

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-451-464

LIMITING HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS WHEN USING 3D ELECTRONIC NAVIGATIONAL CHARTS FOR PILOTAGE OF RIVER-SEA-GOING VESSELS ON INLAND WATERWAYS

V. V. Karetnikov, Yu. N. Andryushechkin, A. A. Prokhorenkov

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

The issue of operation of river vessels and river-sea-going vessels for navigation is considered. At the same time, it is emphasized that the safety of navigation, an integral part of which is the navigational safety of ships navigation, is ensured mainly due to the eye method for determining the position and movement of the vessel relative to the boundaries and directions of the fairway. This method is called pilotage. Attention to the fact that for sailing in constrained water specific for the Russian inland waterways, the degree of external factors influence on moving vessel increases is drawn. It is also noted that navigation along the Russian inland waterways is complicated by the presence of variable and heterogeneous currents, navigational hazards and shallow water. To increase the level of navigation safety in such conditions, the navigators may be required to use additional technical means of navigation and radio navigation devices. Thus, it is concluded that under significant external influences during navigation of vessels along the Russian inland waterways, the skills and abilities of navigators, including the use of modern navigational bridge equipment, play an important role in ensuring navigational safety. This problem is most acutely manifested in the piloting of modern river-sea-going vessels due to their size, as well as specific operational characteristics in comparison with typical river vessels. The aim of the work is to determine the capabilities of the navigator to ensure a high level of navigational safety of modern river-sea-going vessels when making voyages through the inner waterways of Russia, taking into account the negative impact of these factors and conditions, including hydrometeorological conditions, based on the use of promising 3D electronic navigation charts.

Keywords: navigational safety, 3D navigational charts, limiting hydrometeorological factors, inland waterways.

For citation:

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.

УДК 656.628

ЛИМИТИРУЮЩИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ 3D ЭЛЕКТРОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ ДЛЯ ПРОВОДКИ СУДОВ «РЕКА–МОРЕ» ПЛАВАНИЯ ПО ВНУТРЕННИМ ВОДНЫМ ПУТЯМ

В. В. Каретников, Ю. Н. Андрюшечкин, А. А. Прохоренков

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

Рассмотрен вопрос эксплуатации речных судов и судов «река–море» плавания. При этом подчеркивается, что безопасность судоходства, неотъемлемой частью которой является навигационная

безопасность плавания судов, обеспечивается в основном за счет глазомерного метода определения местоположения и движения судна относительно границ и направлений судового хода. Данный метод получил название «лоцманский». Обращается внимание на то, что в стесненных условиях плавания, свойственных для внутренних водных путей Российской Федерации, степень воздействия внешних факторов на движущееся судно увеличивается. Отмечается также, что судоходство по внутренним водным путям осложнено наличием переменных и неоднородных течений, навигационных опасностей и мелководья. Для повышения уровня безопасности плавания в таких условиях от судоводителя может потребоваться применение дополнительных технических средств навигации и радионавигационных приборов. Таким образом, сделан вывод о том, что при значительных внешних воздействиях при плавании судов по внутренним водным путям Российской Федерации большую роль в обеспечении навигационной безопасности играют умения и навыки судоводителей, в том числе в вопросах современного оборудования ходового мостика. Отмечается, что данная проблема наиболее остро проявляется при проводке современных судов «река–море» ввиду их размера, а также специфических эксплуатационных характеристик по сравнению с типовыми речными судами. Целью работы является определение возможностей судоводителя для обеспечения высокого уровня навигационной безопасности современных судов плавания «река–море» при совершении рейсов по внутренним водным путям Российской Федерации с учетом негативного влияния указанных факторов и условий, в том числе гидрометеорологических, на основе применения перспективных 3D электронных навигационных карт.

Ключевые слова: навигационная безопасность плавания, 3D навигационные карты, лимитирующие гидрометеорологические факторы, внутренние водные пути.

Для цитирования:

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. Андрущечкин, 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.

Введение (Introduction)

В настоящее время протяженность внутренних водных путей Российской Федерации (ВВП РФ) составляет более 100 000 км. Обеспечение на высоком уровне безопасности судоходства по внутренним водным путям (ВВП) базируется на профессиональной подготовке плавсостава. Основой судоводительской подготовки является изучение общей, а также специальной лоции бассейна или отдельного водного объекта, теоретических основ управления судами, правил плавания и особенностей движения судов в бассейне. Таким образом, проводка судна выполняется при использовании полученных знаний навигационно-гидрографических условий плавания, маневренных возможностей судна, а также глазомерной оценки местоположения и движения судна относительно границ и направлений судового хода. Знание большого количества информации об особенностях навигационного оборудования, применяемого в соответствующем бассейне водного пути, способов ориентирования, а также схем расстановки знаков навигационного оборудования в течение длительного периода времени являлось основой, обеспечивающей навигационную безопасность плавания судов по ВВП. Такие обширные знания, большая часть которых представляет собой пространственные визуальные данные, являются основой лоцманского метода судоходства по ВВП, позволяя судоводителю безошибочно определять местоположение судна даже при проводке судна в сложных гидрометеорологических условиях [1].

Увеличение размеров судов смешанного *река–море* района плавания привело к необходимости использования технических средств судоходства для получения численных значений навигационных параметров движения судна, т. е. послужило началом применения элементов штурманского метода проводки судна. Для осуществления полноценного контроля за движением судна на основании измерений, выполняемых с помощью технических средств, рекомендуется выполнение предварительных расчетов для получения аналитических параметров движения судна, которые необходимо сравнивать с фактическим движением. Так появился новый метод проводки судов, сочетающий в себе свойства штурманского и лоцманского методов, основанных на предварительной проработке маршрута, получивший название *расчетно-инструментального* [2], [3].

Вне зависимости от метода проводки судна, навигационная карта является источником навигационной информации, а также источником, связывающим различную информацию, который может использоваться в различных видах деятельности судоводителя как при подготовке к рейсу и выполнении предварительной проработки маршрута, так и в процессе проводки судна, при выполнении оперативной оценки местоположения судна относительно береговых и плавучих знаков навигационного оборудования.

