

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986

## LABORATORY STUDIES OF THE SOIL EROSION AND ALLUVIUM PROCESSES IN THE AREA OF BRIDGE SUPPORTS

**K. P. Morgunov, Yu. K. Ivanovsky, V. G. Bogatyrev**

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

*The results of experimental studies of the process of bottom erosion during the construction of bridge supports under the protection of a sheet pile structure are presented. To protect the sheet piling box from the influence of ice floes during the period of ice drift, it is planned to install an ice-cutting protective device located upstream of the sheet piling box. In the process of conducting research, the principles of modeling the processes of river sediment transport taking into account the size of transported particles, non-erosive velocities and channel slopes are substantiated. Laboratory studies of the processes of forming erosion and alluvium are carried out for two cycles of parameters. At the same time, the influence of the ice-cutting device position relative to the sheet piling box on the amount of erosion and alluvium is studied. Experiments were carried out for various options of the ice cutter position relative to the sheet piling box; the ice cutter moved upstream along the axis of the tray with a step of 0.1 m (5 m for natural conditions). Based on measurements of bottom surface marks, two-dimensional erosion plans are constructed. For several options for the location of structures, the trajectories and directions of flow movement are determined by photographing the movement of surface floats, which makes it possible to create a grid of streamlines and determine the values of surface current velocities. An analysis of the velocity distribution over the surface and in the flow volume has shown that a horseshoe-shaped vortex is formed around the structure, with riffles and ridges appearing along its wings. A stagnation zone is established inside the “horseshoe”; in this zone the bottom remains relatively smooth. In the absence of an ice cutter, the main zones of soil erosion arise in the vicinity of the corners of the front face of the box, and alluviums form in the rear part of the structure. When installing an ice-cutting device in the shape of a triangle in front of the box, directed at an acute angle towards the oncoming flow, the erosion zones move to the vicinity of the corners lying at the base of the triangular ice cutter facing the box. The absolute values of erosion depth and alluvium height are reduced compared to the option without the ice cutter. When the ice cutter moves upstream relative to the box, a washout zone appears in the gap between the ice cutter and the box. The maximum values of erosion and alluvium occur in the absence of ice cutter and when placing the ice cutter at a distance of 200–300 mm from the box. The minimum values of erosion and alluvium are recorded when the ice cutter is placed close to the support box. With increasing flow rates and depths, the values of erosion and alluvium increase. Installing the ice-cutting device improves the hydraulic conditions of flow around the sheet piling box structure, which leads to a decrease in washout depths.*

*Keywords: bridge supports, ice cutting devices, alluviums and bottom erosions, laboratory hydraulic studies, bottom relief.*

### **For citation:**

Morgunov, Konstantin P., Yuri K. Ivanovsky, and Vladislav G. Bogatyrev. “Laboratory studies of the soil erosion and alluvium processes in the area of bridge supports.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 971–986. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986.

**УДК 627**

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗМЫВА И НАМЫВА ГРУНТА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ МОСТОВЫХ ОПОР

**К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, В. Г. Богатырёв**

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

*Представлены результаты экспериментальных исследований процесса размыва дна при строительстве мостовых опор под защитой шпунтовой конструкции и ледорезного устройства. Обоснованы принципы*

моделирования процессов переноса речных наносов с учетом размеров переносимых частиц. Выполнены лабораторные исследования процессов формирования размывов и намывов для двух циклов параметров. Выполнена оценка влияния на величину размывов и намывов положения ледорезного устройства относительно шпунтового короба — ледорез располагался на различных расстояниях от шпунтового короба с шагом 0,1 м (5 м для натуральных условий). Для нескольких вариантов расположения конструкций определены траектории и направления движения потока, что позволило составить сетку линий тока и определить значения поверхностных скоростей течения. Анализ распределения скоростей по поверхности и в объеме потока показал, что вокруг конструкции формируется подковообразный вихрь, вдоль крыльев которого на дне формируются рифели и гряды. Внутри «подковы» была установлена зона застоя с относительно гладким дном. При отсутствии ледореза основные зоны размыва грунта возникают в окрестности углов фронтальной грани короба, в тыловой части конструкции формируются намывы. При установке ледореза в форме треугольника, направленного острым углом навстречу набегающему потоку, зоны размывов перемещаются в окрестности углов основания ледореза, обращенных к коробу. При перемещении ледореза относительно короба вверх по потоку возникает зона намыва в промежутке между ледорезом и коробом. Максимальные значения размыва и намыва возникают при отсутствии ледореза и при его размещении на расстоянии 200–300 мм от короба. Минимальные значения размыва и намыва зафиксированы при размещении ледореза вплотную к коробу опоры. Установка ледорезного устройства улучшает гидравлические условия обтекания конструкции шпунтового короба, что приводит к уменьшению глубин размывов.

*Ключевые слова:* мостовые опоры, ледорезные устройства, намывы и размывы дна, лабораторные гидравлические исследования, рельеф дна.

**Для цитирования:**

Моргунов К. П. Лабораторные исследования процессов размыва и намыва грунта в районе размещения мостовых опор / К. П. Моргунов, Ю. К. Ивановский, В. Г. Богатырёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 971–986. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-971-986.

### Введение (Introduction)

Мостовые переходы через судоходные реки, как и другие сооружения, возводимые в руслах рек, оказывающие воздействие на гидравлику потока и условия перемещения наносов в русле, представляют собой определенное ограничение для судоходства [1], [2]. Возведение в русле реки мостовых опор приводит к изменению урванной и скоростной структуры потока, что может вызывать появление свальных течений и нежелательные деформации дна [3]. Известно, что в ходе строительства и эксплуатации мостовых переходов через водные преграды вблизи плохо обтекаемых тел (опор) под действием течения происходит размыв грунта [4], [5]. Методика расчета размывов у опор изложена в ряде нормативных и справочных документов<sup>1,2,3</sup>. Гидравлико-гидрологический расчет размывов у опор строящегося моста выполняется на этапе проектирования.

Работы по устройству мостовых опор, как правило, выполняются под защитой шпунтового короба в месте их расположения. С целью обеспечения работ в период ледохода для защиты шпунтового ограждения от повреждения и разрушения плывущими льдинами возможно устройство ледорезов, устанавливаемых выше по течению. Такие конструкции (шпунтовое водозащитное ограждение и ледорезная конструкция) вносят изменения в структуру потока и структуру образования размывов в районе расположения мостовых опор. Для определения характера и структуры размывов и намывов на дне в районе расположения шпунтового ограждения и ледорезной конструкции специалистами ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова в 2022 г. был выполнен цикл лабораторных гидравлических исследований, описание и результаты которых представлены в настоящей статье.

