

## OPTIMIZATION OF THE BARGE-TOWING COMBINATIONS CONFIGURATION DEPENDING ON THE OVERALL AND NAVIGATIONAL CHARACTERISTICS OF INLAND WATERWAYS

**A. M. Zhidkova**

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

*The organization of transportation by inland water transport involves taking into account the overall characteristics and navigational features of waterways, the choice of a vessel to work on the route, ensuring the safety of navigation and the economic efficiency of the voyage. One of the main advantages of barge-towing combinations is the possibility of their formation according to the specified dimensions of the waterway. The purpose of this work is to overcome the linear approach currently used in the formation of the ship's composition, and to develop mathematical foundations for describing the barge-towing combination control system, a particular task is to optimize the barge-towing combination structure for local restrictions of waterway sections. To solve this problem, the possibility of reorganizing the ship's composition directly on the route, depending on the conditions for the passage of a particular section of inland waterways is supposed to study in the work; it in the future will improve the transportation efficiency and ensure the transportation of more cargo per voyage. For the mathematical description of inland waterways, their natural characteristics are used in the work, sections coincided in restrictive features are identified, that is, each section of inland waterways, depending on its type, has a certain set of restrictions related to overall characteristics that must be taken into account when organizing navigation. The simulation of the movement of a ship's combination along sections of waterways of various types, including a curved section, performed by graphic-analytical methods, shows the limitations arising when entering a turn and passing through artificial narrowings of the fairway, and also reflects the ability to pass the entire route due to a change in configuration when maintaining the total carrying capacity of the ship's combination. As a result, mathematical relations and a system of inequalities that determine the choice of a section of inland waterways for the operation of ship's combinations in a certain (specified) configuration and planning their reformation according to the given characteristics of the waterway are obtained.*

*Keywords: water transport, barge-towing combinations, ship's composition, reformation of ships composition, classification of inland waterways, overall characteristics of inland waterways, fleet management.*

**For citation:**

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.

**УДК 656.62**

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ БАРЖЕ-БУКСИРНЫХ СОСТАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГАБАРИТНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

**А. М. Жидкова**

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

*Темой исследования является организация перевозок внутренним водным транспортом, в частности, учет габаритных характеристик и навигационных особенностей водных путей, выбор судна для работы на маршруте, обеспечение безопасности плавания и экономической эффективности рейса. Отмечается, что одним из основных преимуществ барже-буксирных составов является возможность их формирования под заданные размеры водного пути. Однако в практике эксплуатации преимущественно используется*

линейный подход, предполагающий транспортировку груза на всем протяжении маршрута при постоянном составе и количестве несамоходных барж и буксиров. Целью данной работы является преодоление линейного подхода, используемого в настоящее время при формировании судового состава, и разработка математических основ для описания системы управления барже-буксирными составами, частной задачей — оптимизация структуры барже-буксирных составов под локальные ограничения участков водного пути. Для решения поставленной задачи в работе предполагается изучение возможности реформирования состава судов непосредственно на маршруте в зависимости от условий прохождения того или иного участка внутренних водных путей, что в будущем позволит повысить эффективность перевозок и обеспечить перевозку большего объема груза за один рейс. Для математического описания внутренних водных путей в работе использовались их естественные характеристики, были выделены участки, совпадающие по ограничительным признакам, т. е. каждый участок внутренних водных путей в зависимости от своего типа имел определенный набор ограничений, связанных с габаритными характеристиками, которые необходимо учитывать при организации судоходства. Выполненное графоаналитическими методами моделирование движения судового состава по участкам водных путей различных типов, в том числе по криволинейному участку, показывает ограничения, возникающие при вхождении в поворот и прохождении искусственных сужений судового хода, а также отражает способность прохождения всего маршрута за счет смены конфигурации при сохранении общей грузоподъемности состава. В результате получены математические соотношения и система неравенств, определяющие выбор участка внутренних водных путей для эксплуатации составов в определенной (заданной) конфигурации и планирования их реформирования под заданные характеристики водного пути.

*Ключевые слова:* водный транспорт, барже-буксирные составы, судовый состав, реформирование состава судов, классификация внутренних водных путей, габаритные характеристики внутренних водных путей, управление работой флота.

**Для цитирования:**

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.

## **Введение (Introduction)**

Одним из существенных преимуществ внутреннего водного транспорта является широкая возможность использования и формирования состава судов под заданное количество груза. На практике такая возможность реализуется за счет применения барже-буксирных составов ((ББС), судовых составов, составов судов), конструктивные особенности которых позволяют осуществлять группировку барж под необходимый объем проектного груза. Комбинирование разного количества барж и буксиров различной мощности создает возможность оптимальным образом использовать судно в зависимости от его производительности. При одинаковой общей грузоподъемности осадка состава, как правило, меньше, чем осадка самоходного судна, что позволяет увеличить массу перевозимого за один рейс груза. Указанные преимущества более подробно рассмотрены, например, в работах [1]–[3].

В статье [4] автор отмечает, что главные размерения ББС устанавливаются максимально приближенными к габаритным ограничениям тех водных путей, для работы на которых они предназначены. Соответственно количество одновременно буксируемых или толкаемых несамоходных судов или барж ограничено следующими условиями судоходства на конкретном участке водного пути: шириной судового хода или полосы маневрирования, радиусом его кривизны и габаритами надводных сооружений (шириной камер шлюзов, пролетов между опорами мостов и т. п.).

Для ряда бассейнов внутренних водных путей в России разработаны типовые схемы формирования составов судов, регламентируемые правилами движения и стоянки судов в бассейнах (например, [5]). Предложенные в правилах схемы формирования составов, которые зависят от характеристик участков водных путей, устанавливают минимально допустимую мощность буксира, максимальную грузоподъемность, разрешенную габаритную длину и ширину состава. При формировании состава необходимо учитывать надводный габарит.