Использование картографических систем, способных отображать 3D электронные навигационные карты (ЭНК), представляет новое направление в электронной картографии, потенциал которого используется в основном для обеспечения безопасности системы судоходства в морских водах [4]. Принципиально новые возможности для визуального восприятия окружающего пространства судоводителем достигаются в 3D ЭНК за счет множества функций, недоступных при использовании стандартных ЭНК, а именно:

- одновременное освещение надводной и подводной обстановки, позволяющее судоводителю оценивать возможность использования соответствующей навигационной информации и выбирать из нее наиболее достоверную для принятия решений на маневр;

- применение автоматических функций отображения области опасных глубин применительно к осадке судна и фактическому уровню воды, а также дискретность освещения подводной обстановки применительно к выбранному как генеральному масштабу карты, так и масштабу глубины в отдельности;

- получение навигационной информации, создаваемой знаками навигационного оборудования, без использования программных измерительных инструментов [5], [6].

Геометрические основы построения перспективы объемного изображения позволяют судоводителю, используя функции просмотра карты с точек, расположенных на мостике виртуального судна, в пределах корпуса или имеющих произвольное положение, а также изменяя углы обзора глазомерно, определять значения дистанций, направлений на знаки навигационного оборудования, дистанций и направлений со знака на знак [7]. При проводке судна через участки водных путей, в случае воздействия лимитирующих внешних факторов, судоводителю необходимо иметь представление о направлениях, создаваемых знаками навигационного оборудования, в первую очередь берегового.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Плаванию по ВВП свойственно сложное сочетание навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий, характерное для движения в узкостях и на мелководье, т. е. ограничения по габаритам на ВВП определяют предельные значения факторов внешнего воздействия, при которых возможно обеспечение должного уровня навигационной безопасности плавания, и, таким образом, влияние которых будет лимитирующим. К таким участкам относятся естественные и искусственные части каналов, участки свободных рек или фарватеров на озерах и водохранилищах с лимитирующими габаритами судового хода, где управление судами и составами является сложным для судоводителя и требует для обеспечения безопасности применения опыта и судоводительского мастерства. Принципиальное значение для безопасного плавания в этих условиях имеет правильная оценка судоводителем положения судна относительно границ и направлений судового хода, верный учет управляемости судна применительно к конкретным условиям плавания и оценка маневренных возможностей судна.

Влияние внешних факторов при одновременном воздействии на судно поддается определенному учету качественным образом. При следовании по прямолинейным участкам судового хода судоводитель визуально может точно оценить курсовые углы воздействия ветра и течения. Зная особенности образования ветрового момента и воздействия течения, судоводитель может управлять судном, компенсируя влияние момента от ветра и течения, и, таким образом, избегая опасного рыскания судна.