Были сформулированы следующие задачи экспериментальных гидравлических исследований:

– определение характера и размеров размывов и намывов дна в районе размещения шпунтовой конструкции при различных параметрах обтекающего потока;

<sup>1</sup> СП 32-102-95 «Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов». Изд. офиц. М.: Корпорация «Трансстрой», 1996.

<sup>2</sup> Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). М., 1992.

<sup>3</sup> Технические указания по расчету местного размыва у опор эксплуатируемых мостов / Утв. ЦП МПС России. М., 2001.

– определение влияния взаимного расположения ледореза и шпунтового ограждения на характер размывов и намывов на дне русла.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Процесс образования углублений размыва вблизи плохо обтекаемых тел обусловлен формированием и последующим развитием вихревых систем в основании обтекаемой конструкции вблизи ее сопряжения с дном и вихрей в следе обтекаемого тела [6], [7]. Независимо от формы мостовой опоры основным механизмом, вызывающим формирование и развитие размываемого углубления и оказывающим на него влияние, является *подковообразная вихревая система*, возникающая в основании опоры [8]–[10]. С приближением потока к обтекаемому телу формируется трехмерная картина течения (рис. 1).

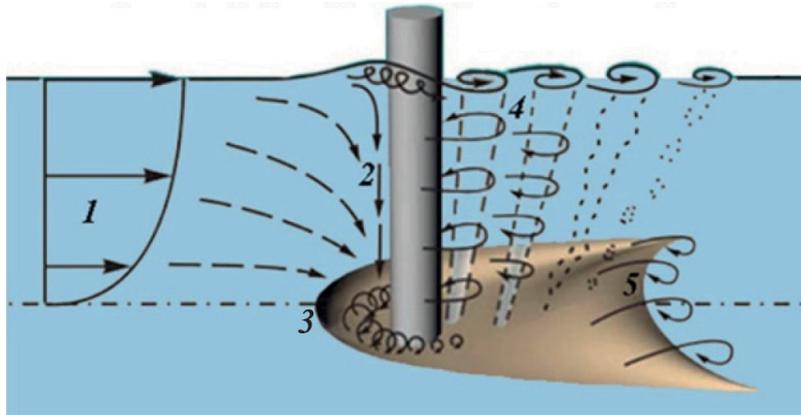


Рис. 1. Формирование размыва и намыва грунта вблизи опоры (авторская схема)

Набегающему на опору пограничному слою 1 приходится преодолевать значительный отрицательный градиент давления, возникающий вблизи фронтальной части опоры, что приводит к отрыву пограничного слоя от опоры. В передней (фронтальной) части опоры формируется направленное ко дну течение 2. У основания опоры возникает подковообразный вихрь 3. За опорой (в следе опоры) формируются вертикальные вихри 4, обусловленные отрывом потока от поверхности опоры (следные вихри). В результате взаимодействия отрывного и ниспадающего течений перед опорой, подковообразных и следных вихрей грунт перед опорой размывается, образуя позади нее намыв грунта 5 в виде дюн или рифелей.

Расположение, размер и интенсивность подковообразных вихрей существенным образом зависят от стадии их формирования и изменяются во времени. Структура подковообразной вихревой системы весьма существенно зависит от числа Рейнольдса:  $Re = \frac{vb}{\nu}$  (здесь  $\nu$  — скорость набегающего потока,  $b$  — характерный поперечный размер опоры,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости воды) и характеристик пограничного слоя, формируемого перед обтекаемой преградой.

Следует отметить, что при больших числах Рейнольдса ( $Re > 10\,000$ ) формируется устойчивый турбулентный режим обтекания опоры и характеристики подковообразной вихревой системы практически не зависят от числа Рейнольдса [11]. Очевидно, что на размываемой поверхности вблизи опоры частички грунта начинают перемещаться тогда, когда скорость потока, обусловленная вихревым движением, превышает критическую скорость переноса частичек (неразмывающую скорость). Существует несколько способов определения неразмывающих скоростей. Так, СП 32–102–95 для однородного несвязного грунта со средним диаметром частиц  $d$  (м) при глубине потока  $H$  (м) рекомендует определять неразмывающую скорость по формуле

$$v_{нр} = 1,15\sqrt{g(Hd)^{\frac{1}{4}}}; \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

В источнике [12] предлагается для определения неразмывающей скорости использовать эмпирическую формулу

$$v_{\text{нр}} = 6,19 H^{\frac{1}{6}} d_{50}^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где  $d_{50}$  — эффективный диаметр частиц грунта, составляющих не менее 50 % объема.

С началом перемещения частиц вблизи опор начинают формироваться размыв и намыв грунта. С течением времени глубина размыва грунта увеличивается и высота намыва растет. Установившийся режим, при котором форма и размеры размывов остаются практически постоянными, как показывают исследования [3], наступает, когда безразмерное время процесса  $\left(\frac{v_{\text{нр}} t}{H}\right)$  будет соответствовать условию

$$\left(\frac{v_{\text{нр}} t}{H}\right) \geq 4 \cdot 10^4. \quad (3)$$

Лабораторные методы исследования и гидравлическое моделирование давно и широко используются в гидротехнической практике при проектировании, строительстве и эксплуатации различных речных инженерных сооружений [13]–[15]. Как правило, такие подходы применяются в случае невозможности или дороговизны выполнения натуральных исследований, для оптимизации материальных и финансовых затрат, в целях обеспечения надежности и безопасности принимаемых инженерно-хозяйственных решений, не наносящих экологического ущерба окружающей среде. При разработке подходов к моделированию исходят из оценки физических факторов, определяющих ход исследуемых процессов, а также возможностей лабораторных установок. На основе таких оценок с использованием методов теории подобия определяются масштабы моделирования и характеристики модели.

В задачах движения реальной жидкости в открытых потоках подобие должно обеспечиваться равенством для модели и природы критериев подобия Фруда:  $Fr = \frac{v^2}{gL}$  и Рейнольдса:  $Re = \frac{vL}{\nu}$ ,

где  $v$  — скорость,  $L$  — характерный размер,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости. Однако обеспечить одновременное равенство этих критериев при моделировании невозможно, так как необходимые условия подобия оказываются несовместимыми. Расчеты показывают, что для одновременного равенства для природы и модели чисел  $Fr$  и  $Re$  для модели масштаба 1:50 необходимо использовать жидкость в 353 раза менее вязкую, чем вода, что, конечно, нереально.