Целью данного исследования является преодоление линейного подхода при формировании судового состава и разработка математических основ для описания системы управления ББС,



Для ряда участков ВВП устанавливается гарантированная глубина, ширина и гарантированный радиус судового хода, величина которых может существенно отличаться. На реке Волге в пределах Волжского бассейна гарантированная ширина варьируется от 80 м (участок Городецкий шлюз — г. Городец) до 400 м (участок г. Казань — Самарский шлюз), глубина от 3,5 м (от Городецкого шлюза до г. Балахна) до 4,0 м (включает ряд участков), гарантированный радиус — от 700 м (участок Волгоградский шлюз — г. Ахтубинск) до 2 500 м (участок г. Казань — Самарский шлюз). На реке Ангара в Енисейском бассейне минимальная гарантированная ширина составляет 45 м (участок Богучанская ГЭС — с. Богучаны), максимальная — 300 м (обеспечивается от Усть-Илимской до Богучанской ГЭС), глубина варьируется от 0,9 м (участок Богучанская ГЭС — с. Богучаны) до 2,0 м (от Усть-Илимской ГЭС до Богучанской ГЭС), гарантированный радиус на всем протяжении реки составляет 250–300 м. Значения гарантированной ширины и гарантированного радиуса приведены по Распоряжению Росморречфлота от 27.12.2021 № АЛ-595-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 2022 года». При этом из применения линейного подхода в практике эксплуатации следует, что ББС на всем протяжении маршрута сохраняет начальную конфигурацию и выбранные размеры по длине и ширине. В то же время особенности формирования состава (ББС состоит из отдельных несамоходных барж и буксиров) позволяют путем перестановки несамоходных барж изменять его размерения. В случае, если ББС в начальной конфигурации по своим параметрам не может пройти участок водного пути, представляется возможным осуществлять его переформирование. В связи с этим предлагается разделить маршрут, выделив локальные участки в зависимости от судоходных (навигационных) условий.

Для описания различных участков водного пути предлагается следующая классификация:

*A* — прямолинейный участок, не имеющий естественных ограничений для движения судов, который обладает достаточной и необходимой шириной судового хода для выбранного варианта барже-буксирного состава;

*B* — криволинейный (радиусный, поворотный) участок, имеющий естественные ограничения по радиусу поворота судна, ширине судового хода для выбранного варианта барже-буксирного состава и естественное ограничение по скорости движения;

*C* — прямолинейный участок, имеющий искусственные ограничения по ширине судового хода (шлюзы), надводному габариту (ширина пролетов мостов) и скорости движения.

ВВП определяются габаритными характеристиками. Для обозначения их принадлежности одному из типов участков (*A*, *B*, *C*), описанных ранее, примем соответствующие индексы *a*, *b*, *c*. В случае, если необходимо указать вид искусственного ограничения на участке типа *C*, будем использовать следующие индексы: для шлюзов — *l*, для пролетов мостов — *s*. Характеристики, относящиеся к судовому составу, обозначаются индексом *TN*. Индекс *max* используется для параметров или характеристик, принимаемых в качестве максимальных, индекс *std* — для параметров или характеристик, установленных правилами, стандартами и т. п.

Для обозначения длин участков водного пути будем использовать следующие обозначения с соответствующими индексами:  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ .

Для обозначения характерной ширины судового хода будем использовать следующие обозначения:  $W_a$ ,  $W_b$ ,  $W_c$ . При этом выполняется следующее условие:  $W_a > W_b > W_c$ . Искусственные ограничения по ширине судового хода в виде шлюзов обозначим  $W_l$ , ширину пролетов мостов —  $W_s$ . При этом ширина судового хода зависит от глубины участка водного пути (*D*) и осадки судна (состава) ( $d_{TN}$ ), т. е.  $W_a(D_a, d_{TN})$ ,  $W_b(D_b, d_{TN})$ ,  $W_c(D_c, d_{TN})$ .

Параметр минимального радиуса поворота судна относится только для участков типа *B*, поэтому будем его обозначать как  $R_b$ , при этом параметры  $R_a = R_c = 0$ .

Максимальную скорость движения на участке водного пути будем обозначать  $V_a^{\max}$ ,  $V_b^{\max}$ ,  $V_c^{\max}$ , при этом на участках типа *A* параметр скорости  $V_a$  ограничен только тактико-техническими характеристиками судового состава ( $v_{TN}$ ) и правилами движения по бассейнам ВВП ( $V_{std}$ ), т. е.  $V_a \in [0; V_a^{\max}]$ , на участках типа *B* максимальная скорость дополнительно ограничена и зависит от радиуса  $R_b$ , т. е.  $V_b \in [0; V_b^{\max}(R_b)]$ , на участках типа *C* максимальная скорость дополнительно ограничена стесненной шириной судового хода, т. е.  $V_c \in [0; V_c^{\max}(W_c)]$ .

Схема предлагаемой классификации участков водных путей приведена на рис. 2.

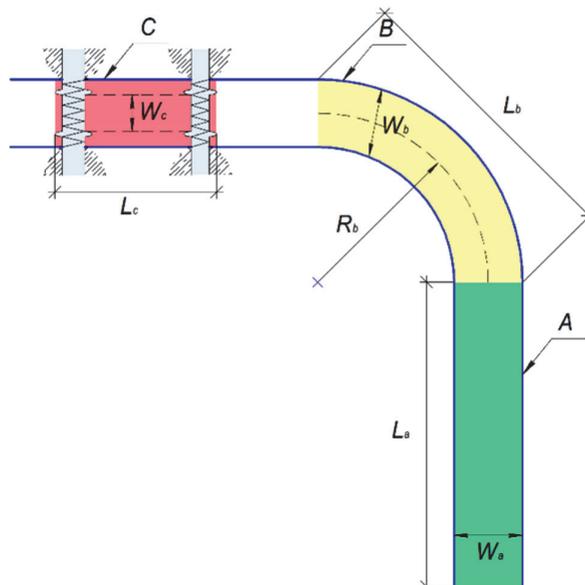


Рис. 2. Схема предлагаемой классификации участков водных путей

ББС формируются из несамоходных барж и буксиров, которые могут принимать различные конфигурации по числу барж в ряд и линию. Движение таких составов осуществляется методом буксировки или толкания, т. е. буксир используется в качестве тягача или толкача, в отдельных случаях как маневренный буксир.

