



Оценка гидродинамического влияния корпуса буксировочного лесотранспортного модуля на условия работы движителей

Сергей В. Посыпанов¹, s.posypanov@narfu.ru, 0000-0003-0600-7089
Никита С. Калитин¹, kalitin.n@edu.narfu.ru

¹ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация

Теоретически обоснованно, что эмпирическая формула, обычно применяемая для определения коэффициента, учитывающего гидродинамическое влияние корпуса судна на условия работы движителей, применительно к рассматриваемому модулю, предназначенному для буксировки лесотранспортных единиц по средним и малым рекам, может давать существенные погрешности. Это объясняется нетипичным для обычных судов соотношением водоизмещения и диаметра винтов, наличием сжатого потока между понтонами плавучего основания катамаранного типа и размещением винтов за пределами поперечных габаритов понтонов, что ослабляет влияние попутного потока. В результате численного эксперимента, базирующегося на методе конечных элементов, с использованием программы SOLIDWORKS Flow Simulation подтверждены теоретические положения. При обработке данных по характерным продольным сечениям установлено, что в межпontonном пространстве скорость потока не уменьшается, а увеличивается и лишь на некотором удалении от кормы начинает уменьшаться, оставаясь на значительном расстоянии меньше относительной скорости модуля. Это объясняется тем, что в межпontonном пространстве и непосредственно за ним фактор сжатия потока более значим, чем фактор наличия попутного потока. По данным ряда поперечных сечений получены аппроксимирующие зависимости для определения скоростей по координатам в сечении. С помощью этих зависимостей по специально разработанному алгоритму для каждого поперечного сечения вычислены средние скорости в пределах круглых контуров, соответствующих расположению одного винта в диаметральной плоскости и двух винтов симметричных относительно её. По ним установлены значения искомого коэффициента. При размещении движителей в межпontonном пространстве его следует принимать – 0,08 ... - 0,09 при установке одного винта и – 0,09 ... - 0,11 при установке двух. Для его определения при установке винтов за кормой модуля получены аппроксимирующие зависимости. Диапазон изменения коэффициента за кормой от -0,08 до 0,06 при изменении расстояния от миделя от 3,25 до 4,90 м. Даны рекомендации по определению мест установки движителей, учитывающие наряду со скоростным режимом и другие факторы.

Ключевые слова: лесосплав, лесотранспортные единицы, буксировка, гребной винт, попутный поток, сжатие потока

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Посыпанов, С. В. Оценка гидродинамического влияния корпуса буксировочного лесотранспортного модуля на условия работы движителей / С. В. Посыпанов, Н. С. Калитин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 204–216. – Библиогр.: с. 214–216 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/13>.

Поступила .05.02.2026. Пересмотрена 30.03. 2026. Принята 15.05.2026. Опубликована онлайн 26.06.2026

Article

Evaluation of the hydrodynamic Influence of the Hull of a towing timber transport Module on the operating Conditions of the Propellers

Sergey V. Posypanov¹, s.posypanov@narfu.ru, Researcher ID: ABF-6542-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Nikita S. Kalitin¹, kalitin.n@edu.narfu.ru

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

It is theoretically justified that the empirical formula, usually used to determine the coefficient that takes into account the hydrodynamic influence of the vessel's hull on the operating conditions of the propellers, as applied to the module under consideration, designed for towing timber transport units along medium and small rivers, can give significant errors. This is explained by the ratio of displacement to propeller diameter, which is atypical for conventional vessels, the presence of a compressed flow between the pontoons of the catamaran-type floating base, and the placement of the propellers outside the transverse dimensions of the pontoons, which weakens the influence of the following flow. As a result of a numerical experiment based on the finite element method using the SOLIDWORKS Flow Simulation program, the theoretical propositions were confirmed. When processing data on characteristic longitudinal sections, it was found that in the inter-pontoon space the flow velocity does not decrease, but increases, and only at some distance from the stern does it begin to decrease, remaining at a significant distance less than the relative velocity of the module. This is explained by the fact that in the inter-pontoon space and immediately behind it, the flow compression factor is more significant than the factor of the presence of a passing flow. Based on data from a number of cross sections, approximating dependencies were obtained for determining the velocities by coordinates in the section. Using these dependencies, a specially developed algorithm was used to calculate average speeds within circular contours for each cross-section, corresponding to the location of one propeller in the diametrical plane and two propellers symmetrical relative to it. The values of the required coefficient are established based on them. When placing propellers in the inter-pontoon space, it should be taken as - 0.08...- 0.09 when installing one propeller and - 0.09...- 0.11 when installing two. To determine this when installing propellers behind the stern of the module, approximating dependencies were obtained. The range of change of the coefficient behind the stern is from -0.08 to 0.06 when the distance from the midship changes from 3.25 to 4.90 m. Recommendations are given for determining the locations of installation of propellers, taking into account, along with the speed, other factors.

