

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1015-1029

## SIMULATION OF THE BARGE-TUG COMBINATIONS OPERATION USING THE MATRIX ROUTING METHOD

**A. M. Zhidkova**

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

*The problems of modeling the operation of classic (constant configuration) and variable vessel combination of barges by matrix routing methods are discussed in the paper. Regrouping the combination directly on the route allows you to operate a larger number of barges compared to a permanent combination, which increases its load capacity. The efficiency of water transport is determined by the volume of cargo delivered in relation to operating costs, which depend on the time the vessel is on the route. Additional stops during the voyage of the vessels combination for its reformation allow to increase the total cargo turnover, but lead to an increase in the voyage time, which is a certain contradiction, the solution of which is possible through the use of a variable approach to organizing the work of barge-tug combinations. The results of the mathematical apparatus development for describing the model of the barge-tug combinations movement on inland waterways are presented; the influence of turns on the change in the combinations speed and on the total voyage time is taken into account, and a particular task of regrouping the combination is additionally considered. The route from the Nizhnesvirsky lock to Ladoga Lake, on which turning points and places, where it is necessary to change the barge-tug combinations configuration to pass it are identified, is analyzed. For the mathematical description of the vessel movement along the route, a system of calculation matrices, which allows us to generalize the change and relationship of the speed and time parameters of the vessel movement with its route, including taking into account the time of regrouping the combination, is proposed. The main factors influencing the effectiveness of the combinations operation organization with their reorganization along the route are identified. As a basis for constructing matrices, it is proposed to use turning points, the system of which is formed in the form of a three-level model. The complex of matrices allows to obtain a quantitative presentation of the vessel movement and voyage time, while providing detailed parameters for the combination passage along the individual sections of the waterway, which in general is the basis of the developed information technology for intelligent control of the barge-tug combinations operation.*

*Keywords: water transport, barge-tug combinations, distance matrix, speed matrix, time matrix, change in the barge-tug combinations configuration, fairway.*

**For citation:**

Zhidkova, Anastasiya M. "Simulation of the barge-tug combinations operation using the matrix routing method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1015–1029. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1015-1029.

**УДК 656.62**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БАРЖЕ-БУКСИРНЫХ СОСТАВОВ МЕТОДОМ МАТРИЧНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

**А. М. Жидкова**

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

*В статье рассматриваются задачи моделирования работы классического (постоянной конфигурации) и изменяемого судового состава барж методом матричной маршрутизации. Перегруппировка состава непосредственно на маршруте позволяет оперировать большим количеством барж по сравнению с постоянным составом, что увеличивает его общую грузоподъемность. Эффективность работы водного транспорта определяется объемом доставленного груза в соотношении к эксплуатационным расходам, которые зависят от времени нахождения судна на маршруте. Дополнительные остановки во время рейса состава судов для его реформирования позволяют увеличить общий грузооборот, но при этом приводят к увеличению времени рейса, что является определенным противоречием, решение которого возможно за счет применения*

вариативного подхода к организации работы барже-буксирных составов. Представлены результаты разработки математического аппарата для описания модели движения барже-буксирного состава по внутренним водным путям, с учетом влияния поворотов на изменение скорости состава и на общее время рейса, дополнительно рассматривается частная задача перегруппировки состава. В исследовании проанализирован маршрут от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера, на котором определены поворотные точки и места, где необходимо изменить конфигурацию состава для его прохождения. Для математического описания движения судна по маршруту предложена система расчетных матриц, позволяющая обобщенно представить изменение и взаимосвязи скоростных и временных параметров движения судна с его маршрутом, в том числе учесть время перегруппировки состава. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективность организации работы составов с их перестроением на маршруте. В качестве основы построения матриц предложено использовать поворотные точки, система которых сформирована в виде трехуровневой модели. Комплекс матриц позволяет получить количественное представление о движении судна и времени рейса, обеспечивая при этом детализацию параметров прохождения состава по отдельным участкам водного пути, что в целом является основой развиваемой информационной технологии интеллектуального управления работой барже-буксирных составов.

*Ключевые слова:* водный транспорт, барже-буксирные составы, матрица расстояний, матрица скоростей, матрица времени, изменение конфигурации состава, судоводитель.

**Для цитирования:**

Жидкова А. М. Моделирование работы барже-буксирных составов методом матричной маршрутизации / А. М. Жидкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1015–1029. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1015-1029.

## Введение (Introduction)

Перевозка груза предполагает обязательное сочетание трех связанных элементов: грузовой базы, транспортного средства и маршрута следования. В обобщенном виде процесс перевозки представляет собой перемещение заданного груза из пункта отправления в пункт назначения с помощью различных транспортных и технических средств. В рамках данного исследования рассматривается вариант организации процесса перевозки на внутреннем водном транспорте с помощью барже-буксирных составов (ББС), при котором объем груза предварительно известен как исходный параметр или неограничен. Тогда конечной задачей является разработка технологической последовательности перемещения заданного груза. Эта задача разделяется на *выбор маршрута* и *выбор транспортного средства*. Для внутреннего водного транспорта сам маршрут не может быть изменен в силу особенности водных путей, при этом он оказывает непосредственное влияние на выбор расчетного судна, в результате чего задача сводится к оптимизации связи *груз – маршрут – расчетное судно*.

Для отдельного рейса в качестве критериев оптимальности принимается минимизация времени рейса и относимых на него затрат, что является стандартной практикой в вопросах управления транспортными системами, что подтверждается, например, работами [1]–[3]. Результат навигации в целом оценивается по показателям: объем перевозок и грузооборот, которые необходимо максимизировать. Общие эксплуатационные затраты за навигацию должны стремиться к минимуму, при этом они имеют прямую зависимость от времени и количества рейсов.

Выбор маршрута и транспортного средства оказывает непосредственное влияние на время рейса и, соответственно, на эксплуатационные затраты. Маршрут на внутреннем водном транспорте формируется по судоходным трассам, представляющим комплекс внутренних водных путей (ВВП), последовательно соединенных между собой, или отдельные речные системы и озера. Альтернативность маршрутов между двумя пунктами практически отсутствует. Этим определяются отличительные особенности внутреннего водного транспорта: линейный характер и постоянность протяженности маршрута. В то же время габариты водного пути по ширине, радиусу закругления и глубине могут существенно отличаться на его различных участках (в данном исследовании преимущественно рассматривается речной участок судоходной трассы). В связи с этим значимым фактором при выборе судна является соответствие его параметров габаритам

водного пути. Таким образом, оптимальное судно должно удовлетворять следующим требованиям: соответствовать характеристикам водного пути, перевозить заданный или максимально возможный объем груза, при этом время его перехода и эксплуатационные затраты будут стремиться к минимальным.

