

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

P. V. Belyakov, S. V. Konopatsky, P. S. Rzhakovskaya

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

The hydromorphological situation at the site of bridge construction is analyzed in the paper; the analysis results are presented. The issues of ensuring the channel geometry stability are considered. The impact of a temporary construction embankment on the flow kinematics is estimated. The level regime of the river and the channel reformations in the alignment of the bridge crossing and on the upstream section of the river are studied at the calculated level and water flow. The results obtained make it possible to determine and establish the values of the permissible degree of impact of the designed hydraulic structures and measures on the channel regime of the near-mouth section of the Zeya River in the area of the projected bridge crossing over the river in Blagoveshchensk, within which the natural and anthropogenic-induced conditions of the statistical stability of the “flow-moving channel” system are realized by the river flow. The studies were carried out in 2 stages: the first one, a test stage, was carried out for the initial everyday state of the riverbed in the section of the Zeya River in the area of the bridge crossing, according to which the model was calibrated in accordance with the specified boundary conditions in the area under study; the second one, on the model, was carried out for three options of the construction dam length, erected from the left bank to the 15th pillar of the bridge, to the middle of the span between the 15th and 16th pillars and up to the 16th pillar of the bridge crossing, which made it possible to assess the impact of the structure with different options of its length on the flow hydraulics in the area of the bridge crossing. The research method applied is the mathematical 2-D modeling of the water movement characteristics, for which the “FLOOD” software package is used.

Keywords: hydrological regime, hydraulic calculations, riverbed process, engineering surveys, riverbed reformation, mathematical model, kinematic parameters of movement, sediment transport, flow kinematics.

For citation:

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.

УДК 556.536

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

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

В статье приведены результаты анализа гидроморфологической ситуации на участке строительства мостового перехода, рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости геометрии русла, дана оценка влияния временной строительной насыпи на кинематику потока, исследован уровеньный режим реки и русловые переформирования в створе мостового перехода и на вышерасположенном участке реки

при расчетном уровне и расходе воды. Отмечается, что полученные результаты позволяют определить и установить величину допустимой степени воздействия проектируемых гидротехнических сооружений и мероприятий на русловой режим приустьевых участков р. Зея в районе проектируемого мостового перехода через нее в г. Благовещенске, в пределах которого речным потоком реализуются естественные природные и антропогенно-обусловленные условия статистической устойчивости системы «поток – подвижное русло». Отмечается, что данные исследования проводились в два этапа: первый — тестовый — выполнен для исходного бытового состояния русла реки на участке р. Зея в районе мостового перехода, по данным которого была произведена калибровка модели в соответствии с заданными граничными условиями на исследуемом участке; второй — на модели — проводился для трех вариантов длины строительной дамбы, возводимой со стороны левого берега до 15-й опоры моста, до середины пролета между 15-й и 16-й опорами и до 16-й опоры мостового перехода, что позволило оценить влияние сооружения при различных вариантах его длины на гидравлику потока в районе мостового перехода. Методом исследования являлось математическое 2-D моделирование характеристик движения воды, для проведения которого использовался программный комплекс FLOOD.

Ключевые слова: гидрологический режим, гидравлические расчеты, русловой процесс, инженерные изыскания, русловые переформирования, математическая модель, кинематические параметры движения, транспорт наносов, кинематика потока.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Мостовые переходы через судоходные реки, как и другие сооружения, возводимые в руслах рек, оказывают определенное воздействие на кинематику потока и условия транспорта наносов на судовом ходу, представляя инфраструктурные ограничения для судоходства. Возведение в русле мостовых опор способствует изменению уровенной и скоростной структур потока, что может привести к появлению свальных течений и нежелательных деформаций дна реки.

В ходе многолетней эксплуатации мостовых переходов на судоходных реках имеется определенный опыт обеспечения судоходных условий в районе мостовых переходов, который можно использовать при проектировании новых мостов. При этом наибольший интерес для совершенствования расчетного обоснования путевых мероприятий представляют материалы натуральных и лабораторных исследований, в ходе которых можно оценить влияние мостового перехода на гидравлично-морфометрические характеристики потока и русла в районе перехода в многолетнем разрезе. Река Зея зарегулирована Зейским гидроузлом руслового типа и к настоящему времени работа Зейской ГЭС в значительной степени отразилось на режиме нижерасположенного участка реки. Влияние работы Зейской ГЭС на русловой режим реки связано прежде всего с изменением режима стока воды [1].

На основании имеющегося анализа материалов исследований, гидрографических материалов и результатов выполненных гидравлических расчетов на судоходном участке нижней Зеи можно сделать вывод о значительной интенсивности русловых переформирований. Применительно к исследуемому участку р. Зея в ее нижнем течении следует отметить некоторые особенности деформаций перекатов в зимний период времени. В данном случае прежде всего необходимо учитывать специфику формирования стока на нижнем участке р. Зея. На рис. 1 приведены совмещенные выкопировки материалов карт водных путей за 1983, 1989, 2011 и 2016 гг.

Анализ материалов русловых съемок свидетельствует о знакопеременных вертикальных деформациях, направленные горизонтальные деформации не выражены. Для того, чтобы предвидеть возможные масштабы изменения характеристик потока и русла в дальнейшем и с учетом этого планировать хозяйственную деятельность на водных объектах необходимо исследовать характер взаимосвязей, реализуемых потоком с подвижным дном в качестве отклика на изменение граничных условий движения воды в реке.