Keywords: *timber rafting, timber transport units, towing, propeller, consequential flow, flow compression*

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Posypanov S. V., Kalitin N. S. (2026) Evaluation of the hydrodynamic Influence of the Hull of a towing timber transport Module on the operating Conditions of the Propellers. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 204–216 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/13>.

Received 05.02.2026. **Revised** 30.03.2026. **Accepted** 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Буксировочный модуль [1], разрабатываемый для транспортировки лесоматериалов по средним и малым рекам, представляет собой плавучее основание катамаранного типа, на котором установлены двигатель, движители и соединяющая их трансмиссия. Он отличается простотой конструкции, относительно невысокой стоимостью и возможностью дистанционного управления с сопровождающего судна. Модули могут соединяться между собой для транспортировки укрупнённых лесотранспортных единиц, а их малые масса и габариты позволяют осуществлять погрузку-выгрузку и перевозку с помощью сортиментовоза, оснащённого манипулятором. Это обеспечивает их быстрый возврат к месту отправления леса без холостого хода против течения, что особенно важно в условиях короткой навигации. Таким образом, появляется возможность более активно использовать самый дешёвый водный транспорт лесоматериалов, обеспечивая экономическую доступность древесного сырья из удалённых лесных массивов [2, 3, 4]. Предпосылкой этому является также наличие лесотранспортных единиц и соответствующих технологий, предназначенных для экологически щадящей доставки древесного сырья по средним и малым рекам [2, 4, 5]. Так как модули предназначены только для буксировки лесотранспортных единиц, обладающих большим гидродинамическим сопротивлением, их движители логично проектировать, ориентируясь лишь на этот рабочий режим с целью получения максимально возможной тяги при данной мощности силовой установки. Скорость буксировки лесотранспортных единиц обычно невелика и составляет 4–5 км/ч (классические работы по лесосплаву: Минаев и др., 1991²; Пятакин и др., 1985³), что необходимо для обеспечения достаточной управляемости. При таких малых скоростях целесообразно использовать винты с особо малым шаговым отношением и с наибольшим возможным диаметром. Конструкция модуля в виде катамарана также нетипична для буксировщика и продиктована стремлением к снижению стоимости и обеспечению остойчивости (Войткунский и др.⁴, 1982; Войткунский, 1988⁵). От обычных судов модуль существенно отличается соотношением малого водоизмещения и диаметра

винтов, а также наличием сжатого потока между понтонами. Очень важно должным образом спроектировать движители буксировочного модуля. Общий алгоритм проектирования движителей судов для внутреннего плавания регламентирован классическим руководством (Басин и Степанюк, 1977⁶). Однако буксировочный модуль имеет существенные особенности, которые могут влиять на один из важнейших факторов – гидродинамическое влияние корпуса на условия работы движителей (попутный поток).

Цель исследования – обеспечение достоверности результатов при проектировании движителей буксировочного лесотранспортного модуля посредством более точной оценки гидродинамического влияния плавучего основания устройства на условия работы гребных винтов. *Объект исследования* – система «плавучее основание – движители» буксировочного лесотранспортного модуля. *Предмет исследования* – гидродинамическое влияние корпуса буксировочного модуля на условия работы движителей.

Обзор литературы

В процессе буксировки формируется сложная многокомпонентная система, которая подвержена совместному воздействию многих факторов. Как отмечают Qi K. с соавторами [6], современные исследования в этой области фокусируются на численном моделировании и физическом эксперименте, причём вопросы учёта гидродинамического взаимодействия корпуса и движителя остаются недостаточно проработанными для судов нестандартной компоновки. В связи с тем, что разрабатываемый модуль имеет плавучее основание катамаранного типа, существенный интерес в данном случае представляет работа Пескова И.А. и Посыпанова С.В. [7], в которой приведены результаты гидродинамического исследования катамараноподобного тела. Эти результаты получены посредством основательной теоретической проработки и физического моделирования (масштаб 1:20) с соблюдением подобия по числу Фруда. Данная работа даёт методологию учёта ключевых факторов и позволяет оценить характер и степень влияния каждого из них на выходные величины.