Длительность времени перехода определяется протяженностью судоходной трассы, наличием шлюзов (временем шлюзования), стесненных участков судового хода, поворотов и остановок в пути следования, а также скоростью движения судна по маршруту, зависящей от тактико-технических характеристик состава, нормативных ограничений и условий плавания.

Группировка отдельных несамоходных барж и буксиров позволяет сформировать составное транспортное средство (ББС). При этом поскольку характеристики водных путей на маршруте изменяются, должно быть обеспечено соответствие размеров ББС габаритам каждого из участков ВВП. За счет варьирования числа барж по линиям и рядам и их соответствующей перегруппировки во время выполнения рейса достигается увеличение общей грузоподъемности состава [4], [5]. Стесненные участки ВВП, ограничивающие возможность прохода судна как по их габаритам, так и по скорости движения, представляют собой повороты русла реки или судового хода, узкий судоводный ход, ограниченный мелководьем, пролеты мостов, шлюзованные участки и т. д. Для каждого из них определяются максимальные значения габаритов судна / состава судов, обеспечивающие безопасное прохождение, которые могут существенно отличаться между собой. Перегруппировка судов на маршруте в зависимости от ширины и радиуса закругления водных путей, рассмотренная в работе [4], позволяет преодолеть стесненные участки водного пути составом большей грузоподъемности без изменения числа несамоходных барж, т. е. с сохранением объема перевозимого груза. Применение этого способа делает возможным перевозку большего количества груза за один рейс, тем самым увеличивая общий объем перевозок и грузооборот за навигацию. При этом возникает некоторое противоречие: постоянная связь грузоподъемности и общего времени рейса имеет вариативность и работает двунаправленно. Преодоление разнонаправленности этой связи, возникающее для одного рейса, может произойти при выполнении условия, когда для перевозки одинакового объема груза общее время рейсов с перегруппировкой меньше общего времени рейсов без перегруппировки.

Решение данной задачи позволит выработать план грузовых отправок, адаптированный под заданные параметры объема перевозимого груза и флота, а в качестве метода для решений поставленной задачи предлагается критериальный перебор вариантов с целью определения наиболее оптимального. Это создает вариативный подход к оптимизации перевозок грузов ББС. Изменение конфигурации ББС на маршруте следования позволяет составу пройти стесненные участки ВВП с сохранением первоначального объема груза, однако время нахождения состава в пути увеличивается. Положительное влияние заключается в увеличении перевозимого за один рейс груза или, при ограниченном объеме груза, в сокращении числа рейсов. Отрицательным влиянием является увеличение времени отдельного рейса за счет дополнительных остановок в пути следования, необходимых для перегруппировки состава.

*Целью* исследования, решаемого в рамках цикла научных статей, является разработка математического аппарата для описания модели движения ББС по ВВП, частной задачей данной статьи является определение влияния поворотных участков водного пути на изменение скорости движения переменного по конфигурации ББС по маршруту следования и времени рейса.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Рассматривается участок пути от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера. Каждая точка линии маршрута имеет свои географические координаты. Для решения поставленной задачи используются классические основы теории транспортных процессов, описывающие движение одиночного транспортного средства во взаимодействии с окружающей средой. Новым в данной работе является учет особенностей, присущих исключительно водному транспорту, а именно

*линейность маршрута.* Дополнительно учитываются такие факторы, как изменение скорости движения на поворотных участках, в узкостях акватории и при искусственных ограничениях водного пути. Таким образом, новая задача может быть решена за счет построения матриц расстояний, матриц скоростей, зависимых матриц времени, а также учета дополнительных факторов, раскрывающих технологические особенности изменения конфигурации ББС на маршруте следования.

Интегральное решение данной задачи является весьма затруднительным, поскольку в расчетах необходимо учесть большое число неизвестных факторов и выполнить вариантную проработку, исходя при этом из вариантов структуры ББС. Количество необходимых частных выборов может достигать сотни независимых решений. В работе в качестве основного метода предлагается выполнить анализ возможности прохождения составом судов заданного маршрута, в частности поворотов судового хода, и определить изменение скоростных и временных параметров, возникающее вследствие его перегруппировки в период совершения рейса.

Маршруты от пункта отправления до пункта назначения задаются множеством координатных путевых точек. Расчетный участок водного пути разделен на отдельные прямолинейные участки. Тогда наиболее важным вопросом в логической цепочке расчетов является учет поворотных участков на маршруте следования, оказывающих наибольшее влияние на скоростной режим движения состава и его конфигурацию. Для математической формализации расчетов предлагается следующая модель судового хода: прямолинейные участки описываются двумя последовательными путевыми точками; точки, ограничивающие этот участок, обозначаются как поворотные; вводится ограничение на любые маневры ББС; криволинейные участки описываются последовательным набором путевых точек, находящихся на минимальном расстоянии друг от друга; каждая из точек соответствует заданному маневру (повороту) ББС; в качестве поворотных здесь обозначаются точки, в которых фактор поворота имеет весомое значение относительно проходимого расстояния. Степень декомпозиции криволинейных участков маршрута определяется необходимой точностью расчетов и составляет, как правило, от одного до десяти. Градация может варьироваться в зависимости от длины ББС и его радиуса поворота.

В качестве исходных данных для анализа влияния стесненных участков, в том числе поворотов водного пути, на движение ББС выделяют поворотные точки (такие, в которых происходит маневр ББС). Разработана новая структура построения матриц, в которой из общего массива путевых точек учитываются только поворотные, что существенно сокращает размерность матрицы, выделяя стесненные участки маршрута. Для математического описания поворотных точек предлагается использовать следующие параметры: угол поворота, радиус закругления, ширина маневровой полосы. Всего на исследуемом участке пути было выделено 228 поворотных точек судового хода, которые обозначены  $f_i$ . В работе использован каталог координат из навигационной карты. Полученные координатные точки нанесены на электронную карту и соединены в маршрутную линию (рис. 1) с использованием геоинформационной системы QGIS.