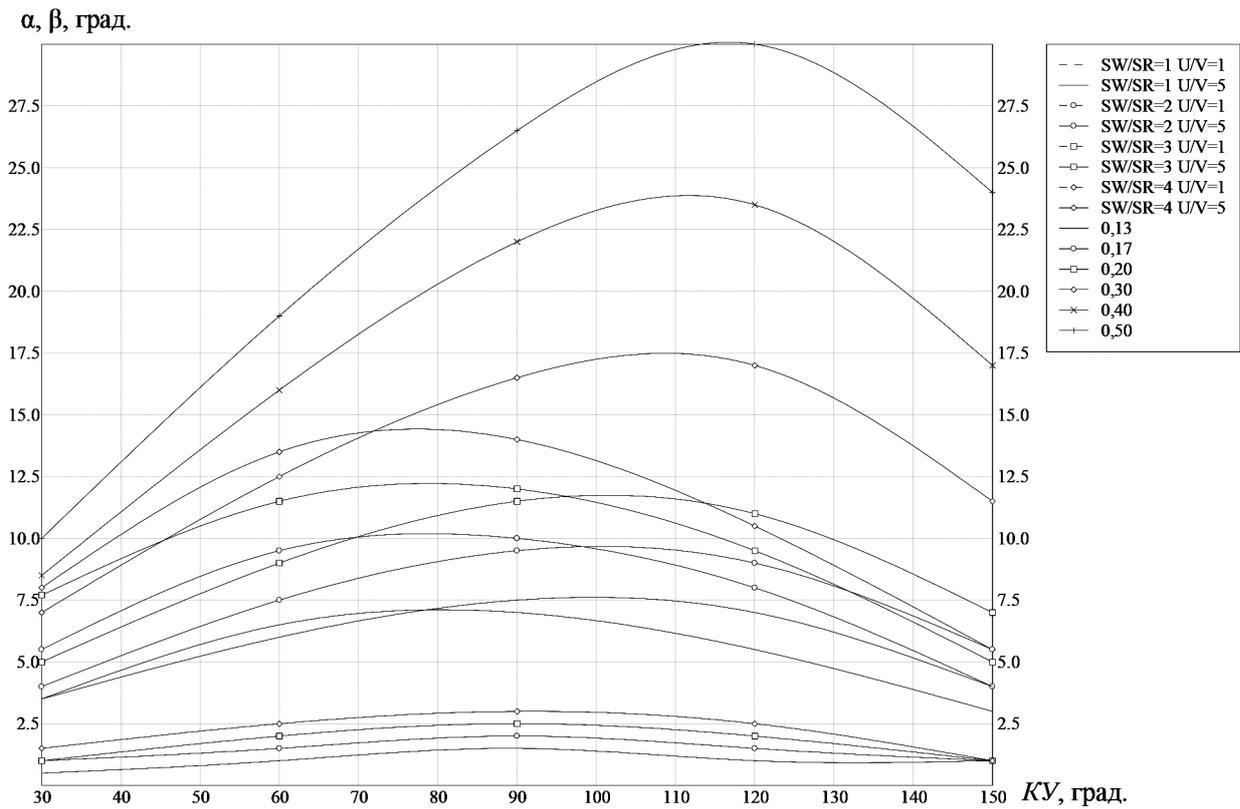


Рис. 1. Зависимости угла ветрового дрейфа α и угла сноса β от течения

Действие сил от воздействия ветра и течения обычно рассматривается как факторы, которыми судоводитель не может управлять. Однако эти две силы имеют неодинаковое воздействие на судно ввиду различия в их природе. При движении в условиях ветрового воздействия судно приобретает некоторую составляющую скорости относительно воды, направленную перпендикулярно диаметральной плоскости (ДП). При перемещении в этом направлении относительно воды подводная часть корпуса судна встречает сопротивление, в связи с чем возникает пара сил, стремящаяся развернуть судно носом на/под ветер. При воздействии течения судно также приобретает некоторую скорость в поперечном направлении, однако его надводная часть практически не испытывает сопротивления воздуха, поэтому вращающего момента не возникает. Несмотря на это, судно может ощущать вращающий момент от течения, например, при воздействии криволинейного течения на повороте.

Априорная количественная оценка влияния внешних факторов, основанная на выполнении математических расчетов, возможна, но будет связана со значительными трудозатратами, а также сложностью их практического применения ввиду изменчивости условий плавания. Для получения представления о количественном влиянии внешних факторов на судно были выполнены расчеты по стандартной методике [4], [7], результаты которых представлены на рис. 1 в виде зависимостей углов ветрового дрейфа (пунктирные линии) и углов сноса от течения (сплошные линии) в зависимости от курсовых углов (KU) истинного ветра и течения. Величины углов дрейфа будут определяться отношением площадей парусности надводного (SW) и подводного (SR) бортов, скоростей истинного ветра (U) и судна (V), а углы сноса — только соотношением скоростей течения и судна. Анализируя зависимости углов дрейфа от ветра и сноса от течения, можно отметить характерные особенности влияния как каждого из факторов в отдельности, так и совместного влияния. При незначительных внешних воздействиях для оценки и прогнозирования поведения судна нет необходимости в точном определении точек приложения аэро- и гидродинамической сил, а также их моментов. Определение равнодействующей силы выполняется судоводителем визуально и весьма приблизительно.

Особенностью действия течений на ВВП является изменчивость направления, проявляющаяся даже на отдельных частях прямолинейных участках, так что при следовании судна по участку, где свальное течение отсутствует, угол дрейфа может иметь один знак. При выходе судна на участок, где ощущается снос от течения, действующего в противоположном направлении, совместный угол дрейфа может резко изменить знак, что вызовет резкое отклонение судна от линии пути.

При условии соответствия точек приложения аэро- и гидродинамической сил общим закономерностям, известным из курса судовождения, точка приложения силы от течения будет смещена в носовую часть судна, поэтому при действии ветра и течения в один борт моменты от ветра и течения будут иметь разные знаки, при действии ветра и течения со стороны разных бортов вызванные ими моменты будут суммироваться, так что углы перекладки руля и угловые скорости при ветре и течении, действующие в противоположных направлениях, будут больше, чем в случае их действия по одному направлению.

Таким образом, движение судна в условиях воздействия лимитирующих внешних факторов будет характеризоваться значительными углами суммарного дрейфа и рыскливостью. Поскольку движение судна представляет собой совокупность поступательного и вращательного движений, это означает, что видимые с ходового мостика дистанции и направления на знаки навигационного оборудования будут меняться случайным образом, что создает значительные трудности как для ориентирования, так и для управления судном даже при условии наличия хорошей практики управления судном.

Результаты (Results)

Учет фактического уровня воды. При оценке эффективности применения 3D ЭНК [8], [9] для опровержения неблагоприятного влияния лимитирующих гидрометеорологических факторов, влияющих на возможность проводки судов по ВВП, первым рассматривается влияние уровня воды, поскольку оно определяет величины фактических габаритов судового хода, т. е. ширину, радиус закругления и глубину. Это связано с тем, что при движении судна на мелководье наблюдается увеличение осадки судна, что не только требует снижения скорости судна и, таким образом, приводит к возрастанию степени влияния других внешних факторов, но и создает опасность удара корпуса о грунт.

На ВВП основные навигационные опасности представляют собой пространственные опасности в виде изобат, ограничивающие водное пространство, которое может быть использовано для движения судна, называемое *судовым ходом*. С точки зрения геометрии судового хода представляет собой фигуру неправильной геометрической формы даже при условном разделении на прямолинейные и криволинейные участки. Резкие колебания уровня воды отражаются неблагоприятно на условиях судоходства, так как вызывают большие изменения в очертаниях водной поверхности реки, величине глубин, а также скорости течения. Влияние формы русла и сопротивлений в нем на характер изменения высоты уровня воды выражается в том, что при прочих одинаковых условиях в суженных местах долины и русла реки происходят более высокие и резкие подъемы уровня, а в расширенных — более плавные и пониженные. Ограниченная ширина и глубина изменяют характер влияния гидромеханических сил на корпус судна и усложняют управление.

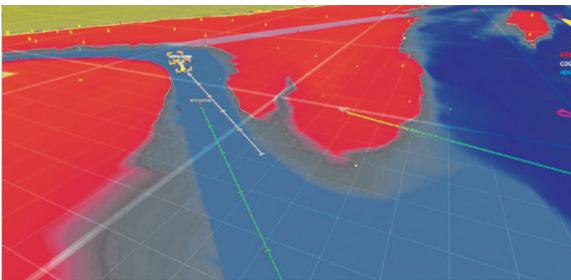
Когда судоводителю удается удерживать судно вблизи оси судового хода, гидродинамическое взаимодействие между оконечностями и рельефом дна не оказывает значительного влияния на судно, поскольку оно балансируется равным давлением по обоим бортам. При движении судна по участкам с резко меняющимися габаритами, такими как крутые колена, места разветвления русла и другие факторы, за счет влияния сил гидродинамического взаимодействия между корпусом судна и дном реки на корпус судна будут действовать гидродинамические силы, способствующие зарыскиванию носовой части судна в сторону больших глубин, или, наоборот, при значительном сближении судна с кромкой судового хода вызывать зарыскивание в сторону берега. При возникновении гидродинамического взаимодействия судно приобретает вращательное движение, в результате которого будет действовать ускорение, вызванное действием сил гидродинамического взаимодействия [10], [11].