Помимо этого при моделировании пространственного речного потока необходимо формирование процесса переноса наносов в деформируемых границах, поведение которых определяется кроме законов течения жидкости геоморфологией речного водосбора, гидрологическим режимом и законами механики грунтов. Однако ввиду того, что современная теория русловых процессов не располагает замкнутой системой уравнений, описывающих весь комплекс процессов, проявляющихся при взаимодействии жидкой и сыпучей сред, задача установления всех необходимых критериев и признаков точного подобия в настоящее время представляется трудновыполнимой. В этих условиях особо важным является исследование задачи приближенного моделирования. Решение такой задачи упрощается наличием зоны автомодельности по числу Рейнольдса, в пределах которой открытые потоки в натуральных и лабораторных условиях являются турбулентными, а значит, в пределах этой зоны подобными. Это обстоятельство позволяет исключить при приближенном моделировании число Рейнольдса из числа критериев моделирования при соблюдении ряда условий, сохраняющих параметры турбулентных вихрей в модельных потоках.

Одним из возможных условий является ограничение степени геометрического искажения модели (степени различия горизонтального и вертикального масштабов). Полное подобие характеристик крупномасштабных турбулентных вихрей достигается при неискаженном моделировании, т. е. равенстве горизонтального и вертикального масштабов моделирования. Таким образом, единственным

критерием подобия при гидравлическом моделировании потоков с открытой поверхностью в области автомодельности остается *число Фруда*. Идентичность этого критерия для модели и природы обеспечивает подобие гидравлических процессов без замены жидкости. Методика проведения экспериментальных исследований, разработанная для выполнения описываемой экспериментальной работы, базируется на методике физического моделирования на деформируемых моделях Государственного гидрологического института (ГГИ), апробированной в ходе многолетнего опыта моделирования в русловой Гидравлической лаборатории ГГИ [16]. Известно, что при моделировании участков рек, сложенных из песка, т. е. равнинных рек, уменьшение крупности частиц в геометрическом масштабе модели невозможно, так как это приводит к микроскопическим размерам песка, обладающим свойством сцепления между частицами, нехарактерным для песка крупностью более 0,2 мм.

В практике моделирования при определенных гидравлических характеристиках модельного потока допустим метод решения проблемы моделирования деформаций речного дна, суть которого заключается в использовании при моделировании кварцевого песка диаметром не менее 0,1 мм, если скорости модельного потока обеспечивают его достаточную подвижность и движение донных наносов (бесструктурный транспорт, движение наносов в форме гряд, движение наносов в виде средних русловых форм). При этом при движении наносов в бесструктурной форме необходим учет коэффициента искажения подвижности наносов и размеров песчаных фракций при пересчете результатов моделирования деформаций дна и расхода наносов на натурные условия. Именно такая методика моделирования механизма движения донных наносов и деформаций дна была использована в настоящей работе. Следует отметить, что при физическом гидравлическом моделировании речного потока с деформируемыми границами не ставилась задача полного дублирования модели речного потока и его деформаций.

Задачей гидравлической модели, созданной в рамках настоящей работы, являлось установление экспериментальным путем гидравлических характеристик потока и параметров деформаций речного дна в районе русловых опор под шпунтовой защитой с прикрытием ледорезного устройства при различных вариантах его конструкции и расположения в створе опоры. Воспроизведение гидравлической структуры и гидравлических характеристик потока, а также механизма движения донных наносов может быть обеспечено на модели при выборе такого значения параметра  $B/H$ , где  $B$  — ширина лотка,  $H$  — глубина потока на модели в лотке, при котором влияние боковых стенок лотка на гидравлику потока на его оси исключено. Это условие определяет возможность установления плановых и вертикальных масштабов модели в гидравлическом лотке с фиксированной шириной. Также корректное воспроизведение указанных параметров может быть обеспечено только на неискаженной модели, т. е. на модели с равными плановыми и вертикальными масштабами. Кроме того, уменьшение масштабов модели ограничено требованием обеспечения необходимой интенсивности движения на модели донных наносов со средними диаметрами натурального русла.

Лабораторная установка для исследования полей скоростей течения и местных размывов дна в районе русловых опор под шпунтовой защитой с прикрытием ледорезного устройства была смонтирована на базе руслового лотка Гидротехнической лаборатории им. профессора В. Е. Тимонова ЛИВТа (ныне ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова [17]). Характеристики руслового лотка: длина русловой части — 40,0 м; ширина — 2,0 м; высота стен — 0,8 м; возможные расходы воды — до 120 л/с. С учетом указанных ранее методических ограничений был выбран единый горизонтальный и вертикальный (высота, глубина) масштаб модели — 1: 50. При таком едином масштабе модели, безусловно, обеспечивается выполнение в процессе моделирования указанных ранее требований и ограничений, а также основных условий подобия соответственных характеристик потока и донных размывов.

Исходя из одинаковости критериев подобия для натурального объекта и модели, определились масштабы для пересчета параметров модели на характеристики натурального объекта:

– *линейные масштабы:*

продольный горизонтальный:  $a_L = 50$ ;

поперечный горизонтальный:  $a_B = 50$ ;

вертикальный:  $a_H = 50$ ;

– масштабы скорости потока:

горизонтальная составляющая:  $a_{ог} = \sqrt{a_H} = 7,07$ ;

вертикальная составляющая:  $a_{ов} = \sqrt{a_H} = 7,07$ ;

– масштаб расхода воды:  $a_Q = a_H^{5/2} = 17\,677,7$ ;

– масштаб времени:  $a_T = \sqrt{a_H} = 7,07$ .

В лабораторной установке в масштабе были воспроизведены (рис. 2) следующие элементы:

– участок реки длиной 250 м (5 м в масштабе на модели);

– шпунтовый короб защиты русловых опор размером 392 × 252 мм с продольной осью, расположенной на центральной продольной оси лотка, передняя (напорная) грань короба расположена на расстоянии 225 см от начала исследуемого участка; расстояние выбиралось из условия установления равномерной структуры потока и распределения скоростей по ширине русла на подходе к шпунтовому коробу и ледорезному устройству при различном его расположении;

– ледорезное устройство в виде равностороннего треугольника со стороной 308,5 мм, расположенное перед коробом шпунтовой защиты опор (расстояния между ледорезом и коробом изменялись в процессе проведения эксперимента).



Рис. 2. Модель шпунтового короба под защитой ледореза, который может быть размещен в русле реки (фото авторов)

Для моделирования дна был использован кварцевый песок со средним диаметром 0,26 мм, гранулометрический состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Гранулометрический состав донных наносов в экспериментальных исследованиях**

Фракция, мм	Содержание, %
0,4–0,315	8,50
0,315–0,200	20,00
0,200–0,160	49,40
0,160–0,100	14,00
0,100–0,063	7,00
0,063–0,05	0,75
Менее 0,05	0,35
Всего	100 %

Основной задачей лабораторных гидравлических исследований являлось определение размеров и локализации размывов и намывов на дне потока в районе конструкций, возводимых при строительстве мостовых опор: шпунтового короба и ледорезного устройства.