Введем следующие обозначения:

- количество несамоходных барж — всего  $N$ ;
- количество буксиров: всего  $T$ , из них толкачей  $T_u$  и тягачей  $T_o$ ;
- маневренный буксир  $T_m$ .

Для обозначения параметров судов будут использоваться индексы: для барж —  $n$ , для буксиров-толкачей —  $u$ , для буксиров-тягачей —  $o$ , для маневровых буксиров —  $m$ .

Длина барж и буксиров обозначается как  $l$  с соответствующими индексами:  $l_n$ ,  $l_u$ ,  $l_o$  и  $l_m$ , ширина —  $w$ , т. е.  $w_n$ ,  $w_u$ ,  $w_o$  и  $w_m$ .

Буксиры могут различаться по мощности. Параметр мощности обозначим  $P$ . При этом баржи внутри состава могут быть представлены в различных вариантах (по рядам и линиям) и обозначены:

- максимально возможное количество линий в составе —  $i$ ;
- максимально возможное количество рядов —  $j$ .

Тогда каждая баржа в зависимости от места расположения в составе будет иметь обозначение  $n_{i,j}$ .

Габаритные размеры ББС будут различаться исходя из выбранной конфигурации, длину и ширину состава обозначим  $l_{TN}$  и  $w_{TN}$  соответственно, при этом в общем виде  $l_{TN} = l_u + l_o + l_n j$ ,  $w_{TN} = w_u \vee w_o \vee w_n i \rightarrow \max$ .

Схематично изображения судов (несамоходных барж и различных видов буксиров) будем представлять в виде, приведенном на рис. 3.

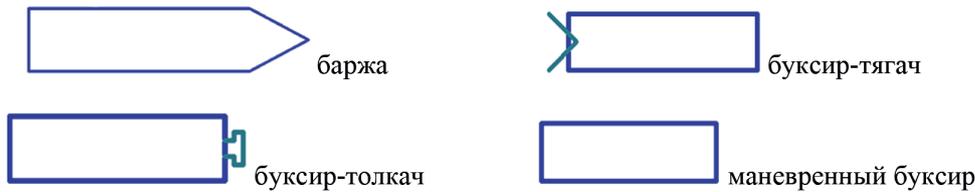


Рис. 3. Условные обозначения судов: несамоходных барж и различных видов буксиров

На рис. 4 приведены варианты группировки состава из шести барж и одного-двух буксиров, предназначенных для эксплуатации на водных путях различных типов.

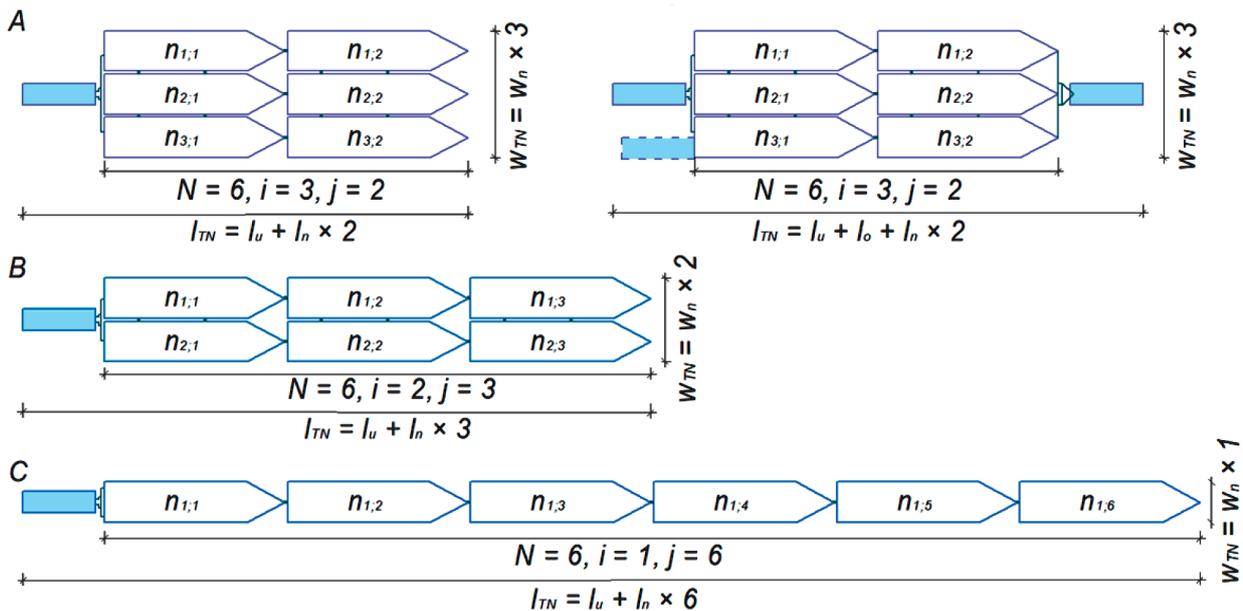


Рис. 4. Варианты группировки состава из шести барж и одного-двух буксиров

Площадь, необходимая для движения судна, определяется шириной маневровой полосы. Для обеспечения безопасного прохода судового состава ширина маневровой полосы не должна превышать ширину судового хода. Это особенно важно учитывать при определении возможности совершить поворот на участке судового хода с заданным минимальным радиусом кривизны (радиусом поворота). Действующими правилами плавания судов по ВВП минимальный запас по ширине не установлен. Исходя из этого можно считать, что он определяется практикой судовождения.

Принципы прохождения участков ВВП, приведенные в [9], характеризуют следующее:

- при увеличении радиуса кривизны судового хода ширина, необходимая для прохождения судна (состава), уменьшается, что особенно выражено при небольших отношениях радиуса кривизны к длине судна (состава));
- разность между необходимой шириной маневровой полосы при движении вниз и вверх уменьшается (при уменьшении скорости движения судна относительно воды эта разность возрастает).