При проводке судна по прямолинейным участкам судоводители стараются удерживать судно на оси судового хода, а в случае, если это невозможно по путевым условиям, то ориентируются на положение судна относительно опасной изобаты, отображаемой стандартной ЭНК. При прохождении криволинейных участков судового хода судоводители также могут ориентироваться на общие правила о том, что вогнутый берег, как правило, обрывист, возле него обычно располагаются наибольшие глубины и наблюдаются большие скорости течения. Выпуклый берег, наоборот, имеет пологие очертания рельефа, обычно небольшие глубины около них и слабые течения. При выполнении поворота достаточно контролировать положение судна по знакам плавучего навигационного оборудования выпуклой кромки, поскольку при этом маневре «раскатка» кормы происходит в противоположную сторону.

Стандартные ЭНК содержат минимально необходимые данные о глубинах, анализируя которые получить представление об их изменении, достаточное для прогнозирования зарыскивания судна, не представляется возможным. Если судоводитель не ожидает рыскания, то, как правило, запаздывает предпринять соответствующие действия, что снижает контроль над ситуацией и проявляется в резкой тенденции носовой оконечности ухода в направлении больших глубин, усиления присасывания кормы к мелководью и разворота судна поперек судового хода до тех пор, пока удаление кормовой оконечности от кромки судового хода не снизит гидродинамический эффект. Действие гидродинамических сил в таких случаях может быть достаточно сложно компенсировать несмотря на перекладку руля на борт и полный ход вперед.

Отображение информации о глубинах за счет градиентной заливки [11], как показано на рис. 2, позволяющее использовать функцию масштабирования для детализированного отображения подводного рельефа при проводке судна по судовым ходам рек, водохранилищ, озер, каналам, дает судоводителю дополнительную информацию, которую можно получить как при непосредственном просмотре участка, по которому предстоит проводка судна в течение ходовой вахты, так и при проводке судна, когда требуется точная оценка положения и движения судна относительно пространственных навигационных опасностей. Такая оценка позволяет избежать резких изменений курса судна при следовании по прямолинейным участкам, необходимость в которых может возникнуть при оценке движения судна по одиночным знакам навигационного оборудования. Перед прохождением поворотов, ориентируясь по стандартной ЭНК, судоводитель может выделить общие закономерности изменения глубин в зависимости от кривизны судового хода. Как правило, любое резкое изменение одной из этих характеристик влечет за собой резкое изменение другой, а плавному изменению кривизны соответствует также плавное изменение глубин.

а)



б)

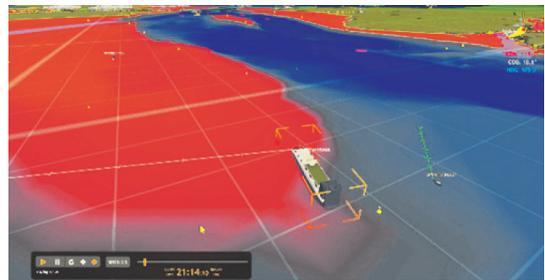


Рис. 2. Пример отображения области опасных глубин:
а — при движении судна в средней части фарватера;
б — при чрезмерном сближении судна с кромкой фарватера

При подходе судна к повороту, а также в процессе прохождения судном поворота ориентирование по 3D ЭНК (см. рис. 2) позволяет судоводителю оценивать общее пространство, доступное для движения, наметить общую траекторию движения, а также контролировать прохождение оконечностей судна относительно области опасных глубин, вне зависимости от схемы ограждения

знаками навигационного оборудования. При правильном управлении в момент начала поворота при переключке руля может происходить резкое увеличение угловой скорости, а как только руль отводится, угловая скорость также резко уменьшается за счет влияния сил гидродинамического взаимодействия. Поэтому наблюдение за движением судна по 3D ЭНК в процессе выполнения поворота позволяет тщательно контролировать расстояния до навигационных опасностей и удерживать величину угловой скорости в нужном пределе.

Одной из сложностей, возникающей при проводке судна с предельной осадкой по водному пути, имеющему габариты, сопоставимые с размерами судна, является *инерционное движение судна*. Маневренность судна резко изменяется при изменении соотношения глубины и осадки. При снижении этого соотношения до 1,3–1,5 судно может стать менее устойчивым относительно своего курса и двигаться рывками. Если соотношение глубины и осадки продолжает снижаться, то судно более четко следует намеченному курсу до тех пор, пока запас глубин под килем становится очень малым (соотношение глубины и осадки достигает значения 1,05–1,10) и судно маневрирует очень медленно [12]. Такое улучшение стабильности судна относительно курса является преимуществом на прямолинейных участках, однако низкая маневренность судна может явиться причиной возникновения проблем, связанных с его управлением, поэтому необходимо дополнительное пространство для маневрирования.

При прохождении криволинейных участков следует принимать во внимание влияние как радиуса закругления, так и течения на ширину маневровой полосы, занимаемой судном. Расчетные данные применимы для использования только в общем виде и проявляются в виде принципов, в соответствии с которыми с увеличением радиуса кривизны судового хода ширина, необходимая для прохождения судна, уменьшается, причем особенно интенсивное уменьшение наблюдается при небольших отношениях радиуса кривизны к длине судна (состава); разность между необходимой шириной маневровой полосой при движении вниз и вверх уменьшается; с уменьшением скорости движения судна относительно воды эта разность возрастает. Визуальное ориентирование по 3D ЭНК позволяет оценивать фактические радиусы применительно к габаритам судна и фактическим параметрам его движения.