Судно при прохождении маршрута осуществляет маневренные повороты, причины и характер которых различаются условиями: основная группа — это маневрирование, связанное с естественным судовым ходом и техническими сооружениями, дополнительная группа — маневрирование, связанное с расхождением судов, препятствий и т. п. В данном исследовании рассматривается только основная группа маневров, поскольку она имеет постоянный характер. Расчеты велись в матричной форме с применением программного обеспечения Microsoft Excel и собственного программного обеспечения в Jupyter Notebook с применением библиотек Pandas, NumPy, Matplotlib.

Расстояние между поворотными точками принимается как неизменное (при условии следования судна (состава) по линии судового хода). Время прохождения участков водного пути зависит от скорости движения судна (состава) по каждому из входящих в него участков, т. е. от характеристик прямолинейных и криволинейных участков (поворотов судового хода). Каждая поворотная точка маршрута находится на определенном расстоянии относительно других точек, последовательность которых является неизменной. Для определения и анализа их взаимного расположения строится



скорости на участках водного пути (на участках между поворотами судового хода на маршруте следования:  $f_i$  и  $f_{(i+1)}$ ), где  $i$  — порядковый номер выделенных поворотных точек). Элементы матрицы характеризуют скорость состава между двумя последовательно расположенными поворотными точками, поэтому число строк в общем случае будет соответствовать числу выделенных поворотных точек, уменьшенному на единицу, т. е.  $m = f - 1$ . В целях выполнения расчетов в матричной форме матрица скоростей приведена к размерности матрицы расстояний, что в дальнейшем позволило выполнять расчеты с диагональными матрицами:

$$M_v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{f-1} \end{pmatrix} \leftrightarrow M_v = \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_{f-1} \end{pmatrix}.$$

Определение расчетной скорости может выполняться с применением двух основных вариантных подходов. По первому варианту скорость судна (состава) принимается в зависимости от его тактико-технических характеристик, указанных в паспорте судна (судов состава) с учетом нормативно закрепленных ограничений, действующих на внутренних водных путях. Преимуществами при этом являются простота проведения расчетов для каждого отдельного судна (состава), а также снижение трудоемкости за счет отсутствия необходимости выполнять натурные эксперименты и анализировать практические данные по движению судов. Однако в данном случае снижается точность расчетов, поскольку не производится учет реальных условий судоходства с точки зрения управляемости и маневренных характеристик судна (состава); поправка по условиям плавания определяется теоретическим способом. Наиболее существенное влияние это обстоятельство оказывает на расчеты скорости движения судна на криволинейных участках, снижая их точность. Вторым вариантом — использование фактических данных о движении судов — позволяет уменьшить этот недостаток и обеспечить более точное моделирование поведения судна на каждом отдельном участке водного пути. Данные можно получить с помощью систем удаленного мониторинга судов Автоматической идентификационной системы. В предварительных расчетах может использоваться максимальная скорость из паспорта судна с корректировкой на ограничения по Правилам плавания судов по внутренним водным путям. Тем не менее при более детальном построении работы состава за основу принимается вариант, в котором используются фактические данные о скоростных режимах движения судов как наиболее приближенные к реальным условиям.

Время прохождения судном (составом судов) маршрута и его отдельных участков предметно отражается с помощью построения матрицы времени, которая характеризует влияние изменения скорости судна (состава судов), в том числе на криволинейных участках, на время рейса, а также позволяет показать время, в течение которого судно (состав судов) проходит поворот. Матрица времени ( $M_t$ ) рассчитывается делением матрицы расстояний на преобразованную матрицу скоростей. Элементы матрицы времени ( $t$ ) характеризуют время, необходимое составу для прохождения участка водного пути между двумя поворотными точками. По своей структуре матрица расстояний и матрица времени совпадают:

$$M_t = \frac{M_s}{M_v} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & t_{1f} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ t_{f1} & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

В рамках данной статьи отдельно рассматривается возможность прохождения составом поворотов, определяемая требованиями к скорости и габаритам состава судов. При прочих равных условиях криволинейные участки маршрута предполагают более строгие ограничения по скорости движения и габаритным характеристикам судов (составов судов) по длине и ширине, чем

прямолинейные участки. Снижение скорости, необходимое для совершения маневра, отражается в матрицах скоростей и времени. Возможность прохождения криволинейного участка по радиусу поворота и ширине зависит от характеристик судна (состава судов) и в общем случае имеет альтернативный характер («проходит» – «не проходит»). В статье [4] приведены положения, создающие предпосылки для преодоления линейного подхода, используемого в настоящее время в практике эксплуатации барже-буксирных составов. Предлагается изменять конфигурацию состава на оптимальную для каждого из участков маршрута ВВП в зависимости от их характеристик. Определить способность прохождения состава по участку водного пути и выявить тот, в котором предполагается применить перегруппировку, можно на основе соотношений из [4], [5].

В качестве примера выполнения такого расчета на маршруте от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера рассмотрим повороты на участках 1144–1146 км (70 м, 700 м) и 1157–1158 км (85 м, 600 м) реки Свирь (в скобках, соответственно, приведены гарантированная ширина и гарантированный радиус<sup>1</sup>). Координаты основных поворотных точек: на участке 1144–1146 км: 60.547822, 33.109341; 60.545248, 33.115799; 60.542265, 33.117282; 60.540777, 33.118023; 60.536057, 33.115342; на участке 1157–1158 км: 60.491621, 32.938561; 60.489382, 32.935963; 60.488533, 32.932797. Габариты барж примем на основе анализа, приведенного в статье [6], по результатам которого выявлено три группы барж, зарегистрированных в регистрационной книге Российского Классификационного Общества, с преобладающими значениями длины и ширины. В качестве расчетных примем наибольшие габариты из диапазона первой группы: 37,9 м и 8 м по длине и ширине соответственно. Размеры буксира условно составляют 24 м и 7,2 м. Логическая последовательность расчетов и формулы приведены в табл. 1. Перегруппировка обеспечивает составу проходимость по участкам водных путей с различными габаритными характеристиками при максимальном их использовании без изменения числа барж.