На ширину маневровой полосы оказывает влияние ряд факторов, которые подразделяются на внутренние (относящиеся к судну / составу судов) и внешние (относящиеся к условиям окружающей среды). *Внутренние факторы* — тактико-технические характеристики состава (габаритные размеры буксиров и барж в составе, мощность буксира, скорость движения состава, период рыскания) и его конфигурация, от которых зависит маневренность состава. *Внешние факторы* —

характеристики судового хода, скорость и направление течения, сила и направление ветра, волнение; в расчетах характеризуются углом сноса от течения, углом ветрового дрейфа, углом дрейфа от волнения соответственно. В статье [9] отмечается влияние фактического уровня воды на проводку судна по ВВП, что также относится к внешним факторам. Это связано с тем, что от уровня воды зависят фактические значения габаритов судового хода, которые, в свою очередь, оказывают влияние на характер управления судном (снижение рыскания, изменение скорости движения), в том числе за счет воздействия гидродинамических сил на корпус судна и инерционных движений, возникающих при изменении соотношения глубины и осадки.

Вопросы учета внешних факторов и их влияния на управляемость и маневренность судов рассматриваются в [10]–[14]. Так, в [10] приводится разработанная методика решения задач безопасного маневрирования для водоизмещающих судов на акватории ограниченной глубины в условиях ветра и течения, включающая расчетную оценку возможности выполнения маневра и тренажерное моделирование. В статьях Г. И. Мартюка, Ю. И. Юдина, А. Ю. Юдина [11]–[14] исследовано влияние ветра, волнения и мелководья на параметры маневрирования судна во время швартовной операции и определен способ их математического описания.

Важной особенностью движения состава является то, что характер движения каждого из объектов передается другому, причем взаимодействие осуществляется в обоих направлениях. Одним из результатов [15] является математическая модель динамики буксирного состава при различных путевых и метеорологических условиях, а также выработанные на основе изучения влияния внешней среды рекомендации по уменьшению ветровой нагрузки при прямолинейном и циркуляционном движении состава. В [16] приводятся результаты исследований характеристик движения и элементов маневрирования судов при ветре в различных условиях плавания, в том числе в стесненной акватории.

В статье [17] предлагается программный продукт MANSIM, позволяющий решить задачи моделирования маневрирования судов в конфигурации *один руль — один винт* и *два руля — два винта*, а также приводится описание программного кода и его теоретические основы. MANSIM позволяет моделировать как определенные маневры судов (поворот и зигзаги), так и свободный маневр с неограниченным количеством отклонений руля. Преимуществом является то, что программа может выполнять расчеты с минимальным набором данных (основные размеры судна), при отсутствии входных параметров, относящихся к корпусу, винту или рулю (они рассчитываются с применением эмпирических соотношений, встроенных в программное обеспечение). Программный продукт позволяет получить базовое понимание маневренных возможностей судна. На данном этапе разработки не учитываются внешние факторы (ветер, течение, волны), однако авторы [17] работают над расширением его возможностей.

### Результаты (Results)

С использованием разработанного математического аппарата представляется возможность графоаналитического решения отдельных задач, такие решения являются условными, поскольку не учитывают все пространство внешних и внутренних факторов, но являются наиболее эффективными для предварительной оценки возможности прохождения выбранного варианта судового состава на участке водного пути. Более точное решение можно получить с использованием специализированных программных продуктов, таких как MANSIM [17], или с помощью моделирования на навигационном тренажере, что является достаточно трудоемкой задачей, поскольку требует создания соответствующего района плавания и математической модели судового состава.

Траектория движения судна на прямолинейных участках считается линейно направленной по ходу его движения (маневровая полоса незначительно отклоняется из стороны в сторону). Поэтому конфигурация состава для участков типа *A* и *C* условно определяется шириной состава, которая не должна превышать ширину судового хода. Предполагается, что участок типа *A* не имеет существенных ограничений по ширине судового хода, поэтому для его прохождения выбирается конфигурация состава с оптимальными навигационными характеристиками (маневренность, управ-

ляемость, сопротивление и прочее). Участок типа *C* имеет искусственные ограничения, узкий судовый ход, что оказывает существенное влияние на ширину состава при выборе его конфигурации.

Способность судна войти в поворот на криволинейном участке (участок типа *B*) определяется его радиусом поворота, который не должен превышать радиус кривизны судового хода. Траектория маневровой полосы зависит от угла поворота руля и расстояния, которое проходит судно за один поворот руля. В равных условиях состав меньшей длины войдет в поворот с меньшим радиусом закругления. Это означает, что на участках типа *B* выбор конфигурации состава по длине и ширине одновременно зависит от радиуса кривизны и ширины судового хода. Отмечается, что на криволинейных участках водного пути ширина маневровой полосы при сопоставимых условиях за счет особенностей движения судна больше, чем на прямолинейных, однако в данном случае задача прохождения поворота будет решаться графическими методами без учета возможных отклонений от принятого курса.

Построение графической модели выполнялось в системе трехмерного моделирования «КОМПАС-3D» в масштабе 1 : 1000. Состав включал один буксир-толкач и шесть несамоходных барж. Габаритные размеры судов приняты по данным Регистровой книги Российского классификационного общества: буксир-толкач (пр. 81353) —  $l_u = 24$  м,  $w_u = 7,2$  м; несамоходная баржа-площадка (пр. 81218) —  $l_n = 59,5$  м,  $w_n = 13,4$  м. Конфигурация состава на участках водного пути *A*, *B* и *C* приведена на рис. 5.