² Минаев А.Н., Беленов И.А., Козленков Н.И. Лесосплавной флот. – М.: Экология, 1991. – 272 с.

³ Пятакин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. – М.: Лесн. пром-сть, 1985. – 336 с.

⁴ Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. – Л.: Судостроение, 1982. – 568 с.

⁵ Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.

⁶ Руководство по расчету и проектированию гребных винтов судов внутреннего плавания / под ред. А.М. Басина, Е.И. Степанюка. – Л.: Транспорт, 1977. – 272 с.

Важный методологический вклад вносит работа Deng R. с соавторами [8], посвящённая совместной оптимизации главных размерений и формы корпуса балкера. Авторы использовали эмпирические методы Холтропа и Меннена (сопротивление), Бейлза (мореходность) и индексы К и Т Номото (управляемость), скорректировав их по данным CFD-расчётов. Введённый комплексный оптимизационный индекс Z , учитывающий стоимость постройки, позволил выбрать новый корпус-прототип. Последующая оптимизация формы по минимуму волнового сопротивления дала дополнительное снижение сопротивления до 1,5%, подтверждённое опытовыми испытаниями. Эта методология коррекции эмпирических формул по данным численного моделирования адаптирована в настоящем исследовании для обоснования расположения движителей. Непосредственно для оценки поля скоростей в диске винта за корпусом катамарана важны результаты Zaghi S. с соавторами [9], которые на основе CFD-моделирования показали, что форма межкорпусного канала существенно влияет на эпюру попутного потока. Audin C. с соавторами [10] и Piaggio B. с соавторами [11, 12] предложили методы расчёта гидродинамических нагрузок на буксировщики с учётом особенностей их обводов, что позволяет уточнить коэффициент засасывания при проектировании движителей. Mauro F. [13] развил подходы к оценке пропульсивных качеств судов внутреннего плавания, включая влияние попутного потока. Применительно к условиям мелководья и стеснённых фарватеров, характерных для малых и средних рек, важные результаты получены в работах Chen M. с соавторами [14] и Huang Y. с соавторами [15], где показано, что учёт попутного потока при проектировании движителей позволяет повысить точность прогнозирования тяговых характеристик на 10–15% по сравнению с использованием стандартных эмпирических формул. Fitriadhy A. и Yasukawa H. [16], а также Zhu H. и Hu C. [17] разработали математические модели, описывающие влияние корпуса на работу движителя в нестационарных режимах буксировки (начало движения, маневрирование). Nan Y. с соавторами [18] исследовали взаимодействие системы «корпус – движитель» при ледовых нагрузках, что актуально для северных регионов. Экспериментальные методы верификации CFD-расчётов поля попутного потока представлены в работах Park S.H. с соавторами [19] и Nam T.K. с соавторами [20]. Фундаментальные подходы к проектированию гребных винтов и оценке их взаимодействия с корпусом изложены в монографиях Carlton J.S. [21] и Molland A.F. с соавторами [22].

Таким образом, анализ современных работ и классических трудов показывает, что для нестандартных схем (катамаран, малое

водоизмещение, большие диаметры винтов) стандартные эмпирические зависимости коэффициента попутного потока могут давать существенные погрешности. В настоящей работе на основе численного эксперимента (SOLIDWORKS Flow Simulation) исследуется поле скоростей в межпонтонном пространстве и за кормой модуля, затем вычисляется фактический коэффициент попутного потока для различных положений винтов. Полученные аппроксимирующие зависимости позволяют уточнить гидродинамическое влияние корпуса катамаранного типа на работу движителей – что является необходимым условием для корректного проектирования гребных винтов буксировочного модуля.

Материалы и методы исследования

Гидродинамическое влияние корпуса судна или, в нашем случае, плавучего основания буксировочного модуля на условия работы движителей осуществляется через так называемый попутный поток. Этот поток возникает у смоченных поверхностей судна при движении его в воде. Его влияние сказывается и за кормой судна на некотором удалении от неё. В результате гребные винты у обычного судна движутся поступательно относительно потока со скоростью несколько меньшей скорости самого судна. Поступательная скорость винтов v_0 и судна v связаны формулой

$$v_0 = v(1 - \varphi), \quad (1)$$

где φ – коэффициент попутного потока.