Наибольшая глубина местного размыва  $h$  в однородном несвязном грунте у опоры (в виде одиночно стоящей сваи, сваи-оболочки и т. п.), имеющей от уровня воды до дна воронки местного размыва постоянную ширину поперечного сечения, в соответствии с действующими нормами при поступлении наносов в воронку размыва, определяемая по формуле

$$h = 0,77 H^{0,4} b^{0,6} \left( \frac{v}{v_b} \right)^{\frac{1}{2}} MK,$$

где  $b$  — расчетная ширина (поперечное сечение) опоры, равная ширине ее передней грани, м;  
 $v, H$  — средняя скорость (м/с) и глубина потока (м) перед опорой после общего размыва;  
 $v_b$  — взмучивающая скорость потока для грунта, в котором происходит местный размыв, м/с;  
 $M, K$  — коэффициенты формы и косины опоры.

Взмучивающую скорость  $v_b$ , характеризующую мутность потока, т. е. содержание взвешенных наносов в единице объема воды) определяют по формуле

$$v_b = (g w H)^{\frac{1}{3}};$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$w$  — гидравлическая крупность размываемого грунта, м/с.

Коэффициент формы опоры  $M$  необходимо принимать следующий:

- для опоры прямоугольной в плане формы — 1,24;
- для опоры с верховой стороны в виде двугранного угла 60° — 0,73.

Коэффициент косины  $K$  возникает в случае, когда продольная ось опоры образует с направлением набегающего на нее потока угол  $\alpha$  (если  $\alpha = 0$ , то принимается  $K = 1$ ).

С учетом величин, остающихся постоянными в рассматриваемом случае обтекания опоры ( $b, w, M, K$ ), глубина размыва у опоры определяется параметром  $[(H)^{0,23} \times (v)^{0,5}]$ . Предварительные расчеты [3] показали, что в створе мостового перехода величина этого параметра изменяется у различных опор моста в пределах 1,61–2,07. Этот диапазон значений охватывает гидравлику потока при расчетном уровне воды для всех русловых опор проектируемого моста, поэтому в качестве предельных (граничных) значений характеристик для модельных гидравлических исследований характеристик потока и переформирований дна были приняты максимальное и минимальное значения этого параметра. Гидравлические характеристики потока в районе опор в натуральных условиях, а также пересчитанные для модели, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Гидравлические характеристики потока в районе мостовых опор**

Номер цикла опытов	Для натуры		Для модели		
	Глубина, м	Удельный расход, м <sup>3</sup> /(м · с)	Глубина, мм	Удельный расход, л/(м·с)	Расход в лотке, л/с
1	6,32	11,14	126	31,5	55,0
2	10,40	21,47	208	60,74	106,3

Суммарный расход в лабораторном русловом лотке определялся из удельного расхода с учетом ширины лотка и стеснения потока расположенными в нем конструкциями.

Неразмывающая скорость для условий движения потока в экспериментальном лотке, рассчитанная по формуле (1), составила 0,272 м/с, по формуле (2) — 0,280 м/с. Средние скорости движения потока при обтекании шпунтового короба, рассчитанные с учетом стеснения потока, составили 0,280–0,352 м/с. Как показали измерения скоростей при проведении экспериментов, скорости

потока, обтекающего конструкции, достигали значений 0,36–0,38 м/с. Таким образом, движение наносов на модели обеспечивалось во всем диапазоне исследованных условий.

В процессе проведения экспериментов необходимо было достичь установившегося режима, при котором форма и размеры размывов и намывов остаются практически постоянными. Характерное время достижения такого режима определяется, как отмечалось ранее, условием (3). Рассчитанное по этой формуле время для различных режимов модельных исследований в экспериментальном гидравлическом лотке, изменялось в диапазоне 23–29 мин.

### Результаты (Results)

Эксперименты на гидравлической модели выполнялись в следующем порядке. На первом этапе в лотке устанавливалась модель шпунтового короба (без ледорезного устройства). В лоток подавался поток воды, устанавливались параметры эксперимента (расход и глубина), соответствующие данным, приведенным в табл. 2 (рис. 3).



Рис. 3. Испытание с коробом без ледореза (фото авторов)



Рис. 4. Структура рельефа дна после прокачки (фото авторов)

Пропускание потока воды в лотке осуществлялось в течение времени, необходимого для достижения установившегося режима (с запасом) — не менее 90–120 мин. На втором этапе подача воды в лоток прекращалась, вода из лотка сливалась, обнажая дно в окрестностях короба со сформировавшейся структурой размывов (рис. 4), шпигенмасштабом проводились замеры величины углублений и выступов рельефа дна. На третьем этапе поверхность дна вокруг конструкций выравнивалась и вблизи короба устанавливалась модель ледорезного устройства: первая позиция — вплотную к коробу (рис. 5).



Рис. 5. Короб с ледорезом, подготовленный к пропуску воды (фото авторов)

В лоток подавалась вода с установленными параметрами, соответствующими предыдущему проливу короба. Пролив продолжался до достижения установившегося режима. Затем производился слив воды из лотка и измерения параметров рельефа.

Эксперименты проводились для различных вариантов положения ледореза относительно шпунтового короба, ледорез перемещался вверх по потоку вдоль оси потока (лотка) с шагом 0,1 м (5 м для натурных условий). Таким образом, циклы экспериментов проводились для следующих положений

ледореза относительно шпунтового короба: 0 см; 100 мм; 200 мм; 300 мм; 400 мм; 500 мм, что соответствовало расстояниям в натуральных условиях: 0 м; 5 м; 10 м; 15 м; 20 м; 25 м. Затем модель возвращалась к исходным условиям: короб без ледорезного устройства, дно выровнено и цикл экспериментов проводился для других параметров (расхода и глубины).

Для некоторых циклов экспериментов, указанных далее, были выполнены также следующие процедуры:

- измерение направлений, траекторий и скоростей поверхностных течений методом фотофиксации камерой Canon 7D движения специально изготовленных разноцветных светоотражающих поверхностных поплавков;
- измерение скоростей течений в различных точках поперечного сечения потока, распределенных по его ширине и глубине (измерения проводились лабораторной микровертушкой).

При проведении экспериментальных гидравлических испытаний в русловом лотке были выполнены два цикла измерений:

- цикл I: глубина воды в районе модели шпунтового короба 126 мм; расход воды в лотке 55,0 л/с;
- цикл II: глубина воды в районе модели шпунтового короба 208 мм; расход воды в лотке 106,3 л/с.

Практически с начала пропуска потока воды, обтекающего размещенные в русловом лотке модели конструкций, начиналось формирование размывов вблизи фронтальной (напорной) области конструкции (короба либо ледорезного устройства). В боковых и тыловой частях конструкций начиналось формирование донных гряд, расположение и размеры которых существенным образом зависели от отсутствия или наличия ледореза, а также взаимного положения ледореза и короба.