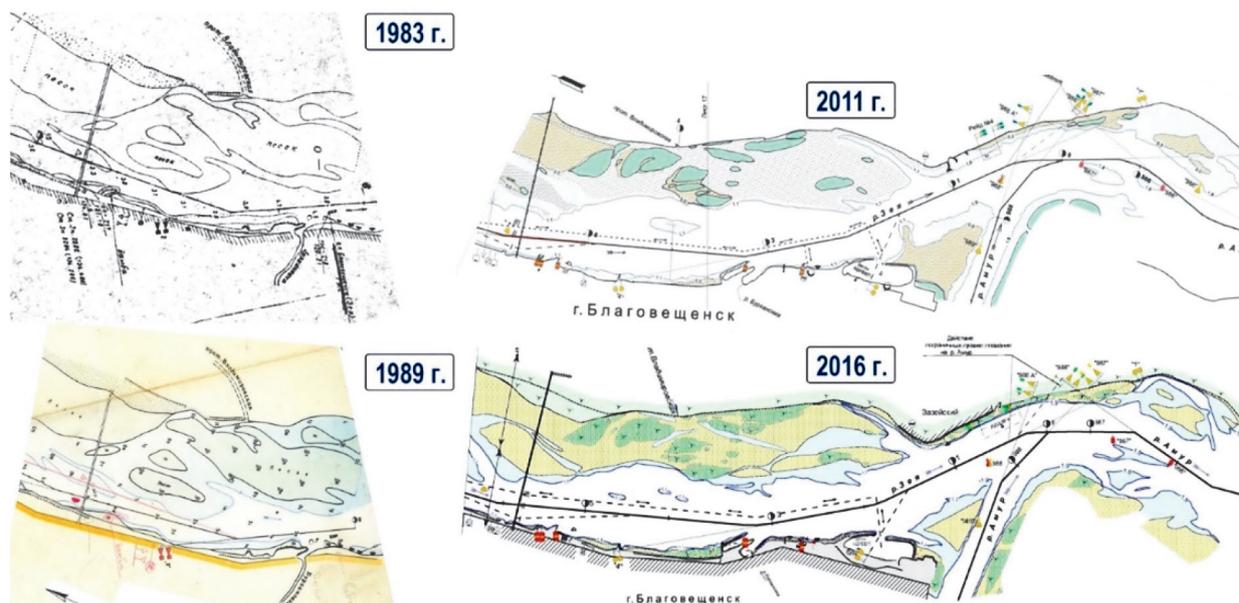


Рис. 1. Выкопировки карт водных путей за 1983, 1989, 2011 и 2016 гг.

Надежность русловых прогнозов, выполняемых с использованием методов математического моделирования при проектировании инженерных мероприятий на реках, определяется, с одной стороны, правильностью оценки физической природы транспорта наносов в естественных русловых потоках, с другой — качеством применяемых численных моделей [2].

Основной целью работы является анализ и оценка гидроморфологической ситуации на участке строительства мостового перехода через р. Зею в г. Благовещенске с помощью математического моделирования характеристик движения воды. Для достижения поставленной цели были реализованы следующие задачи: анализ гидроморфологической ситуации на участке строительства мостового перехода; оценка влияния временной строительной насыпи на кинематику потока, уровенный режим реки и русловые переформирования в створе мостового перехода и на вышерасположенном участке реки при расчетном уровне и расходе воды.

На основании систематизации и анализа материалов инженерно-гидрометеорологических, геологических изысканий и исследований, выполненных на нижней Зее в течение разных лет, а также материалов наблюдений на стационарных гидрологических постах с использованием аппарата математического моделирования были получены результаты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В основе математической модели течения двумерные уравнения Сен-Венана, уравнение переноса частиц наносов и уравнение деформаций дна (баланса наносов). Дискретизация двумерных уравнений выполняется на треугольной сетке по оригинальной методике, описанной в [3]. Двумерные (в плане) уравнения Сен-Венана, называемые также *уравнениями мелкой воды*, широко используются в вычислительной гидравлике открытых потоков.

В ходе численного моделирования применяются неструктурированные треугольные сетки нерегулярной структуры, хорошо адаптируемые под плановые очертания расчетной области и особенности течения, для построения которых применяется специально разработанная двухшаговая методика [4]. На первом шаге расчетная область разбивается на несколько подобластей (зон), определяемых геометрической формой расчетной области. В каждой из этих зон при помощи модифицированной версии программы TRIANA строится базовая сетка нулевого приближения, максимально адаптированная к контуру соответствующей области. На втором шаге все зоны

объединяются в единое целое и производится сглаживание сетки при помощи использования специального алгоритма минимизации гармонического функционала.

При построении компьютерной модели исследуемого участка производилось формирование цифрового рельефа дна с использованием батиметрических файлов. Для этого формировался соответствующий единый файл рельефа в виде набора точек в координатах X, Y, Z . Отметки дна были заданы в Балтийской системе высот (БСВ). Затем отметки рельефа интерполировались в центры ячеек соответствующей расчетной сетки при помощи специального алгоритма, имеющего ряд важных для интерполяции свойств. Отметки рельефа в центрах ячеек использовались в расчетных алгоритмах.

Важным этапом при построении компьютерной модели объекта является калибровка модели, т. е. настройка модели на данный объект путем подбора входящих в нее параметров таким образом, чтобы получить согласование с имеющимися натурными данными. В используемых в расчетах уравнениях мелкой воды при заданной поверхности дна имеется только один параметр, которым можно варьировать, это значение коэффициента шероховатости русла, величина которого была определена на основе результатов тестовых расчетов. В данной работе расчетная область численного моделирования охватывает приустьевой участок Нижней Зеи в районе проектируемого мостового перехода в створе ул. М. Горького в г. Благовещенске. В качестве входной подграницы для создаваемой математической модели принят верхний створ расчетной области, расположенный ниже существующего моста через Зею. На входной подгранице для выполнения расчетов задается расход воды при расчетном уровне воды. В качестве выходной подграницы в работе принята нижняя граница расчетной области. На выходной подгранице в качестве граничного условия задается отметка уровня при расчетном уровне воды. Расположение проектируемого мостового перехода показано на рис. 2.