Для прохождения участка, отнесенного к типу *A*, была выбрана конфигурация в три ряда и две линии несамоходных барж с буксиром-толкачом, удовлетворяющая условию  $w_{TN} \leq W_a$  и обладающая оптимальными навигационными характеристиками. Радиус поворота БТС при прохождении поворота определялся при следующих заданных условиях: угол поворота руля был принят равным  $15^\circ$ , что считается стандартной практикой судовождения; за один поворот руля БТС передвигался на расстояние, равное своей длине, увеличенной на 10 %. Из точки начала движения состав проходит два условно принятых расстояния, после чего последовательно начинает осуществлять поворот. Из рис. 5 видно, что радиус поворота состава из трех рядов и двух линий несамоходных барж превышает радиус кривизны судового хода, поэтому он не может войти в поворот, в то время как состав из двух рядов и трех линий по радиусу поворота и своей ширине вписывается в данный криволинейный участок (тип *B*). Участок типа *C* ограничен по ширине настолько, что позволяет безопасно пройти по ширине только составу в одну линию.

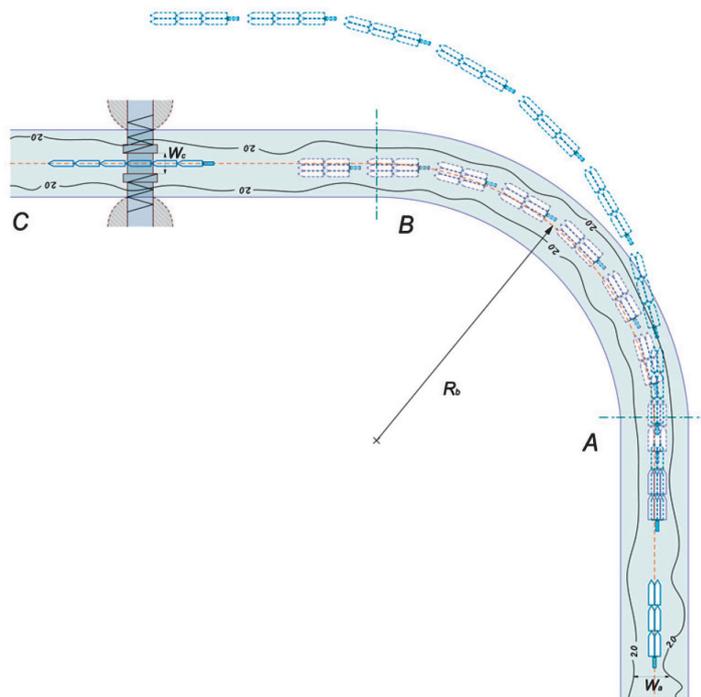


Рис. 5. Конфигурация состава на участках водного пути типов *A*, *B* и *C*

В общем виде длина и ширина ББС при их выборе для конкретного участка водного пути должна соответствовать следующим соотношениям:

$$w_{TB} = (w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max \leq W(D, d_{TN}); \quad (1)$$

– для гибкой сцепки:

$$l_{TB} = l_u + l_o + l_n j \leq \frac{R_b}{3}; \quad (2)$$

– для жестко соединенных (учаленных) составов судов:

$$l_{TB} = l_u + l_o + l_n j \leq \frac{5R_b}{3}. \quad (3)$$

*Примечание.* В зависимости от типа сцепа и при выборе габаритов ББС применяются совместно формулы (1) и (2) или (1) и (3).

При определении конфигурации состава для всего заданного пути в целом ее выбор в зависимости от типов участков водного пути математически можно представить следующим образом:

– для гибкой сцепки:

$$\begin{cases} A \langle = \rangle (W_a(D_a, d_{TN}) \geq ((w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max)); \\ B \langle = \rangle (W_b(D_b, d_{TN}) \geq ((w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max)) \wedge \left( \frac{R_b}{3} \geq (l_u + l_o + l_n j) \right); \\ C \langle = \rangle (W_c(D_c, d_{TN}) \geq ((w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max)); \end{cases} \quad (4)$$

– для жестко соединенных (учаленных) составов судов:

$$\begin{cases} A \langle = \rangle (W_a(D_a, d_{TN}) \geq ((w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max)); \\ B \langle = \rangle (W_b(D_b, d_{TN}) \geq ((w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max)) \wedge \left( \frac{5R_b}{3} \geq (l_u + l_o + l_n j) \right); \\ C \langle = \rangle (W_c(D_c, d_{TN}) \geq ((w_u \vee w_o \vee w_n i) \rightarrow \max)). \end{cases} \quad (5)$$

*Примечание.* Коэффициенты в соотношениях (2)–(5) получены на основе формул [18].

Таким образом, полученные соотношения позволяют на начальном этапе определить оптимальную конфигурацию ББС для эксплуатации на участке ВВП в зависимости от характеристик судового хода по маршруту следования.

### Обсуждение (Discussion)

В соответствии с Европейской классификацией [19] участки ВВП разделены на классы, определяемые на основе стандартных параметров судна. Для самоходных судов и толкаемых составов по каждому классу установлены максимальная длина, ширина и осадка, минимальная высота прохода под мостами, а также тоннаж. При этом предусмотрена иерархия классов, обеспечивающая возможность эксплуатации судов в своем классе и в классах более высокой категории. Тем не менее ВВП международного значения имеют преимущественно более прямолинейные условия судоходства, чем в целом сеть ВВП, расположенных на территории России. Предлагаемая в рамках статьи классификация по типам участков ВВП отдельно учитывает криволинейные участки, влияющие на габаритные характеристики судов, а также возможную скорость движения.

Предметом исследования в статье [20] являются методы отбора типоразмеров ББС для организации их работы по определенной схеме движения. Рассматривается способ организации работы ББС, заключающийся в маршрутной отпавке, при этом буксир может как закрепляться за определенным составом несамоходных барж (сквозная форма тяги), так и переходить на другой

заранее подготовленный состав без ожидания разгрузки барж (сменная форма тяги). Отмечается, что на габаритные параметры составов в высокой степени оказывают влияние физико-географические факторы, в том числе район плавания, прямолинейность, кривизна, ширина, глубина, извилистость судового хода, наличие шлюзов, при этом вопрос переформирования ББС на маршруте не рассматривается, в предлагаемой имитационной модели эти факторы выступают в качестве ограничительных. Возможность смены тяги в пунктах погрузки-выгрузки предусматривается во избежание излишнего простоя буксиров, в то же время предполагается организация работы в относительно равных условиях плавания, без переформирования и догрузок / выгрузок в процессе выполнения рейса.