Учет влияния течения. Из практики судовождения по ВВП известно, что течение воды, направленное под углом к диаметральной плоскости (ДП) судна, одновременно изменяет как скорость, так и траекторию движения судна. Значение истинной скорости движения судна зависит от суммы / разности скорости течения и судна, значение угла сноса — от направления течения относительно ДП судна, скорости течения и скорости движения судна (чем больше угол между течением и ДП судна и меньше скорость движения судна, тем больше величина сноса).

Скорость течения на судовом ходе в слое воды, равном осадке судна, называется *эксплуатационной скоростью течения*. Данные об эксплуатационных скоростях течения помещаются в навигационно-гидрографических очерках атласов водных путей и лоциях в виде зависимостей от расхода воды, отнесенных к определенным горизонтам воды на водомерных постах. Правильный учет течений особенно важен в затрудненных для плавания местах: на перекатах, в проходах под мостами, вблизи искусственных сооружений и различных навигационных опасностей. Причинами, обуславливающими неравномерность течения и турбулентный режим речного потока, являются непрерывное изменение во времени и по длине реки расхода протекающей воды, изменение уклонов, формы и размеров поперечного сечения русла и его шероховатости.

Величины поперечных уклонов на средних и малых реках могут быть столь значительны, что иногда превышают величину продольного уклона реки. Подобно течениям, обусловленным силой Кориолиса, течения, вызванные центробежной силой в сумме с поступательным движением, образуют винтовое движение струй на изгибе, причем, в соответствии с направлением кривизны русла, они направлены то по часовой стрелке, то против.

Фрагменты 3D ЭНК, представленной на рис. 3, показывают навигационную подводную обстановку вокруг судна в общем масштабе и при использовании масштабирования по вертикали. Оценить подводную обстановку можно визуальным сравнением форм рельефа речного русла

в масштабе осадки судна [12]. Управление судном на течении позволяет оценивать характеристики течений применительно к отображаемым особенностям речного русла, выбирать оптимальный курс относительно направления течения и устанавливать соответствующий режим работы двигателей. При прохождении по участкам с сильным свальным течением можно выбирать безопасную траекторию движения с большой поправкой на течение (в сторону течения) или траекторию, проходящую через область больших глубин, позволяющих значительно увеличивать скорость движения.

а)



б)



Рис. 3. Пример отображения подводной обстановки на 3D ЭНК при использовании функции вертикального масштабирования:
а — общий масштаб; б — крупный масштаб по вертикали

В руслах рек, кроме основного продольного поступательного движения воды, существуют внутренние циркуляционные течения, которые в совокупности с продольными образуют сложные формы винтообразных течений [13], [14]. Происхождение таких течений обуславливается наличием подводных русловых образований рельефа, оказывающих влияние на направление течения. Установлено, что верхние струи следуют общему направлению течения, а нижние — изгибам речного дна. В руслах рек встречаются многочисленные и разнообразные отложения наносов и углубления, образовавшиеся в период половодья. Эти русловые образования при низких уровнях воды в реке оказывают влияние на донные течения, отклоняя их в направлениях, не совпадающих с уклонами водной поверхности и направлениями поверхностных течений.

В соответствии с очертаниями рельефа русла направление течений, как и скорость, подвержено значительным изменениям. Особенно резкие местные изменения течений происходят в половодье. Для общей оценки направлений течения применяются глазомерные способы и косвенные признаки

(например, вид поверхности воды, очертания русла, плывающие по реке случайные предметы или пена после прохождения дождей и т. п.). При некоторых формах рельефа речного русла и соответствующих гидрологических условиях в речном потоке образуются местные неблагоприятные и даже опасные для судоходства течения. К ним относятся навалы (прижимные), затяжные и свальные течения и водовороты.

Навалы течения, действие которых выражено сильным сносом судка в сторону берега или какого-либо объекта, возникают под действием центробежной силы на изгибе русла. *Затяжные течения* направлены из главного русла реки в протоки, особенно в прорывы, в период половодья, так как уклоны и скорости течения в таких местах значительно больше, чем в главном русле реки. *Свальные течения*, вызываемые поперечным уклоном водной поверхности и пересекающие ось судового хода под некоторым углом, наблюдаются на перекатных участках рек, расположенных на изгибах русла при переходе стрежня от одного берега к другому. Наибольшая интенсивность поперечных течений, вызванных центробежной силой, наблюдается несколько ниже по течению реки относительно вершины кривой, т. е. точки наибольшей кривизны, а здесь под вогнутыми берегами, обычно наблюдаются и наибольшие глубины. Затухание поперечных течений и наименьшая глубина находятся на перевале от одного берега к другому, несколько ниже точки нулевой кривизны.

3D ЭНК освещает подводную обстановку достаточным образом для получения представления об особенностях всех видов течений и обуславливающих их причинах как искусственного характера (например, навалы течений, действующих близ устоев мостов, дамб, причалов), так и естественных (например, свальных течений, направленных на подводные косы, нечистые яры и затопленные во время половодья меженные берега реки). Такие течения, не совпадающие с общим потоком и направленные через мелководье, имеют большую скорость, так что проходящие суда под их действием смещаются с оси судового хода и могут сблизиться с мелью на малые расстояния или быть посажены на мель.

Учет влияния ветра. Хорошо известно, что ветровой дрейф судна приводит к изменению ширины маневренной полосы движения, которая будет изменяться от минимального значения, равного ширине судна, до некоторого максимального значения, равного длине судна. При этом, если максимальное значение ширины маневренной полосы движения судна будет соизмеримо или превышать допустимую полосу движения (ширину судового хода), предусмотренную существующими правилами плавания, то это приведет к появлению опасной навигационной ситуации выхода любой оконечности движущегося судна за допустимые границы движения с возможным касанием дна из-за необеспеченности допустимых глубин при заданных параметрах осадки.