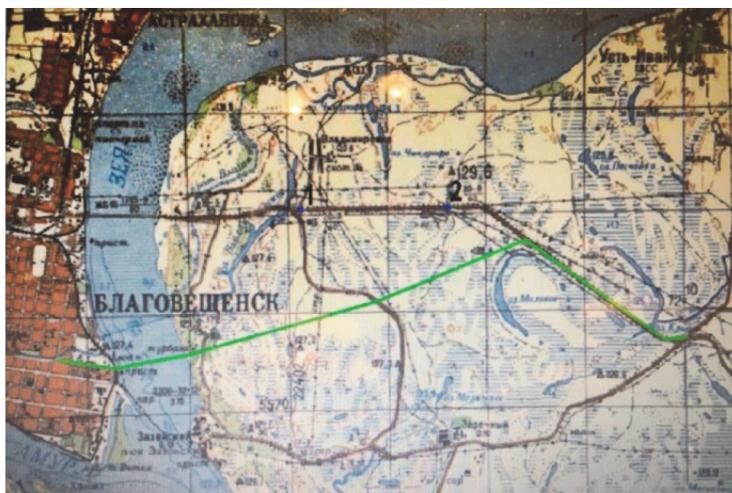


Рис. 2. Расположение проектируемого мостового перехода:
 1 — путепровод развязки с дорогами на Владимировку
 и Зазейский (пойменный мост № 1);
 2 — путепровод на расстоянии 5,5 км от левобережного устья моста
 (пойменный мост № 2)

На основе полученных результатов можно оценить вероятное влияние различных вариантов компоновочных решений по возведению временной дамбы — технологического проезда со стороны левого берега в процессе строительства на гидравлику речного потока в створе мостового перехода [5]. Гидравлические расчеты выполнялись на основании данных, характеризующих рельеф русла и поймы по материалам батиметрических съемок 2011–2013 гг. и топографических карт, расчетный расход воды равен $8600 \text{ м}^3/\text{с}$, расчетный уровень воды — 125,80 м БСВ.

Для оценки воздействия проектируемых мероприятий на гидравлику потока и условия транспорта наносов на исследуемом участке р. Зеи в районе проектируемого мостового перехода проводились циклы гидравлических расчетов с использованием плановой (двумерной) математической модели движения воды. Первый (тестовый) цикл гидравлических расчетов был выполнен для исходного бытового состояния русла реки на участке р. Зеи в районе мостового перехода. По этим данным производилась калибровка модели в соответствии с заданными граничными условиями на участке реки и был выполнен предварительный анализ гидроморфологических характеристик потока и русла реки. Второй цикл гидравлических расчетов на модели проводился для трех вариантов длины строительной дамбы, возводимой со стороны левого берега, соответственно, до 15-й опоры моста, до середины пролета между 15-й и 16-й опорами и до 16-й опоры мостового перехода. Это позволило оценить влияние данного сооружения при различных вариантах его длины на гидравлику потока в районе мостового перехода.

На основании полученных результатов был выполнен анализ скоростного режима потока на судовом ходу [6]. Для предварительной оценки режима скорости течения, формирующейся на исследуемом участке р. Зеи при заданных начальных и граничных условиях в работе были выполнены гидравлические расчеты при установившемся движении воды. В результате выполненных тестовых расчетов было получено распределение скорости течения воды в границах расчетной области при уровнях и расходах воды, отвечающих исходным данным.

Общий вид треугольной конечно-элементной сетки, построенной в границах расчетной области, рельеф поверхности по данным компьютерной обработки, рельеф свободной поверхности и поле средних скоростей течения по результатам выполненных гидравлических расчетов, а также результаты гидравлических расчетов, выполненных для бытового состояния русла, приведены на рис. 3–6.



Рис. 3. Расчетная треугольная конечно-элементная сетка для моделируемого участка р. Зеи

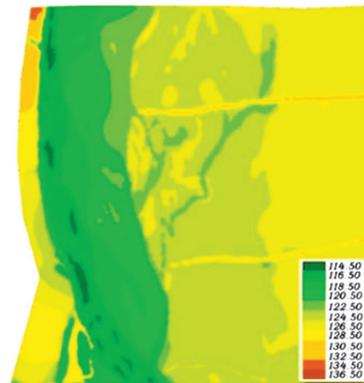


Рис. 4. Рельеф поверхности дна по данным компьютерной обработки в бытовом состоянии, м БСВ

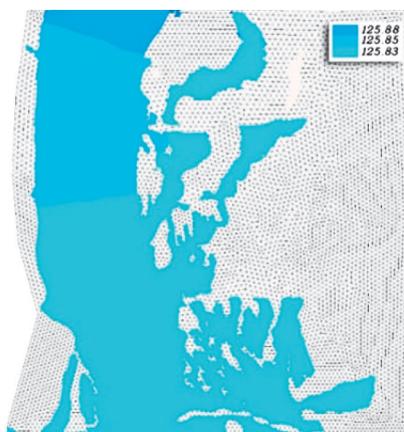


Рис. 5. Рельеф свободной поверхности по результатам гидравлических расчетов, м БСВ (бытовое состояние)



Рис. 6. Поле средних скоростей течения по результатам гидравлических расчетов, м/с (бытовое состояние)

Полученные результаты тестовых расчетов позволяют сделать предварительные выводы, характеризующие кинематику потока на исследуемом участке реки в бытовом состоянии русла при расчетных уровнях и расходе воды. Результаты гидравлических расчетов с целью их верификации сопоставлены с имеющимися данными натуральных исследований на приустьевом участке р. Зеи, а также с материалами исследований других авторов [7]–[9].