Величина коэффициента φ зависит от водоизмещения судна V , формы подводной части корпуса, характеризуемой коэффициентом полноты водоизмещения δ , а также от диаметра винтов D и их расположения относительно корпуса. При расчётах движителей обычных судов для вычисления коэффициента φ как правило используется выражение

$$\varphi = 0,11 + \frac{0,16}{a} \delta^a \sqrt{\frac{3}{V}}. \quad (2)$$

При числах Фруда [18], превышающих 0,2, из полученной величины вычитается небольшая поправка, зависящая от коэффициента полноты водоизмещения, длины корпуса судна и скорости движения. При скоростях буксировки лесотранспортных единиц и геометрических характеристиках плавучего основания буксировочного модуля числа Фруда меньше указанного значения. В связи с этим нет необходимости более подробно рассматривать указанную поправку.

Величина a характеризует расположение винтов. При установке винта в диаметральной плоскости судна она равна 1, для бортовых движителей 2. Учитывая, что коэффициент δ меньше единицы, при $a = 2$, то есть для бортовых винтов коэффициент φ в соответствии

с выражением (2) меньше, чем для винта, расположенного в диаметральной плоскости. Поскольку движители буксировочного модуля смещены относительно диаметральных плоскостей понтонов плавучего основания их можно считать бортовыми. В результате предварительных расчётов установили, что при заданных геометрических характеристиках плавучего основания буксировочного модуля и при диапазоне диаметров винтов 0,5-1,0 м коэффициент φ принимает значения 0,14-0,15. При таких величинах указанного коэффициента влияние попутного потока на параметры винтов довольно существенно. Как было отмечено водоизмещение плавучего основания буксировочного модуля по сравнению с обычными лесосплавными судами невелико. Это объясняется тем, что оно рассчитано в основном на нагрузку от двигателя и ёмкостей с топливом. Диаметр винтов модуля не столь существенно отличается от соответствующих диаметров указанных судов в связи с стремлением к получению максимально возможной полезной тяги. То есть у обычных судов отношение водоизмещения к диаметру винтов больше, чем у буксировочного модуля и согласно выражению (2) они имеют большие значения φ . Влияние попутного потока на параметры движителей у этих судов ещё более существенно. Формула (2) эмпирическая, то есть справедлива в тех диапазонах варьируемых факторов и для тех условий, для которых она получена. Поскольку соотношение водоизмещения и диаметра винтов у буксировочного модуля нетипично для обычных судов правомерность использования формулы (2) в данном случае уже ставится под сомнение. Кроме того, у обычного судна даже бортовые винты не выходят за поперечный габарит корпуса. У буксировочного модуля с плавучим основанием катамаранного типа винт или винты могут быть существенно смещены относительно поперечного габарита понтонов и соответственно менее подвержены влиянию попутного потока, прилегающего к этим понтонам. Это ещё в большей степени ставит под сомнение справедливость формулы (2) применительно к рассматриваемому модулю. Следует ожидать, что влияние попутного потока на движители буксировочного модуля будет гораздо слабее. Также следует иметь в виду, что поток входя в пространство между понтонами после прохождения носовой части испытывает некоторое сжатие, что предполагает увеличение его скорости.

Для оценки соотношения между скоростями движения относительно воды модуля и его движителей проведено соответствующее исследование. Проведение экспериментов на физических моделях по исследованию поля скоростей в зоне установки движителей буксировочного модуля требует довольно дорогостоящего оборудования и весьма трудоёмко.

В ещё большей степени это относится к экспериментальным исследованиям в натурных условиях. В связи с этим обратились к методам численного моделирования (CFD), к вычислительной гидродинамике, которые интенсивно развиваются в настоящее время и позволяют получать результаты с достаточно высокой точностью. В основу указанного моделирования заложен метод конечных элементов (FEA). При исследованиях использовали программу SOLIDWORKS Flow Simulation.