Окончательное установление донного рельефа действительно происходило в течение времени, соответствующего условию (3). Сопоставление профилей донного рельефа, измеренных через 90 мин, 2 ч и 6 ч прохождения потока, не выявило каких-либо изменений в этом рельефе. Фотографии донного рельефа для цикла I измерений приведены на рис. 6.

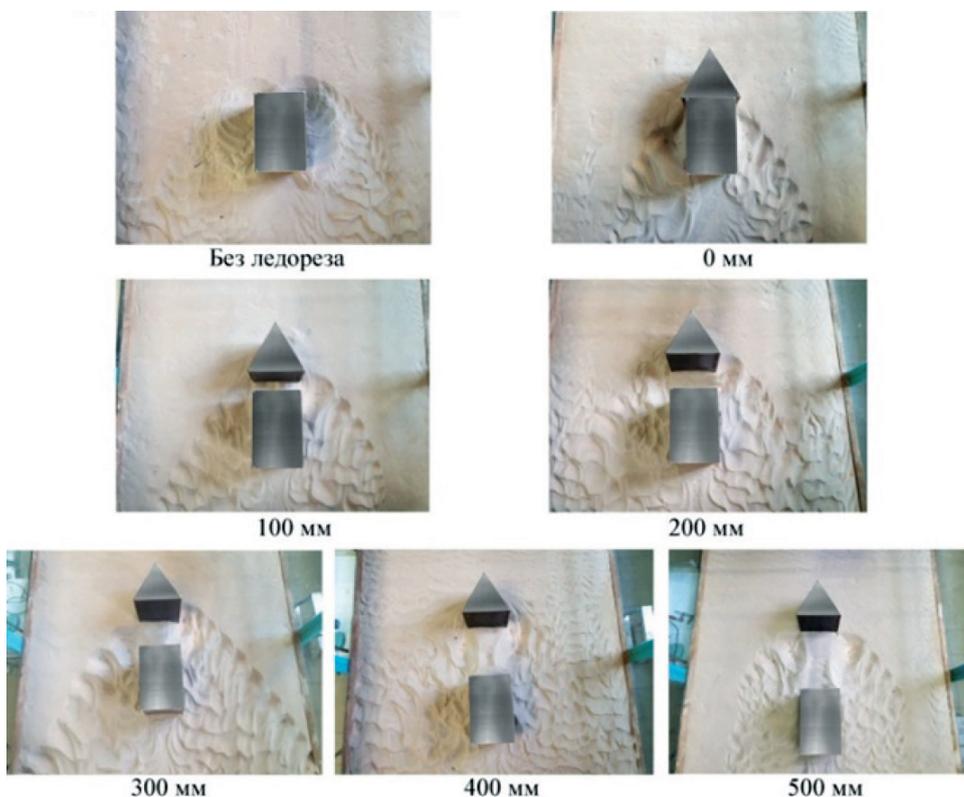


Рис. 6. Фотографии донного рельефа для цикла I (расход 55,0 л/с)  
 (фото авторов)

По данным измерений отметок поверхности дна были построены двумерные планы размывов, схемы которых для цикла I приведены на рис. 7, а. На схемах приведена цветовая высотная шкала для отображения отметок дна, позволяющая оценить рельеф, сформированный в результате обтекания потоком размещенных в русле конструкций. Результаты измерения отметок дна при расходе 106,3 л/с (для цикла II) приведены на рис. 7, б.

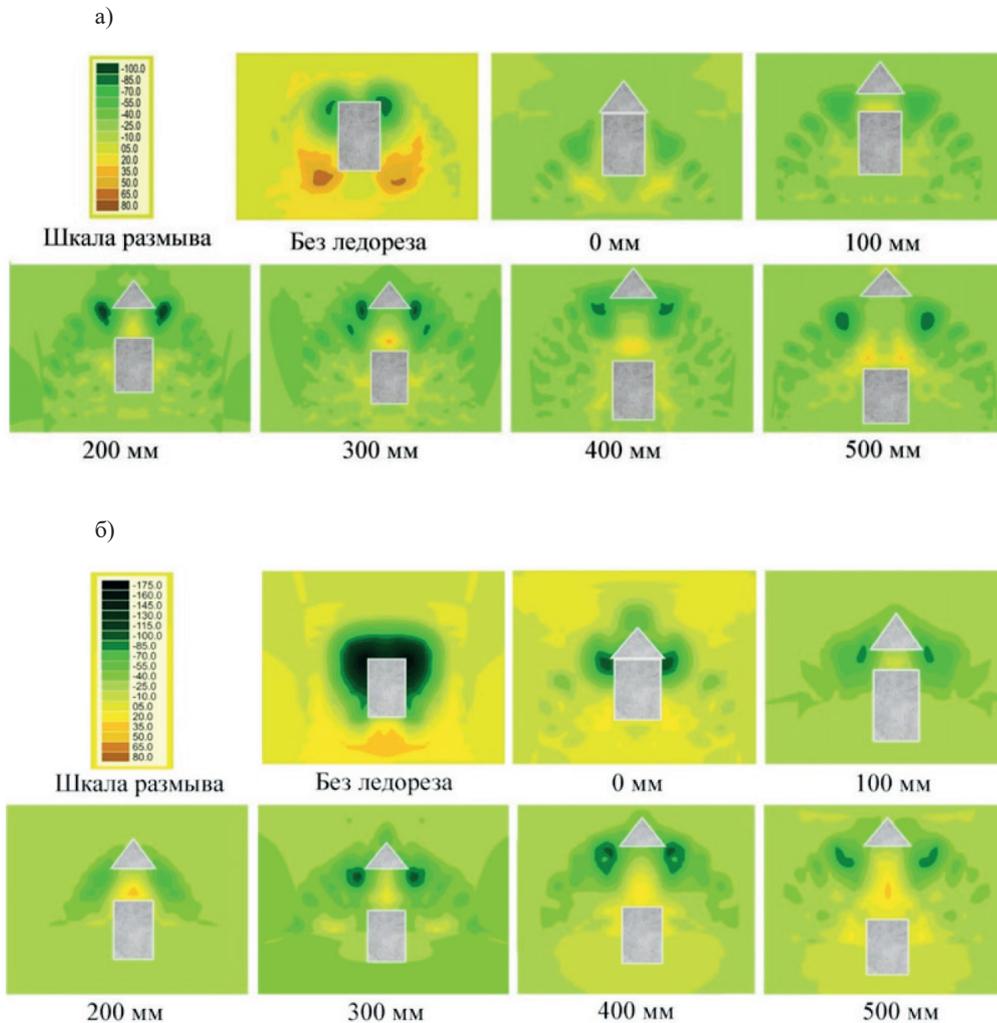


Рис. 7. Двумерные схемы размывов:  
а — при расходе 55,0 л/с; б — при расходе 106,3 л/с

Для нескольких вариантов расположения конструкций *методом фотофиксации* движения поверхностных поплавков были определены траектории и направления движения потока, что позволило составить сетку линий тока и рассчитать значения поверхностных скоростей течения для следующих вариантов — рис. 8:

- расход 55,0 л/с, глубина 126 мм, расстояние от ледореза до короба 40 см;
- расход 106,3 л/с, глубина 208 мм, расстояние от ледореза до короба 0 см;
- расход 106,3 л/с, глубина 208 мм, расстояние от ледореза до короба 20 см.