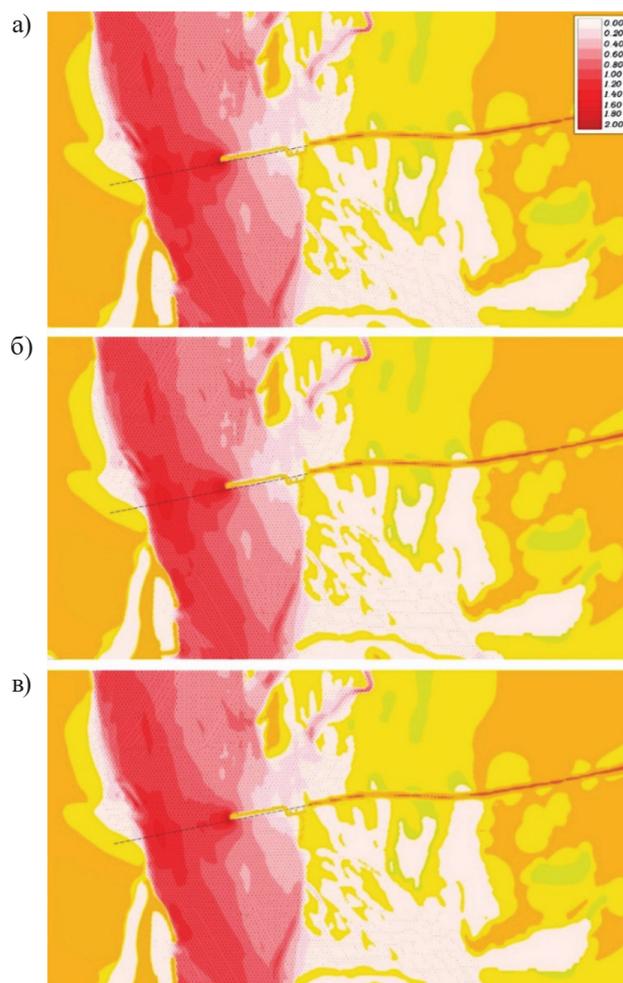


Рис. 7. Поля средних скоростей течения воды в районе мостового перехода для различных вариантов длины строительной дамбы, м/с:
 а — длина строительной дамбы до 15-й опоры;
 б — длина строительной дамбы до середины пролета между 15-й и 16-й опорами;
 в — длина строительной дамбы до 16-й опоры

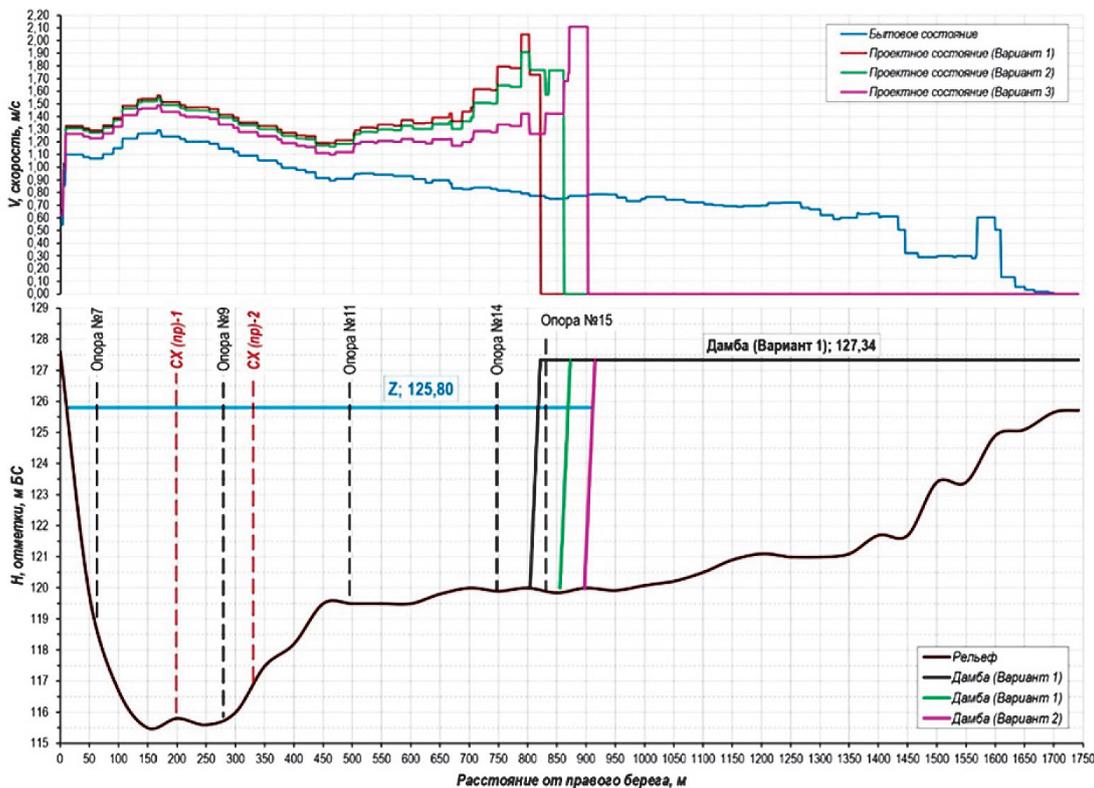


Рис. 8. Поперечное сечение русла в створе мостового перехода (в бытовом и проектных состояниях)