Таблица 1

**Логическая последовательность и пример расчета количества барж в судовом составе, его размеров по длине и ширине**

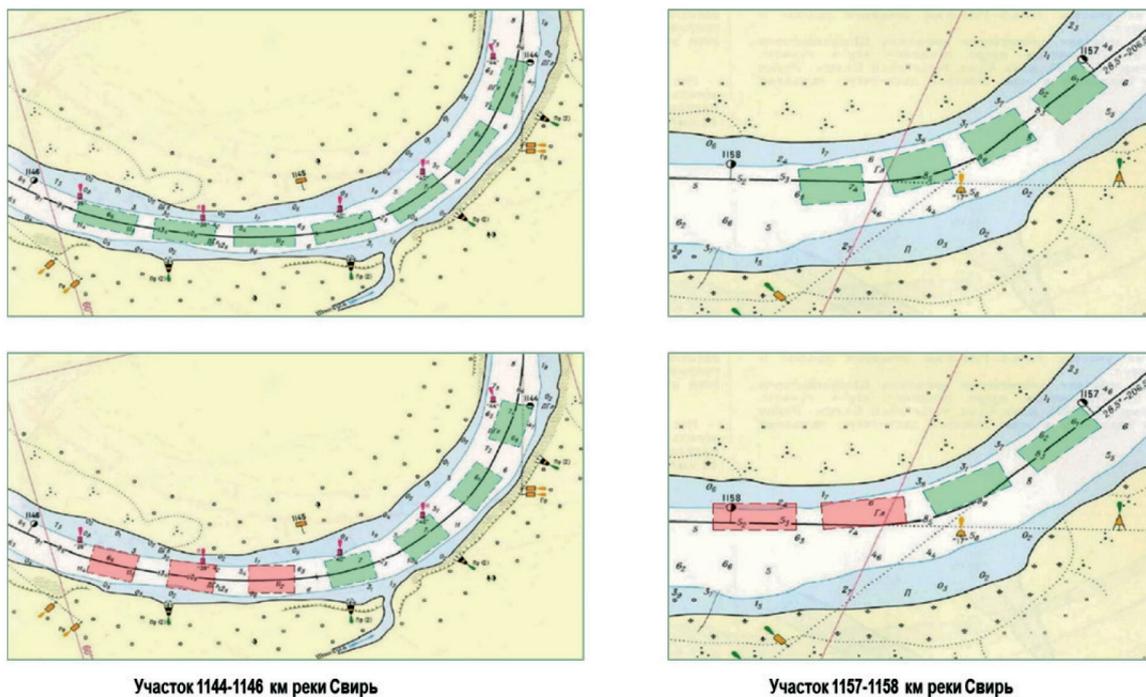
Наименование	Участок 1144–1146 км р. Свирь	Участок 1157–1158 км р. Свирь
Габаритная ширина, м	70,0	85,0
Габаритный радиус, м	700,0	600,0
Формула для определения максимальной длины барже-буксирного состава (для гибкой сцепки)	$l_{TN} = l_u + l_o + l_n \cdot j \leq \frac{R}{3},$ где $l_{TN}$ — длина ББС; $l_u$ — длина буксира-толкача; $l_o$ — длина буксира-тягача; $l_n$ — длина баржи; $j$ — количество рядов в составе; $R$ — радиус поворота участка водного пути	
Максимальная длина барже-буксирного состава, м	233,(3)	200,0
Формула для определения максимальной ширины барже-буксирного состава	$w_{TN} = (w_u \vee w_o \vee w_n \cdot i) \rightarrow \max \leq W(D, d_{TN}),$ где $w_{TN}$ — ширина ББС; $w_u$ — ширина буксира-толкача; $w_o$ — ширина буксира-тягача; $w_n$ — ширина баржи; $i$ — количество линий в составе; $W$ — ширина участка водного пути; $D$ — глубина участка водного пути; $d_{TN}$ — осадка ББС	

<sup>1</sup> Распоряжение Росморречфлота от 29.12.2022 № ЗД-496-р «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2023 года».

Окончание табл. 1

Максимальная ширина ББС, м	70,0	85,0
Длина буксира, м	24,0	
Ширина буксира, м	7,2	
Количество буксиров в составе, ед.	2 (расположены в один ряд)	
Длина баржи, м	37,9	
Ширина баржи, м	8,0	
Максимально возможное число барж в линии, ед.	5	4
Максимально возможное число барж в ряду, ед.	8	10
Количество барж в составе, ед.	40	40
Длина состава при группировке, м	213,5	175,6
Ширина состава при группировке, м	64,0	80,0
Проверка по длине	$213,5 \leq 233,(3)$	$175,6 \leq 200,0$
Проверка по ширине	$64,0 \leq 70,0$	$80,0 \leq 85,0$

Схемы прохождения составом поворотов приведены на рис. 2. ББС обозначен зеленым цветом на участках водного пути при соответствии его размеров габаритам судового хода, красным цветом — на участках, которые ББС не может пройти без изменения конфигурации.



ББС проходит участок водного пути

ББС не проходит участок водного пути

Рис. 2. Схемы прохождения поворотов ББС при различных конфигурациях на участках 1144–1146 км и 1157–1158 км р. Свирь

Для отображения дополнительного времени, необходимого для переформирования состава, предлагается составить матрицу перегруппировки. Ее построение предполагает предварительное определение участков маршрута, преодоление которых невозможно без изменения размеров ББС по длине и ширине. Основная задача данной матрицы — дать комплексное и емкое представление

о числе и расположении поворотных точек на маршруте, для прохождения которых нужно изменить конфигурацию ББС и отразить время, необходимое для перегруппировки состава.

Матрица перегруппировки ( $M_{re}$ ) в качестве элементов ( $t_{re}$ ) включает время перестановки барж и буксиров в составе по линиям и рядам, в результате которой обеспечивается прохождение составом стесненного участка водного пути (в данной работе в качестве таких участков рассматриваются преимущественно повороты судового хода). Элемент будет иметь нулевое значение ( $t_{re} = 0$ ) при отсутствии необходимости осуществлять перегруппировку для следования по соответствующему отрезку маршрута. Главная диагональ состоит из нулевых элементов, так как характеризует время перемещения от точки до этой же точки. Порядок матрицы перегруппировки совпадает с порядком матриц времени и расстояний:

$$M_{re} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & t_{ref} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ t_{ref1} & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица перегруппировки является составной частью интегрального результата, получаемого на основе уточнения исходных матриц времени и скоростей за счет учета остановок в пути следования, необходимых для переформирования состава. Интегральным результатом становятся уточненная матрица времени ( $M'_t$ ) и уточненная матрица скоростей ( $M'_v$ ). Данные матрицы представляют собой соответственно матрицы времени и скоростей, откорректированные с учетом выполнения составом перегруппировки на маршруте. На основе данного математического аппарата выполнены варианты расчета движения состава по участку маршрута от Нижнесвицкого шлюза до Ладожского озера. Сформированная группа матриц является базой для определения влияния стесненных участков водного пути, в том числе поворотов судового хода, на изменение скорости движения ББС и времени рейса, представляя собой инструмент для анализа эффективности перегруппировки в пути следования в зависимости от маршрута и габаритных параметров состава.