Естественно, что помимо изменчивости углов дрейфа судна на безопасность прохода судна будет влиять также и боковое смещение, которое зависит от качества управления судном и способности удерживать центр величины на оси судового хода при управлении судном. Таким образом, при проводке судна по ВВП вопрос компенсации неблагоприятного влияния ветра при проводке по прямолинейным участкам и его учет при прохождении поворотов может стать определяющим.

При проводке судна в условиях ветра судоводителю необходимо решать две основные задачи по управлению судном: учет дрейфа судна и работа рулем для компенсации ветрового момента. Наибольший дрейф судна будет вызывать ветер, направленный под близким к прямому углу к ДП судна, в то время как наибольший момент возникает при действии ветра со стороны кормовых курсовых углов. Приближение ветрового воздействия к лимитирующим значениям характеризуется непостоянством как силы, так и направления. Действие ветровых сил значительной изменчивости приведет к изменчивости углов дрейфа и значительной рыскливости судна, вызванной меняющимися составляющими силы сопротивления при прохождении сужений и расширений судового хода. Пример отображения собственного судна в области просмотра 3D ЭНК при следовании по судоводному каналу неправильной геометрической формы представлен на рис. 4 [13]. В таких условиях контроль за движением судна будет представлять значительные трудности как при следовании по прямолинейным участкам, так и при прохождении поворотов.

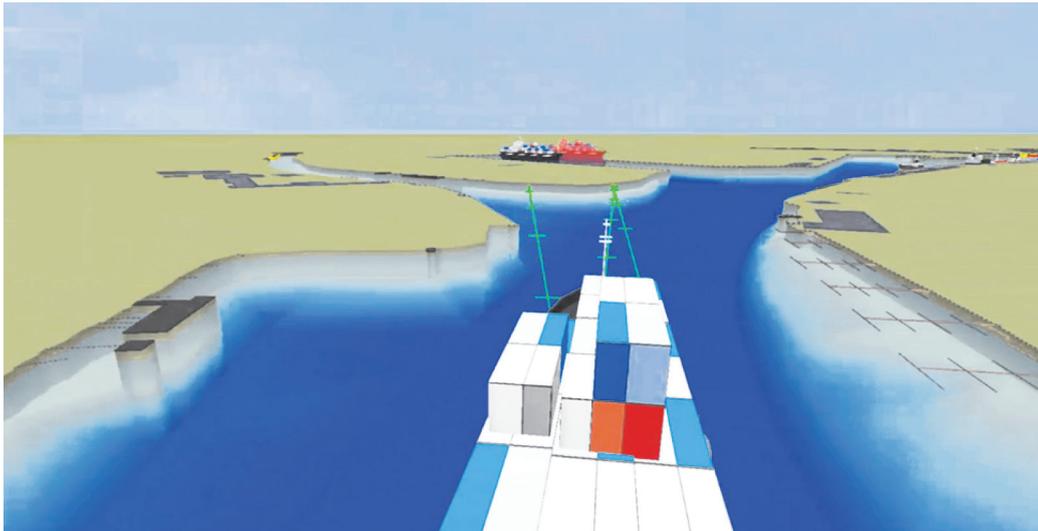


Рис. 4. Вид собственного судна в области просмотра 3D карты при следовании по судоходному каналу неправильной геометрической формы

При следовании по прямолинейным участкам для удержания курса потребуются выбор ориентиров и постоянная работа рулем для удержания курса и его изменения в условиях изменчивого влияния ветра. Следует учитывать также, что начиная с некоторого угла перекладки руля коэффициент подъемной силы будет снижаться, а, следовательно, будет снижаться и возможность судоводителя обеспечивать необходимые параметры движения судна. Это проявляется в том, что несмотря на величину перекладки руля и продолжительность ее периода угловая скорость управляемого рулем судна будет меняться медленно, что приводит к задержкам при изменении курса и сближению с кромкой судового хода не только под воздействием ветра, но и течения. При совместном действии ветра и течения наихудшим является случай, когда течение и ветер действуют со стороны разных бортов, что связано с увеличением относительной скорости судна, которая вызывает возрастание гидродинамической силы и, соответственно, момент, создаваемый этой силой, также увеличивается.

Таким образом, очевидно, что судоводителю необходимо иметь некую эталонную траекторию движения, параметры которой известны заранее, чтобы иметь данные для сравнительного анализа [15]. Наличие данных об эталонной траектории, которые могут быть получены при выполнении предварительной проработки маршрута перехода и использованы при проводке судна расчетно-инструментальным методом, представляющим собой совокупность штурманского и лоцманского методов проводки. Однако под действием лимитирующих внешних факторов судно может значительно отклоняться от намеченной траектории, так что данные, полученные при выполнении предварительной проработки маршрута, использовать будет нельзя и судоводителю потребуется дополнительная оперативная навигационная информация.

В условиях значительных ветровых воздействий, когда заблаговременно рассчитать и оценить прохождение судна с меньшими дистанциями до опасных изобат практически невозможно, навигационная информация, отображаемая 3D ЭНК, позволяет судоводителю оперативно выполнять оценку местоположения и движения судна относительно направлений и границ судового хода, ориентируясь как по знакам плавучего навигационного оборудования, так и по пространственной подводной обстановке. Дальнейшее увеличение угла дрейфа может привести к уменьшению водного пространства между носовой и кормовой частями судна и кромками судового хода, вследствие чего будет наблюдаться эффект гидродинамического взаимодействия, особенно кормовой части судна. Такое маневрирование, без оценки пространственной подводной обстановки, связано со значительными рисками и является опасным.

При проводке судна по криволинейным участкам при ветрах различных направлений судоводитель использует общие принципы оценки изменения траектории движения судна. Так, воздействие ветра встречных направлений характеризуется уменьшением величины выбега и некоторым увеличением диаметра циркуляции, так что траектория циркуляции смещается в подветренную сторону. При попутных ветрах в большинстве случаев наблюдается значительное увеличение выбега и диаметра циркуляции. При наличии сильного бортового ветра параметры циркуляции при повороте *на ветер* значительно лучше, чем при повороте *под ветер*.