Предложенный в настоящей работе математический аппарат определяет предпосылки для снижения ограничительных воздействий ширины и радиуса кривизны судового хода на габаритные параметры ББС. На данном этапе для наглядности и упрощения расчетов не учитывается большинство внутренних и внешних факторов, влияющих на движение состава, что позволяет раскрыть базовую суть предлагаемого решения.

Моделирование движения составов в условиях недостатка глубин и стесненных акваториях является актуальной практической задачей. Авторами [14] такой вопрос решался для лимитирующего участка от г. Уфа до устья р. Белая с использованием математической модели. В результате определялась максимальная длина и ширина состава для безопасного прохождения лимитирующего участка реки при одностороннем движении, при этом отмечалась невозможность реализации двустороннего движения. В статье рассматривался типовой состав из буксира-толкача пр. Р45Б и несамходного судна пр. ROB20, но возможные альтернативные варианты, в том числе с перегруппировкой, не описывались. В [21] подробно рассматриваются варианты расчета ширины судового хода, необходимой для движения судов (составов) по криволинейным участкам водного пути. Отмечается, что помимо габаритов судна (состава судов) ширина ходовой полосы зависит от его режима движения, а также сложности прохождения участка с позиции судовождения, которая зависит в том числе от радиуса кривизны судового хода и длины дуги или величины угла поворота. В работе [21] вводится, а в [22] раскрывается более подробно коэффициент кривизны, при этом отмечается, что необходимая ширина судового хода на криволинейном участке водного пути (при наличии возможности четкого определения оси и кромки судового хода) зависит от двух составляющих: ширины судового хода перед поворотом и указанного коэффициента кривизны.

В данной работе ширина маневровой полосы определялась графически, угол поворота состава и расстояние, проходимое за один поворот руля, принято условно, поправки на навигационные отклонения и ошибки не принимались, что также обосновано начальным этапом формирования концепции.

Интерес представляют исследования по определению основных характеристик судна на этапе проектирования. Так, цикл статей А. Г. Егорова [1], [8], [23] посвящен выбору главных характеристик и элементов проектов барже-буксирных составов на основе моделирования их работы. В [1] представлена математическая модель, определяющая основные характеристики составных судов, в процессе реализации которой был выполнен расчет длины, ширины, осадки, надводного габарита, водоизмещения судна в грузу и порожнем, весовой нагрузки, грузоподъемности, дедвейта, провозной способности, оптимальной скорости, буксировочного сопротивления и буксировочной мощности, экономических показателей. Алгоритм включает анализ путевых ограничений, влияния течения, управляемости в узкостях, используемого сцепного устройства и варианта линии. В [23] автор приводит оптимальное значение коэффициента общей полноты и рекомендуемую скорость движения составов в условиях их работы на линиях с учетом оценки экономической эффективности. Статья [8] представляет анализ путевых условий в предполагаемом районе эксплуатации ББС класса «Днепро-макс» с целью определения их главных размерений. Однако в практике может возникнуть ситуация изменения маршрута следования судна или уменьшения гарантированных габаритов водного пути, в связи с чем заранее невозможно точно определить требуемые характеристики судна.

Значительная часть исследований посвящена решению обратной задачи, а именно: определению габаритов водного пути для эксплуатации судов заданных типов и размеров. В [24] приводятся траектории движения т/х пр. 19612 в грузу и балласте при входе в циркуляцию с полного хода с углом перекадки руля  $35^\circ$ , полученные с помощью математического моделирования, и сравниваемые с результатами натурного испытания. В работах [25], [26] рассмотрены варианты определения гарантированной глубины и ширины судового хода для расчетных судов с известной длиной, шириной и осадкой. Данная задача актуальна в условиях нового строительства (причалов, портов, гидротехнических сооружений), планирования дноуглубительных работ, в то время как преимущества, создаваемые ББС и возможностью их переформирования, способствуют повышению эффективности отдельного рейса при заданных характеристиках водного пути.

В работе [27] для эксплуатации на малых и боковых реках, имеющих существенные ограничения характеристик судовых ходов, предлагается использовать многозвенные изгибаемые составы, изучены вопросы их безопасной и эффективной работы. При этом отмечается, что толкаемые составы имеют слишком большие размеры и не соответствуют габаритам водных путей.

В рамках данной статьи в качестве способа, позволяющего управлять габаритами состава, предлагается его переформирование непосредственно на участке водного пути.

### Заключение (Conclusion)

Использование предлагаемой системы управления ББС создает предпосылки к преодолению линейного подхода при формировании ББС. Плановое переформирование судового состава непосредственно на маршруте позволяет наиболее точно адаптировать его размеры к судоводным условиям и пройти стесненные участки водного пути без изменения количества несамостоятельных барж и буксиров, т. е. с сохранением его общей грузоподъемности, что имеет положительный эффект. В ходе решения поставленной задачи исследования были получены следующие результаты.

1. На основе математического описания ВВП разработана их классификация, учитывающая габаритные характеристики судового хода и навигационные особенности участков, в том числе кривизну и скорость движения.

2. Выполнен графоаналитический анализ движения ББС по участкам внутренних водных путей, обладающих различными характеристиками, иллюстрирующий возможность прохода составом всего маршрута только при условии изменения его конфигурации (число несамостоятельных барж в составе при этом изменено не было).

3. Составлены соотношения и система неравенств, определяющая выбор участка ВВП для эксплуатации составов в определенной конфигурации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А. Г. Математическая модель определения главных характеристик составных судов / А. Г. Егоров // Морской вестник. — 2015. — № 2 (54). — С. 85–89.

2. Егоров Г. В. Использование опыта работы речного транспорта США для создания эффективных моделей работы отечественного флота / Г. В. Егоров // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № S2. — С. 182–186. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-182-186.