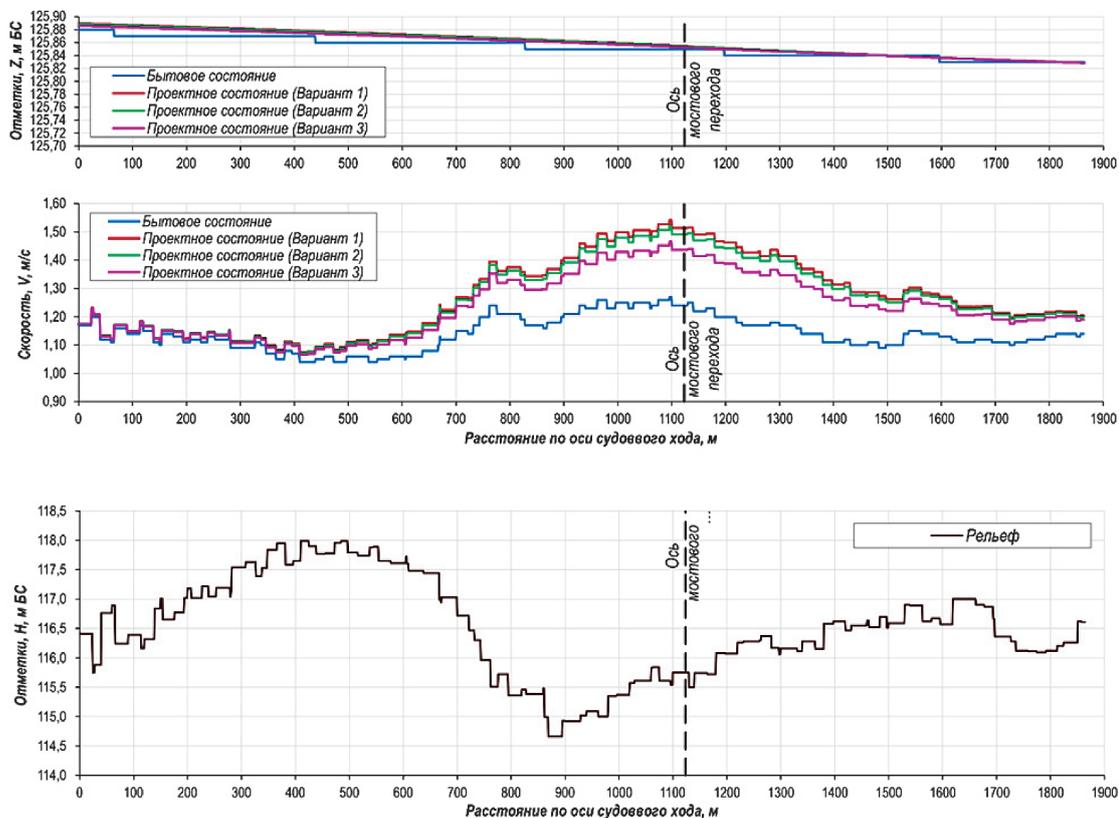


Рис. 9. Продольные профили по оси судового хода (в бытовом и проектных состояниях)

Для оценки влияния проектируемых мероприятий по возведению временной строительной дамбы — технологического проезда на гидравлику потока, во втором цикле выполняются гидравлические расчеты для трех вариантов длины сооружения, соответственно, до 15-й опоры моста, до середины пролета между 15-й и 16-й опорами и до 16-й опоры мостового перехода. На рис. 7 приведены результаты выполненных расчетов с сопоставлением полей средних скоростей течения воды для трех вариантов проектного состояния русла р. Зеи в районе проектируемого моста. На рис. 8 и 9 сопоставлены, соответственно, эпюры распределения скорости течения воды в бытовом состоянии для трех вариантов проектного состояния по ширине реки в створе мостового перехода и по оси существующего судового хода на Нижней Зее в черте Благовещенска.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Результаты выполненных расчетов позволяют оценить влияние строительной насыпи при различных вариантах ее длины на гидравлику потока в районе проектируемого мостового перехода при расчетном уровне (расходе) воды. Гидравлические расчеты показали, что возведение проектируемой временной строительной дамбы окажет существенное влияние на гидравлику речного потока в створе мостового перехода, а также на участке подхода к мосту сверху и на нижерасположенном участке реки. На рис. 10 показана интегральная кривая распределения расхода воды по ширине реки, построенная по результатам гидравлических расчетов для бытового состояния русла.