Настраивать 3D ЭНК можно применительно к габаритам судоводного пути и размерам собственного судна так, чтобы одновременно отображать совокупность плавучих навигационных, наблюдение которых существенно для прохождения поворота применительно к конкретным обстоятельствам и условиям плавания, а также когда их положение становится важным для управления судном [16].

Обсуждение (Discussion)

При проводке судна по ВВП в условиях воздействия лимитирующих гидрометеорологических факторов судну может потребоваться значительно больше пространства для движения, что обусловлено как изменчивостью действия внешних факторов, так и ухудшением его управляемости, что приводит как к отклонению судна от курса и смещению с траектории движения, так и к значительным углам суммарного дрейфа. Значительное возрастание ширины маневровой полосы и смещение с траектории движения требуют от судоводителя вести судно с минимальными запасами к ширине маневровой полосы. 3D ЭНК при управлении судном в стесненных навигационных условиях плавания, характерных для ВВП, позволяет учитывать такие параметры, как фактическая ширина и глубина судового хода, ориентируясь по пространству между бортами судна и кромкам судового хода, наблюдаемыми с ходового мостика судна.

Визуальное наблюдение по 3D ЭНК дает возможность оценивать отдельно движение носовой и кормовой оконечности, что может быть использовано для принятия упреждающих действий и компенсации неблагоприятного влияния лимитирующих соотношений габаритов судового хода к соответствующим размерениям судна, ветрового воздействия, неправильных и криволинейных течений, действующих на различных участках. Проводка судна с использованием 3D ЭНК позволяет отображать навигационную ситуацию вокруг судна, изменяя положение в пространстве и угол точки обзора, что дает возможность поддерживать наблюдение и ориентирование относительно совокупности знаков навигационного оборудования. Использование этих данных совместно с информацией о маневренных характеристиках судна и данных о положении органов управления позволяет оценить имеющееся водное пространство и траекторию движения судна на некоторое время вперед, достаточное для принятия следующих решений по управлению судном. Такое количество навигационной информации является достаточным для проводки судна, для которого запасы по глубине и ширине являются предельными.

Особенности отображения навигационной информации в 3D ЭНК при проводке судов по ВВП при лимитирующих внешних воздействиях дают существенные преимущества для контроля за движением судна за счет увеличения количества информации и упрощения ее представления, так что судоводитель имеет возможность учитывать новую информацию при предварительном ознакомлении с участком, по которому предстоит проводить судно, т. е. позволяет принимать упреждающие решения как на основании картографической информации, так и оперативного регулирования параметров движения судна с учетом фактического влияния лимитирующих внешних факторов и в первую очередь уровня воды.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что под действием лимитирующих внешних факторов судно может значительно отклоняться от намеченной траектории, так что данные, полученные при выполнении предварительной проработки маршрута, использовать будет нельзя и судоводителю потребуется дополнительная оперативная навигационная информация.

Использование 3D ЭНК при проводке судов по ВВП дополняет данные о параметрах движения судна, полученные при выполнении предварительной проработки маршрута перехода и, таким образом, расширяет практику применения расчетно-инструментального метода проводки. Так что наблюдая за движением судна визуальным и отображением параметров его движения, можно переходить от управления судном по курсу при незначительном влиянии внешних факторов к управлению судном по скорости с учетом фактического уровня воды, вплоть до управления вектором скорости судна, когда влияние внешних факторов возрастает и необходимо точно выдерживать траекторию движения судна.

Рассмотренные особенности получения новой информации судоводителем на основании применения 3D ЭНК в работе повышают эффективность и безопасность проводки судов по ВВП в условиях воздействия лимитирующих внешних факторов как за счет новой информации при непрерывном наблюдении за обстановкой, складывающейся вокруг судна, так и за счет предварительного планирования и выполнения отдельных маневров. Дополнительная информация, получаемая визуальным, позволяет судоводителю принимать во внимание большое количество внешних факторов, а именно: свободное пространство со стороны каждого из бортов и запас под килем с учетом подводного рельефа, что повышает класс управления судном и уровень выполнения ключевых судовых операций, поэтому высокое качество подготовки судоводительского состава является одним из основных требований современных отраслевых стандартов безопасности.

Внедрение на судах смешанного *река–море* плавания 3D ЭНК, вырабатывающих новую навигационную информацию, которая может использоваться для принятия как долгосрочных, так и оперативных решений по управлению судном в условиях лимитирующих внешних факторов, предоставляет судоводителю новые возможности для решения задач управления судном, тем самым повышая навигационную безопасность плавания в условиях лимитирующих гидрометеорологических факторов. Навигационная информация, доступная судоводителю при управлении судном, позволяет повысить точность действий как при следовании по прямолинейным участкам, так и при прохождении поворотов, вызывающих затруднения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев В. И.* Справочник капитана / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников. — М.: Моркнига, 2020. — 735 с.
2. *Ланидус В. М.* Расчетно-инструментальный метод проводки судов по внутренним судоходным путям / В. М. Ланидус, О. И. Мокрозуб. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2002. — 81 с.
3. *Ланидус В. М.* Рекомендации по управлению судном на ВВП с использованием РЛС, САРП / В. М. Ланидус, О. И. Мокрозуб. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2004. — 119 с.
4. *Каретников В. В.* Динамика методологии управления судном в узкости при использовании 3D навигационных карт / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, К. И. Ефимов // *Морская радиоэлектроника*. — 2019. — № 3 (69). — С. 44–49.
5. *Goralski R.* Applications and benefits for the development of cartographic 3D visualization systems in support of maritime safety / R. Goralski, C. Ray, C. Gold // *TransNav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2011. — Vol. 5. — No. 4. — Pp. 423–431.
6. *Lataire E.* Navigation in Confined Waters: Influence of Bank Characteristics on Ship-Bank Interaction / E. Lataire, M. Vantorre, E. Laforce, K. Eloit, G. Delefortrie // *2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples, Italy*. — 2007. — Pp. 135–143.
7. *Каретников В. В.* Применение 3d электронных навигационных карт при авариях, связанных с посадкой на мель, и для их предотвращения в стесненных условиях плавания / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев, О. И. Мокрозуб // *Морская радиоэлектроника*. — 2020. — № 2 (72). — С. 22–28.
8. *Ng H. F.* A computation effective range-based 3D mapping aided GNSS with NLOS correction method / H. F. Ng, G. Zhang, L. T. Hsu // *The Journal of Navigation*. — 2020. — Vol. 73. — Is. 6. — Pp. 1202–1222. DOI: 10.1017/S037346332000003X.
9. *Hirtle S.* Navigation in electronic environments / S. Hirtle, M. Sorrows // *Applied Spatial Cognition*. — Psychology Press, 2020. — Pp. 103–126.
10. *Kobayashi H.* Analysis of Techniques for Ship Handling / H. Kobayashi // *Techniques for Ship Handling and Bridge Team Management*. — New York: Routledge, 2019. — Pp. 23–78.