3. Преснов С. В. Текущее состояние транспортного флота центрального региона России / С. В. Преснов, Ю. А. Кочнев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2016. — № 48. — С. 142–146.

4. Егоров А. Г. Анализ аварийности барже-буксирных составов внутреннего и смешанного река-море плавания / А. Г. Егоров // Морской вестник. — 2016. — № 2 (58). — С. 103–109.

5. Приказ Минтранса России от 10.07.2013 № 235 (ред. от 18.05.2020) «Об утверждении Правил движения и стоянки судов в Волго-Балтийском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_152873/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152873/) (дата обращения: 01.08.2022).

6. *Лебедева О. А.* Сравнительный анализ методов решения транспортных задач при оптимальном планировании перевозочного процесса / О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко, А. А. Пыхалов, Ю. Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2020. — № 3 (67). — С. 134–139. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).134–139.

7. *Щербина О. В.* Определение типоразмера барже буксирного состава / О. В. Щербина // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — 2017. — № 4. — С. 248–253.

8. *Егоров А. Г.* Определение главных размерений барже-буксирного состава смешанного плавания «Днепро-макс» класса / А. Г. Егоров // Вестник ОНМУ. — 2013. — Вып. 3 (39). — С. 37–61.

9. *Каретников В. В.* Лимитирующие гидрометеорологические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для проводки судов «река–море» плавания по внутренним водным путям / В. В. Каретников, Ю. Н. Андриюшечкин, А. А. Прохоренков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 451–464. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464.

10. *Лебедева М. П.* Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории / М. П. Лебедева, С. Д. Айзинов, А. О. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.

11. *Мартюк Г. И.* Учет ветра в математической модели судна с целью оценки его влияния на маневренные характеристики / Г. И. Мартюк, Ю. И. Юдин, А. Ю. Юдин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2004. — Т. 7. — № 3. — С. 375–380.

12. *Мартюк Г. И.* Учет волнения в математической модели судна с целью оценки его влияния на маневренные характеристики / Г. И. Мартюк, Ю. И. Юдин, А. Ю. Юдин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2004. — Т. 7. — № 3. — С. 381–389.

13. *Мартюк Г. И.* Учет мелководья в математической модели судна с целью оценки его влияния на маневренные характеристики / Г. И. Мартюк, Ю. И. Юдин, А. Ю. Юдин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2004. — Т. 7. — № 3. — С. 390–397.

14. *Рыбников Д. Ю.* Исследование возможности эксплуатации толкаемого состава (буксир проекта P45B/P45A плюс баржа проекта ROB20) на реке Белая с помощью математической модели / Д. Ю. Рыбников, О. Ю. Лебедев // Научные исследования XXI века. — 2019. — № 1 (1). — С. 71–76.

15. *Гуров П. В.* Управляемость буксирного состава в сложных путевых и метеорологических условиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.01 / П. В. Гуров. — Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2013. — 179 с.

16. *Токарев П. Н.* Оценка условий безопасного маневрирования судна при ветре на малых скоростях хода / П. Н. Токарев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 60. — С. 202–212.

17. *Sukas O. F.* Theoretical background and application of MANSIM for ship maneuvering simulations / O. F. Sukas, O. K. Kinaci, S. Bal // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 192. — Pp. 106239. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106239.

18. *Гладков Г. Л.* Водные пути и гидротехнические сооружения: Учебник для вузов / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев, А. В. Москаль, А. М. Гапеев, М. А. Колосов. — СПб.: СПГУВК, 2011. — 441 с.

19. Перечень основных характеристик и параметров сети водных путей категории Е «Синяя книга» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2012/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-144rev2r.pdf> (дата обращения: 01.08.2022).

20. *Shcherbina O.* Development of imitation model for selection of tug barge vessels for work on the line / O. Shcherbina // Technology audit and production reserves. — 2018. — Т. 1. — № 2 (39). — С. 28–32. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.121514.

21. *Молчанова М. В.* Существующие методы расчета габаритов судового хода на криволинейном участке пути / М. В. Молчанова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2005. — № 12. — С. 213–218.

22. *Молчанова М. В.* Учет влияния параметров поворота русла реки при определении потребной ширины судового хода / М. В. Молчанова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2007. — № 23. — С. 83–86.

23. *Егоров А. Г.* Определение оптимального значения коэффициента полноты и эксплуатационной скорости составов и составных судов смешанного река-море плавания / А. Г. Егоров // Морской вестник. — 2015. — № 3 (55). — С. 19–24.

24. Козлов С. Г. Разработка комплексных математических моделей движения судов / С. Г. Козлов // Наука и техника транспорта. — 2008. — № 1. — С. 53–56.
25. Железнова Н. В. Установление взаимосвязи габаритов судового хода и параметров расчетных судов при выборе метода улучшения судоходных условий / Н. В. Железнова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2014. — № 41. — С. 320–323.
26. Железнова Н. В. Безопасная взаимосвязь параметров расчетных судов и габаритов судового хода // Великие реки 2014: Материалы междунар. науч.-метод. конф.; ФГБОУ ВО «ВГУВТ». — Н. Новгород, 2014. — С. 166–169.
27. Девяткин А. А. Исследование проблем безопасной эксплуатации многозвенных изгибаемых составов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / А. А. Девяткин. — Новосибирск: Новосибирская гос. акад. водного транспорта, 2004. — 136 с.