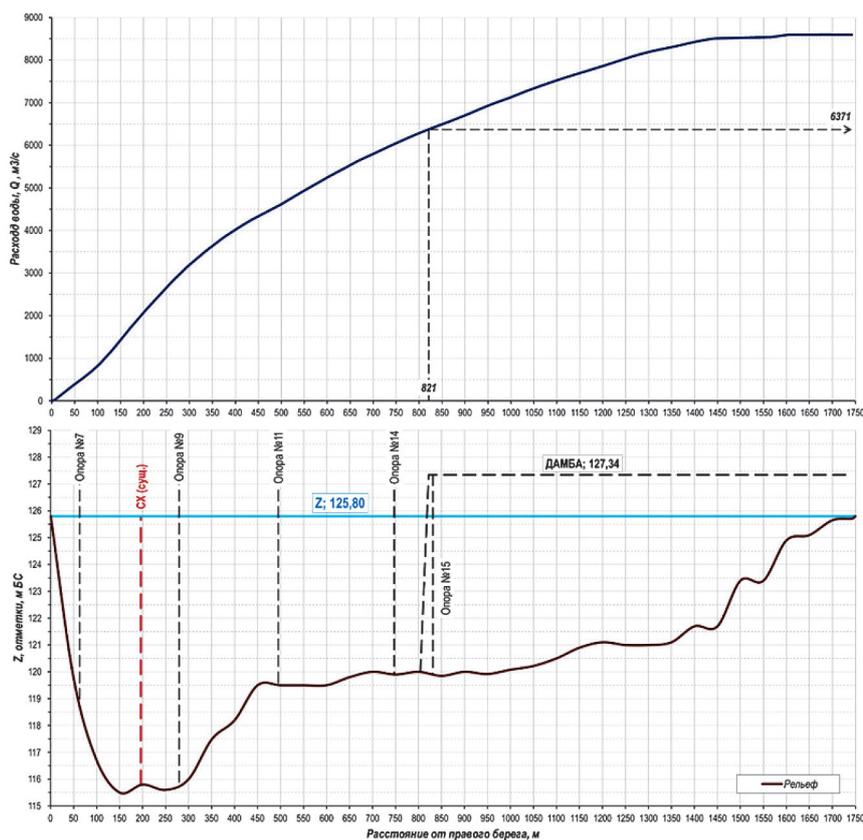


Рис. 10. Интегральная кривая распределения расхода воды по ширине реки

Временная строительная насыпь перекрывает русло реки в створе перехода более чем на 40 % ширины реки. После строительства дамбы расход воды в свободной от сооружения части русла реки существенно увеличится. В табл. 1 приведены значения расхода воды в бытовом состоянии русла в свободной от сооружения части русла реки — данные, позволяющие установить долю расхода воды, перераспределяемой по ширине реки в створе моста после возведения строительной насыпи различной длины.

Таблица 1

Расчетные значения расхода воды в свободной от сооружения части русла

Гидравлические характеристики потока	Варианты расчетов			
	Бытовое состояние (без дамбы)	1-е проектное состояние (дамба до 15-й опоры)	2-е проектное состояние (дамба до 15,5-й опоры)	3-е проектное состояние (дамба до 16-й опоры)
Расход воды в свободной от сооружения части русла, м ³ /с	8600	6374	6544	6724

Полученные в табл. 1 данные показывают, что после возведения сооружения, в зависимости от его длины, в пользу основной части русла реки перераспределяется от 25,9 % (для варианта дамбы до 15-й опоры) до 21,8 % (для варианта дамбы до 16-й опоры) от полного расхода воды в реке.

Перераспределение расхода воды, вызванное строительством дамбы, приводит к увеличению скорости течения воды в свободной от сооружения части русла, которое происходит неравномерно по ширине реки. Наибольшие значения скорости течения воды наблюдаются в районе головы проектируемой строительной дамбы (см. рис. 7 и 8). Общий характер изменений в гидравлике потока характеризуется величиной средней по живому сечению скорости течения воды. Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения средней по живому сечению скорости течения воды в свободной от сооружения части русла

Гидравлические характеристики потока	Вариант расчетов			
	Бытовое состояние (без дамбы)	1-е проектное состояние (дамба до 15-й опоры)	2-е проектное состояние (дамба до 15,5-й опоры)	3-е проектное состояние (дамба до 16-й опоры)
Средняя скорость течения воды в свободной от сооружения части русла, м/с	0,93	1,40	1,34	1,29

Полученные в табл. 2 данные показывают, что после возведения сооружения (в зависимости от его длины) средняя скорость течения воды в свободной от сооружения части русла реки возрастает от 50,5 % (для варианта дамбы до 15-й опоры) до 38,7 % (для варианта дамбы до 16-й опоры) по сравнению с бытовым значением средней скорости течения воды.

Влияние дамбы на скорости течения на судовом ходу сказывается слабее, чем в районе головы сооружения (см. рис. 9). По длине судового хода в границах расчетной области скорость течения в проектном состоянии после строительства дамбы будет монотонно возрастать сверху вниз по течению реки и достигнет максимальных значений в створе мостового перехода. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения средней скорости течения воды на судовом ходу в створе моста

Гидравлические характеристики потока	Вариант расчетов			
	Бытовое состояние (без дамбы)	1-е проектное состояние (дамба до 15-й опоры)	2-е проектное состояние (дамба до 15,5-й опоры)	3-е проектное состояние (дамба до 16-й опоры)
Средняя скорость течения воды на судовом ходу в створе моста, м/с	1,25	1,52	1,49	1,44

В районе моста значения скорости на судовом ходу возрастут до 1,25–1,52 м/с, т. е. в 1,22 раза (для варианта дамбы до 15-й опоры) и до 1,44 м/с, т. е. в 1,15 раза (для варианта дамбы до 16-й опоры). Влияние дамбы на положение уровней воды окажется несущественным и не приведет к дополнительному подтоплению при расчетном уровне воды. Значения расхода влекомых наносов в расчетных сечениях плановой струи, проходящей вдоль судового хода, в настоящей работе вычислялись по формуле К. В. Гришанина [10]. Результаты расчетов приведены на рис. 11.