При этом чтобы зафиксировать различие в распределении скоростей на поверхности потока между неустановившимся (в начале процесса) и установившимся режимами, измерения проводились в начале процесса и через два часа после его начала. Были также выполнены измерения поля скоростей микровертушкой для нескольких режимов. Схема распределения средних на вертикалях скоростей, измеренных микровертушкой, приведена на рис. 9.

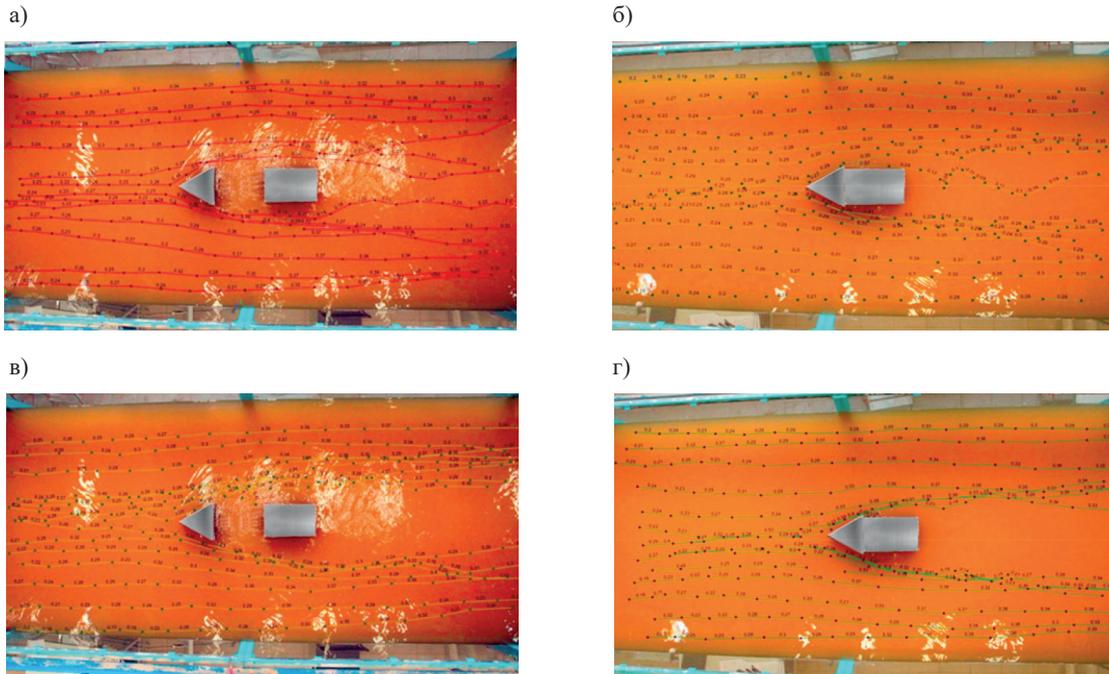


Рис. 8. Траектории поверхностных поплавков: а, в — начало процесса; б, г — установившийся режим (слева — расход 55,0 л/с, глубина 126 мм; справа — расход 106,3 л/с, глубина 208 мм)

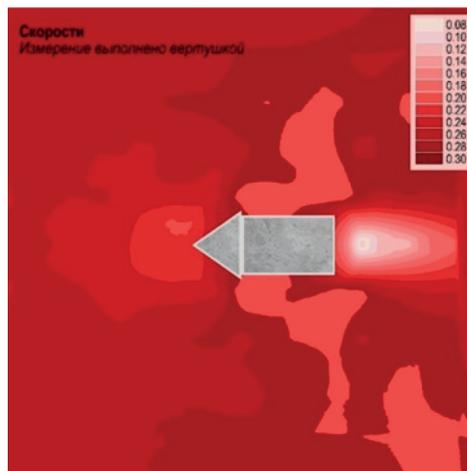


Рис. 9. Распределение скоростей: расход 106,3 л/с, глубина 208 мм

Распределение абсолютных значений скорости течения в потоке:

- на подходе к конструкции скорости практически одинаковы по всей ширине лотка и близки к средней скорости:
  - для первого цикла (расход 55,0 л/с) — 0,22–0,23 м/с (в пересчете на натурные условия 1,5–1,7 м/с);
  - для второго цикла (расход 106,3 л/с) — 0,27–0,29 м/с (для натуральных условий — 1,9–2,1 м/с);
- при обтекании конструкций в боковых пролетах скорости увеличиваются из-за стеснения потока, достигая следующих значений:
  - для первого цикла (расход 55,0 л/с) — 0,32–0,34 м/с (для натуральных условий — 2,3–2,4 м/с);
  - для второго цикла (расход 106,3 л/с) — 0,37–0,38 м/с (для натуральных условий — 2,6–2,7 м/с);
- к средним значениям, равномерно распределенным по ширине лотка, поле скоростей возвращается на расстоянии 1,5–1,8 м ниже тыловой грани короба (для натуральных условий — 75–90 м).

### Обсуждение (Discussion)

Анализ распределения скоростей по поверхности и в объеме потока показал, что в начальный период процесса за конструкцией короба возникают зоны завихрения с малыми продольными скоростями: 0,10–0,15 м/с (для натуральных условий 0,7–1,06 м/с). Возможно, в этой зоне возникают и участки с обратным течением, но использованными в эксперименте методами (фотофиксация движения поплавков и измерения микровертушкой) их обнаружить нельзя. С установлением процесса вокруг конструкции формируется подковообразный вихрь, вдоль крыльев которого возникают рифели и гряды (рис. 10). Внутри «подковы» устанавливается зона застоя.



Рис. 10. Структура дна вдоль следа подковообразного вихря

В этой зоне дно остается относительно гладким, на нем отсутствуют сформировавшиеся донные структуры. Такая картина достаточно хорошо согласуется с данными, из источников [1], [2], [8], [9]. При отсутствии ледореза основные зоны размыва грунта возникают в окрестности углов фронтальной грани короба (рис. 11).