### Результаты (Results)

Интегральный результат исследования представлен в двух связанных вариантах: уточненной матрицей времени и уточненной матрицей скоростей. Возникает следующая взаимосвязь матриц: на начальном этапе анализа матрицы расстояний и скоростей составляют основу для построения матрицы времени, матрица перегруппировки выступает независимой матрицей. Определить влияние поворотов на время перехода по маршруту и скорость состава судов можно за счет интеграции матрицы перегруппировки и матриц времени и скоростей соответственно. При этом построение уточненной матрицы скоростей базируется на уточненной матрице времени и матрице расстояний. Полученные матрицы будут являться результирующими, так как они демонстрируют влияние поворотных точек судового хода на скорость состава и его время нахождения на маршруте.

Построение матриц позволяет визуальным образом представить расположение и влияние поворотных точек на прохождение судном маршрута. Математический аппарат расчетных матриц формирует как обобщенное представление о времени, скорости и расстоянии на маршруте, так и детализирует движение судна по заданным участкам водного пути. В процессе выполнения поворота скорость состава уменьшается, при этом ряд криволинейных участков невозможно преодолеть составом определенной конфигурации, необходимо его переформирование. Перегруппировка состава необходима для тех криволинейных участков маршрута, которые состав судов не имеет возможности преодолеть без изменения своих размеров по длине и ширине (ряд участков состав может преодолевать без изменения конфигурации).

В качестве результата получена база для оценки целесообразности осуществления переформирования ББС отдельно для каждого маршрута. Матрица перегруппировки, формирующаяся

по результатам анализа стесненных участков водного пути, в том числе поворотных точек, отражает участки маршрута, для прохождения которых составу необходимо изменить конфигурацию. Она представляет собой инструмент, комплексно показывающий число и расположение мест переформирования состава на маршруте относительно параметров судов и характеристик ВВП. Другим назначением матрицы перегруппировки является уточнение интегрального результата, получаемого на основе взаимодействия всех матриц.

В целях разработки полного комплекса матриц (масштабного вычислительного эксперимента) выполнен анализ поворотных точек судового пути, в ходе которого они рассмотрены с позиции возможного влияния на состав. Так, в укрупненном виде они подразделяются на три типа, создавая трехуровневую модель. Отдельно выделен метауровень, в который входят поворотные точки, где изменение скоростного режима и конфигурации состава не предполагается. Уровни модели имеют следующее описание:

*1-й уровень* — включает поворотные точки ВВП, требующие учета изменения скоростного режима движения судов;

*2-й уровень* — содержит поворотные точки ВВП, требующие переформирования ББС;

*3-й уровень* — составляют поворотные точки ВВП, требующие смены расположения в составе или изменения назначения буксиров, в том числе замены толкачей на тягачи.

Уровень более высокого порядка включает характеристики предыдущих уровней. Поворотные точки второго и третьего уровней являются местами переформирования ББС. При этом одна и так же точка для составов с разными габаритными (длина, ширина, осадка) и маневренными характеристиками может относиться к различному уровню.

На рассматриваемом участке пути маршрута следования характерные поворотные точки (повороты судового хода) были выявлены расчетным способом, в том числе по ранее предложенным методикам [4], [5]. Поворотные точки являются основой для предлагаемого комплекса матриц. Приведем пример построения расчетных матриц для маршрута ББС на участке Волго-Балтийского бассейна от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера. Расчет матрицы расстояний выполнен в геоинформационной системе QGIS с помощью инструмента анализа «Матрица расстояний», определены взаимные расстояния для каждой выделенной точки маршрута в виде базовой характеристики маршрута, служащей основой для планирования движения состава. Предполагается, что ББС движется по линии судового хода, поэтому расстояния между участками принимаются в качестве неизменных. Фрагмент матрицы расстояний приведен на рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1,02	1,36	1,72	1,98	2,41	3,10	3,38	3,64	4,54	4,79	4,94	5,02	5,05	5,17
2	1,02	0	0,34	0,70	0,96	1,45	2,20	2,48	2,72	3,56	3,81	3,95	4,02	4,03	4,16
3	1,36	0,34	0	0,36	0,64	1,18	1,96	2,23	2,46	3,27	3,50	3,63	3,70	3,69	3,82
4	1,72	0,70	0,36	0	0,28	0,88	1,66	1,94	2,15	2,92	3,15	3,27	3,34	3,33	3,48
5	1,98	0,96	0,64	0,28	0	0,63	1,41	1,68	1,88	2,64	2,87	2,99	3,06	3,09	3,25
6	2,41	1,45	1,18	0,88	0,63	0	0,78	1,06	1,28	2,13	2,39	2,54	2,65	2,84	3,10
7	3,10	2,20	1,96	1,66	1,41	0,78	0	0,28	0,54	1,51	1,81	2,01	2,17	2,60	2,97
8	3,38	2,48	2,23	1,94	1,68	1,06	0,28	0	0,27	1,29	1,60	1,81	1,98	2,49	2,91
9	3,64	2,72	2,46	2,15	1,88	1,28	0,54	0,27	0	1,02	1,34	1,55	1,73	2,30	2,74
10	4,54	3,56	3,27	2,92	2,64	2,13	1,51	1,29	1,02	0	0,32	0,55	0,76	1,55	2,07
11	4,79	3,81	3,50	3,15	2,87	2,39	1,81	1,60	1,34	0,32	0	0,23	0,47	1,34	1,87
12	4,94	3,95	3,63	3,27	2,99	2,54	2,01	1,81	1,55	0,55	0,23	0	0,24	1,15	1,69
13	5,02	4,02	3,70	3,34	3,06	2,65	2,17	1,98	1,73	0,76	0,47	0,24	0	0,93	1,46
14	5,05	4,03	3,69	3,33	3,09	2,84	2,60	2,49	2,30	1,55	1,34	1,15	0,93	0	0,53
15	5,17	4,16	3,82	3,48	3,25	3,10	2,97	2,91	2,74	2,07	1,87	1,69	1,46	0,53	0