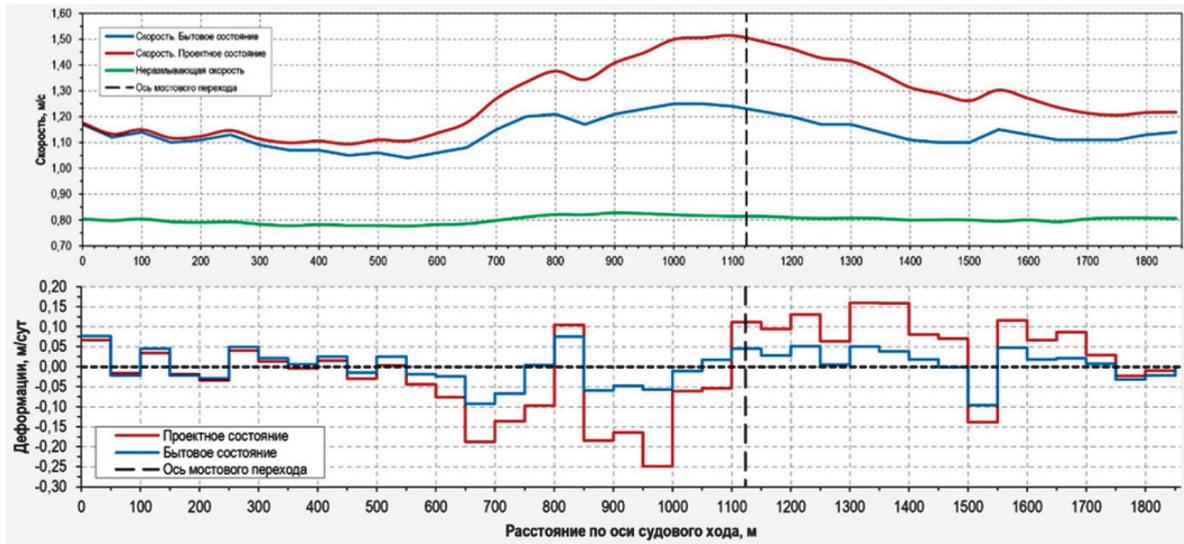


Рис. 11. Совмещенные профили средней на вертикали скорости течения на судовом ходу, неразмывающей скорости течения и скорости начальной деформации дна при расчетном уровне воды (бытовое состояние и проектные условия)

На графике показаны эпюры средних скоростей течения на судовом ходу в районе мостового перехода и эпюра неразмывающей скорости течения и совмещенные с ними графики изменения скорости начальной деформации дна в бытовых и проектных условиях при расчетном уровне воды. Полученные результаты показали, что в бытовых условиях при расчетном уровне (расходе) воды по всей длине исследуемого участка скорость течения на судовом ходу превышает величину не размывающей скорости потока. Это свидетельствует о том, что при таком наполнении русла на участке имеет место транспорт наносов, перемещение которых может привести к деформациям дна — размыву или отложению наносов на судовом ходу. Результаты выполненных расчетов показали, что в бытовых условиях на исследуемом участке р. Зеи в районе проектируемого мостового перехода будут наблюдаться ограниченные по величине знакопеременные деформации дна интенсивностью 3–5 см/сут, что свидетельствует о транзитном движении наносов по длине участка [11].

Заключение (Conclusion)

Для анализа влияния мостового перехода на условия транспорта наносов и характер русловых переформирований на участке в работе выполнена оценка значений скорости начальных деформаций дна на участке в бытовом состоянии и в проектных условиях. Анализ деформаций выполнен по результатам математического моделирования для плановой струи по длине судового хода. С этой целью результаты расчета средних на вертикали скоростей течения в границах расчетной области проинтерполированы на ось судового хода (см. рис. 9).

В фактических (бытовых) условиях при подходе к створу проектируемого моста сверху скорость течения возрастает до 1,05–1,25 м/с на расстоянии примерно 600–650 м вследствие наличия прижимного течения к правому берегу реки в черте г. Благовещенска. Ниже по течению, примерно через 200–250 м, скорость течения на судовом ходу уменьшается до значений порядка 1,10 м/с. Максимальная скорость в бытовом состоянии наблюдается в створе проектируемого мостового

перехода. В строительный период, после возведения дамбы на проектную длину, общий характер распределения скорости течения по длине судового хода на участке сохранится (см. рис. 9), однако скорость в створе моста возрастет в 1,22–1,15 раза в зависимости от длины сооружения. Таким образом, с точки зрения оценки влияния мостового перехода на условия судоходства наибольший интерес для анализа представляет участок реки, непосредственно примыкающий к створу моста, так называемая «зона интересов».

Размер этой зоны определяется протяженностью участка реки, на гидравлических характеристиках которого отражается влияние мостового перехода [12]. Протяженность этой зоны будет изменяться с величиной наполнения русла, т. е. в зависимости от расхода (уровня) воды в реке в районе мостового перехода. Главным образом она будет зависеть от степени стеснения русла реки, определяемой параметрами проектируемых сооружений, а также от гидравлических характеристик потока в районе мостового перехода и, в первую очередь, от возможного соотношения расходов и уровней воды в узле слияния р. Зеи и Амура. Наибольшую интенсивность транспорта наносов следует ожидать при образовании кривой спада в устьевой области р. Зеи, т. е. при возможном сочетании больших расходов воды в р. Зее с минимальными расходами воды в р. Амуре.

Гидравлические расчеты, выполненные в настоящей работе при расчетных значениях расходов и уровней воды в реке (см. рис. 9), показали, что влияние строительной дамбы на скоростной режим потока на судовом ходу в районе мостового перехода будет сказываться на участке реки общей длиной порядка 1500 м примерно на одинаковом удалении от створа моста как вверх, так и вниз по течению. Выше створа моста в проектных условиях наблюдается тенденция увеличения скорости течения воды по длине реки, в результате чего на данном участке следует ожидать активизацию транспорта наносов и общий размыв дна потока в районе мостового перехода в строительный период. Для оценки скорости начальных деформаций на исследуемом участке русла р. Зеи в бытовых и проектных условиях применялась известная методика вычислений [13], в основе которой решение уравнения деформаций в одномерной постановке методом конечных разностей.