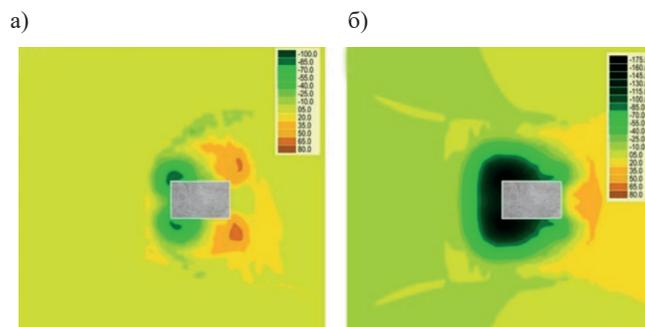


Рис. 11. Схема размыва при отсутствии ледореза:  
а — цикл I; б — цикл II

В тыловой части конструкции формируются намывы — возвышения поверхности относительно первоначальных отметок. При установке перед коробом ледорезного устройства в форме треугольника, направленного острым углом навстречу набегающему потоку, условия обтекания меняются (рис. 12).

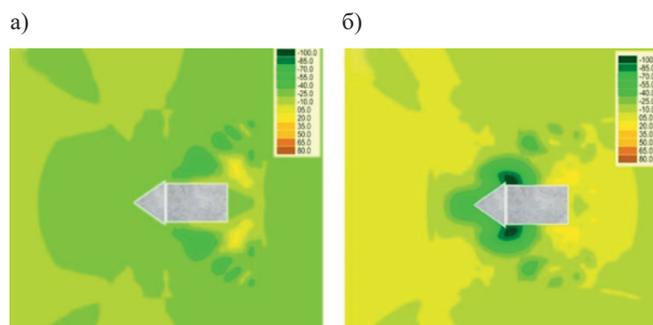


Рис. 12. Схема размыва с ледорезом вплотную к коробу:  
а — цикл I; б — цикл II

Зоны размывов перемещаются в окрестности углов, лежащих в основании треугольного ледореза, обращенном к коробу. Намывы в следе за коробом остаются. При этом абсолютные значения глубины размыва и высоты намыва при установке ледореза вплотную к коробу уменьшаются (по сравнению с вариантом без ледореза). При дальнейшем перемещении ледореза относительно короба вверх по потоку зоны размывов в окрестностях нижних углов ледореза остаются, и возникает зона намыва в промежутке между ледорезом и коробом (рис. 13).

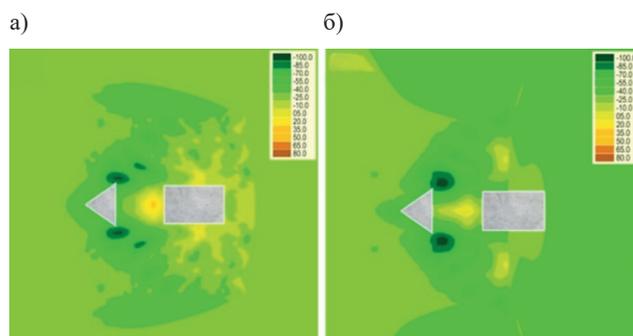


Рис. 13. Схема размыва с ледорезом в 300 мм от короба:  
 а — цикл I; б — цикл II

Обобщенные результаты абсолютных значений размывов и намывов приведены в табл. 3, откуда видно, что в цикле I выполненных экспериментов максимальные значения размыва и намыва возникают в следующих случаях: при отсутствии ледореза, при размещении ледореза на расстоянии 200 мм от короба, при размещении ледореза на расстоянии 300 мм от короба. Минимальные значения размыва и намыва зафиксированы при размещении ледореза вплотную к коробу опоры.

Таблица 3

### Результаты эксперимента

Положение ледореза относительно опоры, мм	Цикл I (расход 55,0 л/с)				Цикл II (расход 106,3 л/с)			
	Максимальный размыв		Намыв		Максимальный размыв		Намыв	
	Модель, мм	Натура, м	Модель, мм	Натура, м	Модель, мм	Натура, м	Модель, мм	Натура, м
Без ледореза	-90	-4,50	58,1	2,91	-182	-9,10	32,5	1,63
0	-57	-2,85	24	1,20	-117,5	-5,88	18,5	0,93
100	-67	-3,35	21	1,05	-81,0	-4,05	9,6	0,48
200	-94,5	-4,73	24	1,20	-73,5	-3,68	48,6	2,43
300	-90	-4,50	42	2,10	-92,5	-4,63	21,6	1,08
400	-79,5	-3,98	31	1,55	-97,5	-4,88	30,6	1,53
500	-86	-4,30	38	1,90	-91,5	-4,58	42,6	2,13

В цикле II экспериментов при больших расходах и глубинах значения размывов и намывов оказались больше, чем в первом цикле. При этом максимальные значения размывов также возникли при отсутствии ледореза. Минимальные значения размыва зафиксированы при размещении ледореза на расстоянии 200 мм от короба.

### Выводы (Summary)

Анализ результатов эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

1. При установке ледорезного устройства улучшаются гидравлические условия обтекания конструкции шпунтового короба. Это приводит к уменьшению глубин размывов. Порядок

уменьшения глубины размывов, в принципе, коррелирует со значениями, определяемыми указанными ранее нормами<sup>†</sup>, согласно которым коэффициенты формы для опоры прямоугольной в плане формы ( $M = 1,24$ ) и опоры с верховой стороны в виде двугранного угла  $60^\circ$  ( $M = 0,73$ ) отличаются на 41 %.

2. В проведенных опытах эти отличия составили: для цикла I — 36,7 %; для цикла II — 35,5 %. Это можно объяснить тем обстоятельством, что исследованная конструкция ледореза по ширине несколько превышает поперечные размеры шпунтового короба. С острых углов при основании треугольного в плане сечения ледореза срываются вихри, которые оказывают влияние на структуру потока, обтекающего конструкцию. При перемещении ледореза вверх по потоку возникают условия попадания потока между ледорезом и шпунтовым коробом, что, по-видимому, уменьшает интенсивность вихреобразования и глубину размыва. Однако при увеличении расстояния между ледорезом и коробом их взаимное влияние на поток в этом промежутке уменьшается, и глубины размывов в окрестности плохо обтекаемых участков ледореза увеличиваются, что проявилось в обоих циклах исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саруханян А. А. Исследование русловых деформационных процессов на участках мостовых переходов георесурсных транспортных систем / А. А. Саруханян, П. О. Балджян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 5. — С. 148–155. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3194.

2. Алибеков А. К. Оценка размыва у свайных опор сооружений, пересекающих водотоки, с учетом показателей надежности и неоднородности грунтов основания / А. К. Алибеков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2018. — Т. 45. — № 1. — С. 181–192.

3. 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.

4. Topczewski L. Monitoring of scour around bridge piers and abutments / Ł. Topczewski, J. Cieśla, P. Mikołajewski, P. Adamski, Z. Markowski // Transportation Research Procedia. — 2016. — Vol. 14. — Pp. 3963–3971. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.493.