главная диагональ

Рис. 3. Фрагмент матрицы расстояний, км

Скорость в общем случае ограничена тактико-техническими характеристиками судна (состава судов) и Правилами движения и стоянки судов в бассейнах ВВП с учетом требований

Правил плавания судов по внутренним водным путям. Для составления матрицы скоростей в начальном варианте принято, что скорость судна на всех участках водного пути соответствует тактико-техническим характеристикам состава с поправкой в 30 %. В дальнейшем будут применяться поправки к скорости исходя из угла поворота судового хода. В качестве расчетной принята скорость свободного хода буксира-толкача проекта 908 (20,40 км/ч), уменьшенная на 30 %, что составляет 14,28 км/ч. Основное назначение матрицы скоростей в рамках данных расчетов — показать динамику прохождения составом судов различных участков водных путей. Поскольку в качестве расчетной принята теоретическая скорость движения состава, матрица скоростей в рамках этой статьи не приводится.

Матрица времени характеризует время прохождения составом маршрута при условии соответствия его размерений габаритам каждого из участков водного пути, на котором выполняется рейс, она строится на основе матриц расстояний и скоростей. Фрагмент такой матрицы приведен на рис. 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17	0,22	0,24	0,25	0,32	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36
2	0,07	0	0,02	0,05	0,07	0,10	0,15	0,17	0,19	0,25	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29
3	0,10	0,02	0	0,03	0,04	0,08	0,14	0,16	0,17	0,23	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27
4	0,12	0,05	0,03	0	0,02	0,06	0,12	0,14	0,15	0,20	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24
5	0,14	0,07	0,04	0,02	0	0,04	0,10	0,12	0,13	0,18	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23
6	0,17	0,10	0,08	0,06	0,04	0	0,05	0,07	0,09	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,22
7	0,22	0,15	0,14	0,12	0,10	0,05	0	0,02	0,04	0,11	0,13	0,14	0,15	0,18	0,21
8	0,24	0,17	0,16	0,14	0,12	0,07	0,02	0	0,02	0,09	0,11	0,13	0,14	0,17	0,20
9	0,25	0,19	0,17	0,15	0,13	0,09	0,04	0,02	0	0,07	0,09	0,11	0,12	0,16	0,19
10	0,32	0,25	0,23	0,20	0,18	0,15	0,11	0,09	0,07	0	0,02	0,04	0,05	0,11	0,14
11	0,34	0,27	0,25	0,22	0,20	0,17	0,13	0,11	0,09	0,02	0	0,02	0,03	0,09	0,13
12	0,35	0,28	0,25	0,23	0,21	0,18	0,14	0,13	0,11	0,04	0,02	0	0,02	0,08	0,12
13	0,35	0,28	0,26	0,23	0,21	0,19	0,15	0,14	0,12	0,05	0,03	0,02	0	0,07	0,10
14	0,35	0,28	0,26	0,23	0,22	0,20	0,18	0,17	0,16	0,11	0,09	0,08	0,07	0	0,04
15	0,36	0,29	0,27	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,14	0,13	0,12	0,10	0,04	0

Рис. 4. Фрагмент матрицы времени, ч

В построении матрицы перегруппировки использованы данные о поворотных точках. В данной статье матрица перегруппировки моделируется для обозначения влияния криволинейных участков водного пути на время перехода состава по маршруту. В практических расчетах используются соотношения из [4], [5], реализуемые с помощью программных средств для определения необходимости перегруппировки состава выбранной конфигурации на маршруте в целях его прохождения. На основе фактических данных известно, что на переформирование состава необходимо не менее 15 мин. При этом на практике требуемое время может существенно различаться в зависимости от количества модулей, подлежащих переформированию, и типа сцепных устройств, что оказывает существенное влияние на общее время рейса и обоснованность перегруппировки составов на маршруте. Остановка для изменения конфигурации состава учитывается в период времени прохождения им участка, следующего за переформированием. Скорость во время перегруппировки принимается равной нулю, что снижает значение средней скорости прохождения участка, на котором требуется переформирование состава. Фрагмент матрицы перегруппировки дан на рис. 5.

На фрагментах полученных матриц расстояний, времени и перегруппировки цветом обозначена главная диагональ, на фрагменте матрицы перегруппировки цветом также обозначены участки, перед прохождением которых необходимо осуществить переформирование для их преодоления с имеющимся числом барж и буксиров. Описанные матрицы расстояний, скоростей, времени и перегруппировки являются базовыми для составления

уточненных матриц времени и скоростей, выступающих в качестве результирующих. Они показывают время и динамику прохождения составом маршрута при условии изменения его конфигурации в процессе выполнения рейса.