В проектных условиях общий характер деформаций дна на участке не изменится. Вследствие увеличения скорости течения воды произойдет активизация транспорта наносов в районе мостового перехода, а также на участках, расположенных выше и ниже створа моста. При этом скорость начальных деформаций дна местами по сравнению с бытовыми условиями возрастет в 2–3 раза. Фоновые деформации размыва дна следует ожидать на участке, расположенном на удалении 500–600 м выше створа моста. Продукты размыва в начальный период времени будут откладываться ниже по течению, примерно на таком же расстоянии от створа мостового перехода. Впоследствии размывтый грунт будет перемещаться на нижерасположенный участок реки.

Прогноз деформаций русла р. Зеи в районе проектируемого мостового перехода на данном этапе работы не выполнялся. Этот вопрос требует проведения специального исследования, так как гидравлика потока и режим переформирования дна в приустьевой области реки являются достаточно сложными и в значительной степени зависят от возможного сочетания расходов воды р. Зеи и Амура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. — СПб.: ЛИВТ, 1992. — 312 с.
2. Технические указания по расчету местного размыва у опор эксплуатируемых мостов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data1/52/52610/index.htm> (дата обращения: 01.09.2022).
3. *Гладков Г. Л.* Обеспечение судоходных условий на нижней Зее для доставки оборудования на объекты строительства Амурского газоперерабатывающего завода / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков, А. Ю. Жук // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей: сб. материалов юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящен. 110-летию создания гидротехн. лаб. им. проф. В. Е. Тимонова / Под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 291–306.
4. СП 32–102–95. Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. — М.: Корпорация «Транстрой», 1996. — 77 с.

5. 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.

6. Гладков Г. Л. Обеспечение условий судоходства на нижней Зее / Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Эволюция эрозионно-русловых систем, ее хозяйственно-экономические и экологические последствия, прогнозные оценки и учет: докл. и сообщ. Всеросс. науч.-практ. конф. и XXXII межвуз. координац. совещ. — Уфа: ООО «Аэтерна», 2017. — С. 114–117.

7. Гусев М. Н. Русловые процессы Зеи в условиях современного хозяйствования / М. Н. Гусев, Ю. В. Помигуев // *География и природные ресурсы*. — 2007. — № 2. — С. 113–118.

8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. — М.: Изд-во «Мир», 1979. — 392 с.

9. Беликов В. В. Численное моделирование кинематики потока на участке неразмываемого русла / В. В. Беликов, А. А. Зайцев, А. Н. Милитеев // *Водные ресурсы*. — 2001. — Т. 28. — № 6. — С. 701–710.

10. 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.

11. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 3-е изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2022. — 432 с.

12. Милитеев А. Н. Гидравлические исследования численными методами / А. Н. Милитеев, В. М. Ляхтер // *Водные ресурсы*. — 1981. — № 3. — С. 60–79.

13. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po uluchsheniyu sudokhodnykh uslovii na svobodnykh rekakh*. SPb.: LIVT, 1992.

2. Tekhnicheskie ukazaniya po raschetu mestnogo razmyva u opor ekspluatiruemykh mostov. Web. 1 Sept. 2022 <<https://meganorm.ru/Data1/52/52610/index.htm>>.

3. Gladkov, G. L., P. V. Belyakov, and A. Yu. Zhuk. “Obespechenie sudokhodnykh uslovii na nizhnei Zee dlya dostavki oborudovaniya na ob’ekty stroitel’sтва Amurskogo gazopererabatyvayushchego zavoda.” *Proektirovanie, stroitel’sтво i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii vodnykh putei. Sbornik materialov yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 291–306.

4. Set of Rules 32–102–95. Constructions of bridges and abutments methods of local scour calculation. M.: Korporatsiya «Transstroj», 1996.

5. 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.

6. Gladkov, G. L., and P. V. Belyakov. “Obespechenie uslovii sudokhodstva na nizhnei Zee.” *Evolutsiya erozionno-ruslovykh sistem, ee khozyaistvenno-ekonomicheskie i ekologicheskie posledstviya, prognoznnye otsenki i uchet. doklady i soobshcheniya Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii i XXXII mezhdunarodnogo koordinatsionnogo soveshchaniya*. Ufa: Obschestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu “Aeterna”, 2017. 114–117.

7. Gusev, M. N., and Yu. V. Pomiguyev. “Channel processes of the Zeya under conditions of current economic management.” *Geography and Natural Resources* 2 (2007): 113–118.

8. Segerlind, Larry J. *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley and Sons, Inc. 1976.

9. Belikov, V. V., A. A. Zaitsev, and A. N. Militeev. “Chislennoe modelirovanie kinematiki potoka na uchastke nerazmyvaemogo rusla.” *Vodnye resursy* 28.6 (2001): 701–710.

10. Laursen, Emmett M. “An analysis of relief bridge scour.” *Journal of the Hydraulics Division* 89.3 (1963): 93–118.

11. Gladkov, G. L., K. M. Berkovich, and R. S. Chalov. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: monografiya*. 3^d edition. SPb.: Izd-vo «Lan’», 2022.

12. Militeev, A. N., and V. M. Lyakhter. “Gidravlicheskie issledovaniya chislennymi metodami.” *Vodnye resursy* 3 (1981): 60–79.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляков Пахом Витальевич —

кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: BelyakovPV@gumrf.ru

Конопацкий Сергей Васильевич —

старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_vpvi@gumrf.ru

Ржаковская Полина Сергеевна — ассистент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_vpvi@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belyakov, Pachom V. —

PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: BelyakovPV@gumrf.ru

Konopatsky, Sergei V. —

Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_vpvi@gumrf.ru

Rzhakovskaya, Polina S. — Assistant

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_vpvi@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 10 октября 2022 г.
Received: October 10, 2022.*