5. Arneson L. A. Evaluating scour at bridges / L. A. Arneson, L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, P. E. Clopper. — Fifth Edition. — U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012. — 340 p.

6. Калякин А. М. Модель процесса размыва перед препятствием типа мостовой опоры на основе представлений о вихре / А. М. Калякин // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1997. — С. 33–43.

7. Unger J. Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers / J. Unger, W. H. Hager // Experiments in Fluids. — 2007. — Vol. 42. — Pp. 1–19. DOI: 10.1007/s00348-006-0209-7.

8. Воскобойник А. А. Локальный размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом / А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник [и др.] // Прикладна гідромеханіка. — 2006. — Т. 8. — № 3. — С. 16–26.

9. Калякин А. М. Обобщенная модель обтекания препятствия открытым турбулентным потоком / А. М. Калякин, Е. В. Чеснокова // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 3 (55). — С. 49–56. DOI: 10.5862/MCE.55.6.

10. Salaheldin T. M. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers / T. M. Salaheldin, J. Imran, M. H. Chaudhry // Journal of Hydraulic Engineering. — 2004. — Vol. 130. — Is. 2. — Pp. 91–100. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91).

11. Никишов В. И. От гидравлики открытых потоков — к гидромеханике речных систем / В. И. Никишов // Прикладна гідромеханіка. — 2007. — Т. 9. — № 2–3. — С. 103–121.

12. Laursen E. M. An analysis of relief bridge scour / E. M. Laursen // Journal of the Hydraulics Division. — 1963. — Vol. 89. — Is. 3. — Pp. 93–118. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000896.

13. Халфин И. Ш. Моделирование и расчет размыва дна вокруг вертикального цилиндра большого диаметра под воздействием волн / И. Ш. Халфин // Водные ресурсы. — 2007. — Т. 34. — № 1. — С. 56–67.

14. Воскобойник А. А. Визуализация сопряженного обтекания групповой мостовой опоры / А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник // Вісник Донецького університету/Сер. А: Природничі науки. — 2008. — Вип. 1. — С. 219–227.

15. Михалев М. А. Физическое моделирование местного размыва у цилиндрических мостовых опор в несвязных грунтах / М. А. Михалев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. — 2012. — Т. 267. — С. 3–18.

16. Клавен А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — СПб.: Нестор-История, 2011. — 504 с.

17. Morgunov K. Experimental studies of the kinematics flow and bottom's reformations in the area of bridge pier during the construction of the bridge crossing / K. Morgunov, G. Gladkov, Y. Ivanovsky // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2131. — Is. 3. — Pp. 032064. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032064.

## REFERENCES

1. Sarukhanyan, A. A., and P. O. Baldjyan. "Study of channel deformation at bridge crossing sections of geo-resources transportation systems." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 332.5 (2021): 148–155. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3194.

2. Alibekov, A. K. "Evaluation of scouring at pile-supported structures crossing watercourses according to reliability and inhomogeneity indicators of grounding foundations." *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences* 45.1 (2018): 181–192.

3. 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.

4. Topczewski, Łukasz, Juliusz Cieśla, Paweł Mikołajewski, Paweł Adamski, and Zenon Markowski. "Monitoring of scour around bridge piers and abutments." *Transportation Research Procedia* 14 (2016): 3963–3971. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.493.

5. Arneson, L. A., L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, and P. E. Clopper. *Evaluating scour at bridges*. Fifth Edition. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012.

6. Kalyakin, A. M. "Model' protsessa razmyva pered prepyatstviem tipa mostovoi opory na osnove predstavlenii o vikhre." *Sovershenstvovanie metodov gidravlicheskikh raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzhenii: mezhvuz. nauch. sb.* Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 1997. 33–43.

7. Unger, Jens, and Willi H. Hager. "Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers." *Experiments in Fluids* 42 (2007): 1–19. DOI: 10.1007/s00348-006-0209-7.

8. Voskoboinik, A. A., A. V. Voskoboinik, V. A. Voskoboinik, A. G. Marchenko, and V. I. Nikishov. "Lokal'nyi razmyv grunta pri vzaimodeistvii mostovykh opor, nakhodyashchikhsya v slede drug za drugim." *Prikladna gidromekhanika* 8.3 (2006): 16–26.

9. Kalyakin, A. M., and E. V. Chesnokova. "Generalized model of free turbulent flows around obstacles." *Foundation engineering. Hydraulic construction* 3(55) (2015): 49–56. DOI: 10.5862/MCE.55.6.

10. Salaheldin, Tarek M., Jasim Imran, and M. Hanif Chaudhry. "Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers." *Journal of Hydraulic Engineering* 130.2 (2004): 91–100. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(91).

11. Nikishov, V. I. "Ot gidravliki otkrytykh potokov — k gidromekhanike rechnykh system." *Prikladna gidromekhanika* 9.2–3 (2007): 103–121.

12. Laursen, Emmett M. "An analysis of relief bridge scour." *Journal of the Hydraulics Division* 89.3 (1963): 93–118. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0000896.

13. Khalfin, I. Sh. "Modelirovanie i raschet razmyva dna vokrug vertikal'nogo tsilindra bol'shogo diametra pod vozdeistviem voln." *Vodnye resursy* 34.1 (2007): 56–67.

14. Voskoboinik, A. A., A. V. Voskoboinik, and V. A. Voskoboinik. "Vizualizatsiya sopryazhennogo obtekaniya gruppovoi mostovoi opory." *Visnik Donets'kogo universitetu, Ser. A: Prirodnichi nauki* 1 (2008): 219–227.

15. Mikhalev, M. A. "Physical modeling of local scour nearby cylindrical bridge supports in noncohesive soils." *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* 267 (2012): 3–18.

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

17. Morgunov, K., G. Gladkov, and Yu Ivanovsky. “Experimental studies of the kinematics flow and bottom’s reformations in the area of bridge pier during the construction of the bridge crossing.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2131. No. 3. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032064.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Моргунов Константин Петрович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [morgunovkp@gumrf.ru](mailto:morgunovkp@gumrf.ru)

**Ивановский Юрий Кириллович** — доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [ivanovskyyk@gumrf.ru](mailto:ivanovskyyk@gumrf.ru)

**Богатырёв Владислав Григорьевич** —  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [bogatyrevvg@gumrf.ru](mailto:bogatyrevvg@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Morgunov, Konstantin P.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [morgunovkp@gumrf.ru](mailto:morgunovkp@gumrf.ru)

**Ivanovsky, Yuri K.** — Associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [ivanovskyyk@gumrf.ru](mailto:ivanovskyyk@gumrf.ru)

**Bogatyrev, Vladislav G.** —  
PhD  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [bogatyrevvg@gumrf.ru](mailto:bogatyrevvg@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 21 октября 2023 г.  
Received: October 21, 2023.*