## REFERENCES

1. Egorov, A. G. “Matematicheskaya model’ opredeleniya glavnykh kharakteristik sostavnykh sudov.” *Morskoi vestnik* 2(54) (2015): 85–89.
2. Egorov, G. “Experience of us river shipping in development of efficient operation models for Russian river fleet.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* S2 (2020): 182–186. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-182-186.
3. Presnov, S. V., and Yu. A. Kochnev. “The central Russia transport shipping current state.” *Bulletin of VSAWT* 48 (2016): 142–146.
4. Egorov, A. G. “Analiz avariinosti barzhe-buksirnykh sostavov vnutrennego i smeshannogo reka-more plavaniya.” *Morskoi vestnik* 2(58) (2016): 103–109.
5. Prikaz Mintransa Rossii ot 10.07.2013 № 235 (red. ot 18.05.2020) «Ob utverzhdenii Pravil dvizheniya i stoyanki sudov v Volgo-Baltiiskom basseine vnutrennikh vodnykh putei Rossiiskoi Federatsii». Web. 1 Aug. 2022 <[http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_152873/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152873/)>.
6. Lebedeva, O. A., V. E. Gozbenko, A. A. Pykhalov, and Yu. F. Mukhopad. “Comparative analysis of methods for solving transport problems with optimal planning of the transportation process.” *Modern technologies. System analysis. Modeling* 3(67) (2020): 134–139. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).134–139.
7. Shcherbina, O. V. “Opredelenie tiporazmera barzhe buksirnogo sostava.” *Visnik Shkhidnoukraïns’kogo natsional’noho universitetu imeni Volodimira Dalya* 4 (2017): 248–253.
8. Egorov, A. G. “Opredelenie glavnykh razmerenii barzhe-buksirnogo sostava smeshannogo plavaniya “Dnepro-Maks” klassa.” *Vestnik ONMU* 3(39) (2013): 37–61.
9. Karetnikov, Vladimir V., Yuri N. Andryushechkin, and Andrey A. Prokhorenkov. “Limiting hydrometeorological factors when using 3D electronic navigational charts for pilotage of river-sea-going vessels on inland waterways.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 451–464. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464.
10. Lebedeva, Marina P., Sergei D. Aizinov, and Aleksei O. Lebedev. “Technique of assessment of the safe navigation in the «constrained» water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.
11. Martyuk, G. I., Yu. I. Yudin, and A. Yu. Yudin. “Uchet vetra v matematicheskoi modeli sudna s tsel’yu otsenki ego vliyaniya na manevrennye kharakteristiki.” *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 7.3 (2004): 375–380.
12. Martyuk, G. I., Yu. I. Yudin, and A. Yu. Yudin. “Uchet volneniya v matematicheskoi modeli sudna s tsel’yu otsenki ego vliyaniya na manevrennye kharakteristiki.” *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 7.3 (2004): 381–389.
13. Martyuk, G. I., Yu. I. Yudin, and A. Yu. Yudin. “Uchet melkovod’ya v matematicheskoi modeli sudna s tsel’yu otsenki ego vliyaniya na manevrennye kharakteristiki.” *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 7.3 (2004): 390–397.
14. Rybnikov, D. Y., and O. Y. Lebedev. “Study the possibility of operation for pushed structure (project tuks R45B / P45A plus project ROB20 barge) on the white river with the mathematical model.” *Nauchnye issledovaniya XXI veka* 1(1) (2019): 71–76.
15. Gurov, P. V. Upravlyaemost’ buksirnogo sostava v slozhnykh putevykh i meteorologicheskikh usloviyakh. Phd diss. Nizhnii Novgorod: NGTU im. R. E. Alekseeva, 2013.

16. Tokarev, Pavel N. “Estimation of safety manueving conditions of the vessel in wind at low speeds.” *Bulletin of VSAWT* 60 (2019): 202–212.
17. Sukas, Omer Faruk, Omer Kemal Kinaci, and Sakir Bal. “Theoretical background and application of MANSIM for ship maneuvering simulations.” *Ocean Engineering* 192 (2019): 106239. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106239.
18. Gladkov, G. L., M. V. Zhuravlev, A. V. Moskal', A. M. Gapeev, and M. A. Kolosov. *Vodnye puti i gidrotekhnicheskie sooruzheniya*. SPb.: SPGUVK, 2011.
19. Perechen' osnovnykh kharakteristik i parametrov seti vodnykh putei kategorii E «Sinyaya kniga». Web. 1 Aug. 2022 <<https://unece.org/DAM/trans/doc/2012/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-144rev2r.pdf>>.
20. Shcherbina, O. “Development of imitation model for selection of tug barge vessels for work on the line.” *Technology audit and production reserves* 1.2(39) (2018): 28–32. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.121514.
21. Molchanova, M. V. “Existing methods of calculation of dimensions of a ship course on a curvilinear site of a way.” *Bulletin of VSAWT* 12 (2005): 213–218.
22. Molchanova, M. V. “The account of influence of parameters of turn of a channel of the river at definition of required width of a ship course.” *Bulletin of VSAWT* 23 (2007): 83–86.
23. Egorov, A. G. “Opredelenie optimal'nogo znacheniya koeffitsienta polnoty i ekspluatatsionnoi skorosti sostavov i sostavnykh sudov smeshannogo reka-more plavaniya.” *Morskoi vestnik* 3(55) (2015): 19–24.
24. Kozlov, S. G. “On the development of complex mathematical models of vessels motion.” *Science and Technology in Transport* 1 (2008): 53–56.
25. Zheleznova, N. V. “Establish the relationship dimensions of the fairway and the parameters calculated courts when choosing a method of improvement of navigation conditions.” *Bulletin of VSAWT* 41 (2014): 320–323.
26. Zheleznova, N. V. “Bezopasnaya vzaimosvyaz' parametrov raschetnykh sudov i gabaritov sudovogo khoda.” *Velikie reki 2014: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii*. Nizhnii Novgorod, 2014. 166–169.
27. Devyatkin, A. A. Issledovanie problem bezopasnoi ekspluatatsii mnogozvennykh izgibaemykh sostavov. PhD diss. Novosibirsk Novosibirskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta, 2004.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Жидкова Анастасия Михайловна** — аспирант  
 Научный руководитель:  
 Кириченко Александр Викторович —  
 доктор технических наук, профессор  
 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.** — Postgraduate  
 Supervisor:  
 Kirichenko, Aleksandr V. —  
 Dr. of Technical Sciences, professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [zhidkovaam@gumrf.ru](mailto:zhidkovaam@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 10 августа 2022 г.  
 Received: August 10, 2022.