11. Усов В. Д. Управление судном при плавании в узкостях / В. Д. Усов, А. А. Волков. — Астрахань: ИПК «Волга», 2008. — 133 с.
12. Прохоренков А. А. Использование трехмерных навигационных карт для повышения безопасности судовождения по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // *International Journal of Advanced Studies*. — 2019. — Т. 9. — № 1. — С. 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
13. Моргунов В. К. Общая логия внутренних водных путей: учеб. пособие / В. К. Моргунов. — Новосибирск: Новосиб. госуд. акад. вод. трансп., 2005. — 170 с.
14. Барышников Н. Б. Руслвые процессы: учеб. / Н. Б. Барышников. — СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. — 439 с.
15. Zaikov V. I. Mathematical Model for Ship Controlled Motion in Manoeuvring under the Conditions of Shallows, Winds and Flows / V. I. Zaikov // *Computer Technique & Advanced Scientific Instrumentation in Ship Hydrodynamics. Proceedings of the 13-th SMSSH*. — Varna, 1984. — Vol. 1. — Report #95. — Pp. 1–5.
16. Прохоренков А. А. Повышение эффективности решения задач управления судном в стесненных условиях при использовании морских 3-D электронных навигационных карт / А. А. Прохоренков // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки*. — 2019. — № 4. — С. 76–85.

REFERENCES

1. Dmitriev, V. I., and V. V. Karetnikov. *Spravochnik kapitana*. M.: Morkniga, 2020.
2. Lapidus, V. M., and O. I. Mokrozub. *Raschetno-instrumental'nyi metod provodki sudov po vnutrennim sudokhodnym putyam*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2002.
3. Lapidus, V. M., and O. I. Mokrozub. *Rekomendatsii po upravleniyu sudnom na VVP s ispol'zovaniem RLS, SARP*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2004.
4. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov, and K. I. Efimov. “Dynamics of ship handling methodology in narrows by using 3d navigation charts.” *Marine Radio-electronics* 3(69) (2019): 44–49.
5. Goralski, Rafal, Cyril Ray, and Chris Gold. “Applications and benefits for the development of cartographic 3D visualization systems in support of maritime safety.” *TransNav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 5.4 (2011): 423–431.
6. Lataire, E., M. Vantorre, E. Laforce, K. Eloit, and G. Delefortrie. “Navigation in Confined Waters: Influence of Bank Characteristics on Ship-Bank Interaction.” *2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples, Italy*. 2007. 135–143.
7. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov, Yu. G. Andreev, and O. I. Mokrozub. “Application of 3d electronic navigation charts for prevention and in case of groundings in restricted waters.” *Marine Radio-electronics* 2(72) (2020):22–28.
8. Ng, Hoi-Fung, Guohao Zhang, and Li-Ta Hsu. “A computation effective range-based 3D mapping aided GNSS with NLOS correction method.” *The Journal of Navigation* 73.6 (2020): 1202–1222. DOI: 10.1017/S037346332000003X.
9. Hirtle, Stephen, and Molly Sorrows. “Navigation in electronic environments.” *Applied Spatial Cognition*. Psychology Press, 2020. 103–126.
10. Kobayashi, Hiroaki. “Analysis of Techniques for Ship Handling.” *Techniques for Ship Handling and Bridge Team Management*. New York: Routledge, 2019. 23–78.
11. Usov, V.D., and A. A. Volkov. *Upravlenie sudnom pri plavanii v uzkostyakh*. Astrakhan': IPK “Volga”, 2008.
12. Prokhorenkov, Andrei Aleksandrovich. “Use of three-dimensional navigation charts to improve inland waterways navigation safety.” *International Journal of Advanced Studies* 9.1 (2019): 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
13. Morgunov, V. K. *Obshchaya lotsiya vnutrennikh vodnykh putei: Uchebnoe posobie*. Novosibirsk: Novosib. gosud. akad. vod. transp., 2005.
14. Baryshnikov, N. B. *Ruslovye protsessy: Uchebnik*. SPb.: Izd. RGGMU, 2008.
15. Zaikov, V. I. “Mathematical Model for Ship Controlled Motion in Manoeuvring under the Conditions of Shallows, Winds and Flows.” *Computer Technique & Advanced Scientific Instrumentation in Ship Hydrodynamics. Proceedings of the 13-th SMSSH*. Vol. 1. Varna, 1984. Report #95. 1–5.
16. Prokhorenkov, Andrei A. “Improving the efficiency of solving the tasks of shiphandling in narrows when using marine 3-d electronic navigation charts.” *Modern Science: actual problems of theory and practice. A series: Natural and Technical Sciences* 4 (2019): 76–85.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru,
spguwc-karetnikov@yandex.ru

Андрюшечкин Юрий Николаевич —

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

Прохоренков Андрей Александрович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir V. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru,
spguwc-karetnikov@yandex.ru

Andryushechkin, Yuri N. —

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

Prokhorenkov, Andrey A. —

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

Статья поступила в редакцию 7 июня 2021 г.

Received: June 7, 2021.