennadii L. and Pakhom 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.
31. Grishanin, K. V. *Teoriya ruslovyh protsessov*. M.: Transport, 1972.
32. Kostyuchenko, A. A., and R. V. Zavarzin. "Method of performing and processing measurements to determine the parameters of bed forms." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 151–164.
33. Zavarzin, R. V., and O. A. Petrovskaya. "Measurements of bed load transport taking place in the form of dunes: an experimental study of indirect measurement methods." *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putei*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 213–231.

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
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

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
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@mail.ru

Заварзин Руслан Витальевич —
аспирант, младший научный сотрудник
Научный руководитель:

Католиков Виктор Михайлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
ФГБУ «Государственный гидрологический
институт»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23
e-mail: zavarzr@gmail.com

Zavarzin, Ruslan V. —
Postgraduate, junior researcher
Supervisor:

Katolikov, Viktor M —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
State Hydrological Institute
23 2nd line of Vasilyevsky Island,
St. Petersburg,
199004, Russian Federation
e-mail: zavarzr@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 21 марта 2024 г.
Received: March 21, 2024.*