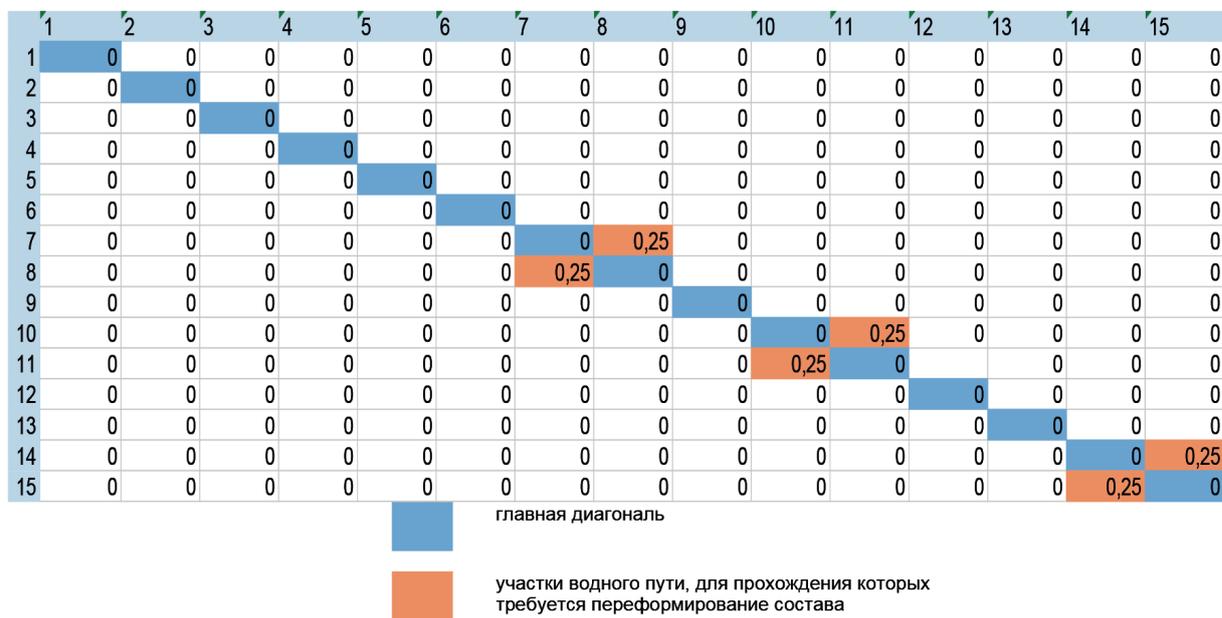


Рис. 5. Фрагмент матрицы перегруппировки, ч

Вариативность стыковки состава во многом определяет целесообразность организации работы ББС с переформированием на ВВП непосредственно во время рейса. Существенным фактором, влияющим на время перегруппировки состава и, соответственно, на эффективность рейса, является способ переформирования состава и тип сцепного устройства. Использование автоматических сцепных устройств создает преимущество по времени и объему проектного груза. При применении для стыковки составных частей ББС полуавтоматических сцепных устройств преимущество по времени в значительной степени снижается или отсутствует, при этом преимущество по проектному грузу сохраняется. Для определения эффективности по времени необходим дополнительный расчет, учитывающий зависимость от длины маршрута, количества модулей, изменяющих положение в составе, и числа участков, требующих перегруппировки. Механические сцепные устройства, предполагающие ручное переформирование, полностью нивелируют преимущества, создаваемые перевозкой большего объема проектного груза за один рейс. При ограниченном числе буксиров в составе этот вариант также может повлечь дополнительные расходы на привлечение дежурных удерживающих буксиров.

Основу определения эффективности рейса составляют объем перевезенного груза и время нахождения судна на маршруте. При одинаковом расстоянии и скорости движения время на перегруппировку состава увеличивает продолжительность рейса, однако это позволяет составу полностью преодолеть маршрут с большим объемом перевозимого груза. Важно понимать, что возможные конфигурации состава по-прежнему находятся в зависимости от «узких мест» маршрута, но тем не менее объем перевозки за один рейс может быть сравнительно увеличен.

Среди факторов, влияющих на целесообразность организации работы ББС с их перегруппировкой на маршруте, можно выделить следующие:

- число мест, в которых необходимо произвести перегруппировку состава относительно протяженности маршрута;
- значение прироста объема перевезенного груза за один рейс;
- используемый тип сцепного устройства.

### Обсуждение (Discussion)

Вопросы маневрирования составов судов в стесненных условиях в научной литературе рассматриваются с различных позиций. Так, в статьях [7], [8] исследуется изменение курса судна: в [7] описывается прибор, предназначенный для измерения угловой скорости поворота судна относительно одной из его осей, в [8] приводятся результаты эксперимента по выполнению маневров поворота на заданный курс (угол), определяющие значение скорости переключки руля и скорости судна во время выполнения поворота. В статье [9] предлагается статистическая модель для анализа и расчета количественных показателей управляемости судна, приведен пример анализа влияния случайных параметров для судна типа «Волго-Балт», авторы которой в качестве критерия безопасности при маневренных операциях, включая прохождение узкостей, предлагают использовать величину риска. В [10] в процессе рассмотрения вопроса маневренных качеств судов в стесненных условиях плавания автором статьи приводятся наглядные примеры, показывающие, что радиус циркуляции кормовой оконечности не может в полной мере характеризовать геометрические параметры циркуляции судна в условиях стесненной акватории, а также отмечается влияние формы корпуса судна на величину максимального радиуса циркуляции оконечности судна и влияние наличия дифферента на изменение ходовой полосы при прохождении криволинейных участков водного пути. Выявлено, что исследования, связывающие маневры состава судов с параметрами водного пути, практически отсутствуют, данные объекты в большинстве случаев рассматриваются отдельно или в качестве ограничительного фактора.

В рамках данной статьи предлагается при прохождении поворотов ББС осуществлять их перегруппировку для наиболее полного использования имеющихся габаритов ВВП. Это возможно за счет того, что состав формируется из отдельных буксиров и барж, от перестановки которых по линиям и рядам зависят общая длина и общая ширина судового состава. В качестве одного из инструментов анализа эффективности такой перегруппировки на маршруте предлагаются приведенные по тексту статьи численные методы с использованием матриц.

Существенной составляющей в процессе реформирования является тип сцепного устройства, поскольку он может оказать определяющее влияние на время, необходимое на перестановку барж и буксиров в составе и, соответственно, на время рейса в целом. Сцепные устройства подробно описываются в статьях различных авторов, например, в [11], где раскрываются основные преимущества и недостатки существующих сцепов, анализируются их характеристики. В качестве рекомендации в указанной ранее статье для судов *река – море*, эксплуатирующихся преимущественно для речных переходов, предлагается использовать сцепные устройства типа «О» или «УДО» в совокупности со стальными тросами, рассчитанными на соответствующие нагрузки. В статье [12] отдельное внимание уделяется автоматическим сцепным устройствам, отмечается многообразие и сложность их конструкций, а также высокий средний возраст.

Для реализации перегруппировки ББС непосредственно на маршруте следования применение автоматических сцепных устройств представляется наиболее эффективным. Данный тип устройств позволяет сократить время стыковочного процесса за счет отсутствия ручных операций, т. е. время, необходимое для остановки на перемещение буксиров и барж, уменьшается, в результате чего максимизируются преимущества, создаваемые реформированием состава.

### Заключение (Conclusion)

Перегруппировка ББС позволяет увеличить объем перевозимого за один рейс груза, что приводит к дополнительным остановкам на пути следования, увеличивающим время рейса. Анализ распределения времени, необходимого для прохождения маршрута, в том числе при преодолении криволинейных участков водного пути, и скорости движения судна становится одним из элементов определения целесообразности изменения конфигурации состава в пути следования. В настоящей статье предложен комплекс математических инструментов для оценки влияния поворотов водного пути на скорость движения судна при их прохождении и время рейса, в том числе при перегруппировке состава.

В ходе исследования при решении поставленной задачи достигнуты следующие результаты.

1. Сформулированы математические основы для расчетов в матричной форме изменения времени и скорости при движении ББС по маршруту, в том числе вследствие изменения его конфигурации.
2. Предложена трехуровневая модель поворотных точек ВВП.
3. Выполнен анализ участка маршрута от Нижнесвирского шлюза до Ладожского озера, выбраны поворотные точки и определены их координаты.
4. Приведено описание построения системы матриц, в том числе матрицы перегруппировки.
5. Определены основные факторы, влияющие на эффективность применения перегруппировки ББС на маршруте при прохождении им стесненных участков водного пути.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин А. В. Управление транспортными потоками в интеллектуальной транспортной системе / А. В. Галкин, А. С. Сысоев // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. — 2020. — Т. 6. — С. 32–35.
2. Мойсеенко С. С. Структура комплекса задач оптимального проектирования мультимодальных грузоперевозок / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер // Балтийский морской форум. Материалы VI Международного Балтийского морского форума, в 6 томах. — Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2018. — Т. 2. — С. 45–51.
3. Тимошек Е. С. Аналитический обзор моделей и методов в управлении работой флота / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 4 (101). — С. 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomtl01/7.
4. Жидкова А. М. Оптимизация конфигурации барже-буксирных составов в зависимости от габаритных и навигационных характеристик внутренних водных путей / А. М. Жидкова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 722–735. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-722-735.
5. Патент 2786282 Российская Федерация, МПК В63В 21/62. Способ формирования судового состава / А. М. Жидкова, Е. О. Ольховик; заявл. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. № 2022121005; заявл. 02.08.2022; опубл. 19.12.2022, бюл. № 35.
6. Жидкова А. М. Возможность применения зарубежного опыта эксплуатации барже-буксирных составов в системе водного транспорта России / А. М. Жидкова // Логистика: современные тенденции развития. Материалы XXII Международной научно-практической конференции. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2023. — С. 177–186.
7. Довгоброд Г. М. Универсальный измеритель скорости поворота для морских и речных судов / Г. М. Довгоброд // Морское оборудование и технологии. — 2020. — № 2 (23). — С. 14–16.
8. Мельник В. Г. Исследование взаимного изменения элементов поворота судна / В. Г. Мельник, А. Н. Штанько // Эксплуатация морского транспорта. — 2018. — № 3 (88). — С. 44–48.
9. Виноградов В. Н. Анализ влияния случайных параметров судна на управляемость и безопасность / В. Н. Виноградов, Н. В. Ивановский, Д. А. Новоселов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 169–181.
10. Клементьев А. Н. Влияние различных факторов на ширину ходовой полосы судна при прохождении поворотов / А. Н. Клементьев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 226–228.
11. Егоров Г. В. Анализ сцепных устройств для толкания морских и речных составов / Г. В. Егоров // Вісник Одеського національного морського університету. — 2014. — № 3. — С. 54–71.
12. Преснов С. В. Автоматические сцепные устройства эксплуатируемых толкаемых составов класса Российского речного регистра / С. В. Преснов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2012. — № 67 (351). — С. 109–116.

## REFERENCES

1. Galkin, A. V., and A. S. Sysoev. “Controlling traffic flows in intelligent transportation system.” *Proceedings of the International Conference Mathematical Methods in Technique and Technologies* — ММТТ 6 (2020): 32–35.

2. Moysenko, Sergey, and Leonid Meyler. "A structure of a complex of problems of optimal designing multimodal cargo transportation." *Baltijskij morskoy forum. Materialy VI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma*. Vol. 2. Kaliningrad: Kaliningradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2018. 45–51.

3. Timoshek, E. S., and T. E. Malikova. "Analytical review of models and methods in fleet management." *Jekspluatatsija morskogo transporta* 4(101) (2021): 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomt101/7.

4. Zhidkova, Anastasiya M. "Optimization of the barge-towing combinations configuration depending on the overall and navigational characteristics of inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 722–735. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-722-735.

5. Zhidkova, A. M., and E. O. Ol'hovik. RU 2 786 282 C1, IPC B63B 21/62. Sposob formirovaniya sudovogo sostava. Russian Federation, assignee. Publ. 19 Dec. 2022.

6. Zhidkova, A. M. "Applying foreign experience of the barge-towing trains operation in the Russian water transport system." *Logistika: sovremennye tendencii razvitija. Materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii*. SPb.: Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2023. 177–186.

7. Dovgobrod, G. M. "Universal Turn Speed Meter for Sea and River Vessels." *Morskoe oborudovanie i tehnologii* 2(23) (2020): 14–16.

8. Melnik, V. G., and A. N. Shtanko. "The study of the mutual change of the elements of the rotation." *Jekspluatatsija morskogo transporta* 3(88) (2018): 44–48.

9. Vinogradov, V. N., N. V. Ivanovsky, and D. A. Novoselov. "The random parameters influence analysis on the vessel manoeuvrability and safety." *Bulletin of VSAWT* 55 (2018): 169–181.

10. Klementyev, A. N. "Influence of various factors on width of a running strip of a vessel at passage of turns." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2012): 226–228.

11. Egorov, G. V. "Analiz sčepnyh ustrojstv dlja tolkanija morskikh i rečnyh sostavov." *Visnik Odes'kogo nacional'nogo mors'kogo universitetu* 3 (2014): 54–71.

12. Presnov, S. V. "Avtomaticheskie sčepnye ustrojstva jekspluatiruemyh tolkaemyh sostavov klassa Ros-sijskogo rečnogo registra." *Trudy Central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika AN Krylova* 67(351) (2012): 109–116.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Жидкова Анастасия Михайловна** —  
ведущий специалист по управлению проектами  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [zhidkovaam@gumrf.ru](mailto:zhidkovaam@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Zhidkova, Anastasiya M.** —  
Leading Project Management Specialist  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [zhidkovaam@gumrf.ru](mailto:zhidkovaam@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2023 г.

Received: November 9, 2023.