Приступая к исследованиям, создали 3D модель плавучего основания буксировочного модуля (рис. 1) с размерами в плане 6,5х2,35 м. Диаметр понтонов 0,6 м, расчётная осадка 0,4 м. При заданных размерах и предполагаемых скоростях движения как было отмечено число Фруда не превышает 0,2. Принято считать, что в таких случаях скорость движения не влияет на величину коэффициента попутного потока. Иначе можно сказать, что соотношение между скоростью движения модуля и скоростями потока в области установки движителей не зависит от величины первой из них в рассматриваемом диапазоне. Поэтому исследование проводили при постоянной скорости движения модуля в процессе буксировки равной 1,25 м/с, то есть 4,5 км/ч. Пояснения по этой величине приведены выше.

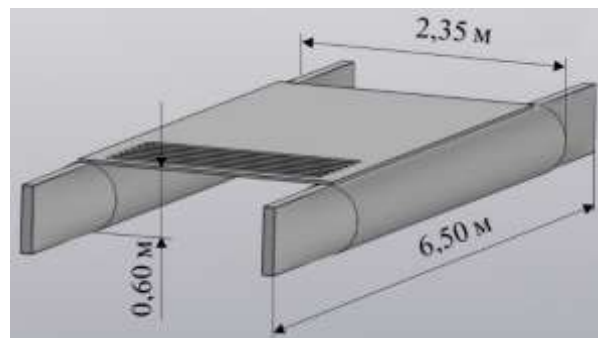


Рисунок 1. 3D модель плавучего основания буксировочного модуля

Figure 1. 3D model of the floating base of the towing module

При численном моделировании расчётная сетка строилась на основе гексаэдрических элементов с призматическими слоями в пристеночной области. Для задачи был задан шестой уровень разрешения (при максимально возможном 7). Расчётная сетка генерировалась программой в соответствии с заданным уровнем. Количество ячеек составило 1 512 128, что обеспечило детальное разрешение поля скоростей. Для повышения точности в зонах с более высокими градиентами скоростей (межпontonное пространство, кормовая оконечность)

осуществлялась адаптация сетки с уровнем дробления 2 и доведением числа ячеек до 5 950 000. Значение u^+ в пристеночных ячейках поддерживалось программой менее 30, что соответствует рекомендациям для модели турбулентности k-ε с пристеночными функциями.

Задавались следующие граничные условия. На входе в расчётную область (X_{min}) скорость потока 1,25 м/с, среднее статическое давление 102 кПа. На выходе (X_{max}) – среднее статическое давление 102 кПа. Границы расчётной области при Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} , Z_{max} свободные с возможностью втекания-вытекания. Свободная поверхность жидкости моделировалась с использованием модели двухфазной среды «вода–воздух» с гравитацией (Y компонента – 9,81 м/с²).

Шероховатость поверхности 50 мкм. Тип течения – ламинарное и турбулентное, модель турбулентности – k-ε со стандартными параметрами.

Результаты численных экспериментов визуализировали посредством линий одинаковых скоростей – изотах в продольных сечениях. Такие сечения строили в диаметральной плоскости плавучего основания, между этой плоскостью и внутренними образующими понтонов, у этих образующих, в диаметральных плоскостях понтонов и у внешних образующих понтонов. Изотахи строились по задаваемым сечениям средствами SOLIDWORKS Flow Simulation автоматически. Шаг между изотахами устанавливался программой в зависимости от диапазона получаемых скоростей. Фрагмент одного из таких сечений в качестве примера приведен на рисунке 2.

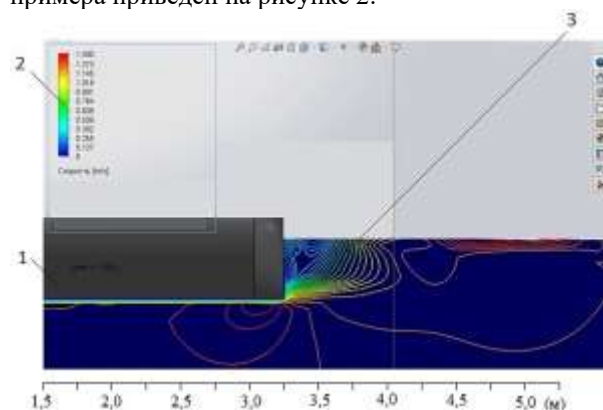


Рисунок 2. Фрагмент продольного сечения в диаметральной плоскости понтона: 1 – кормовая часть понтона плавучего основания; 2 – шкала скоростей; 3 – изотахи

Figure 2. Fragment of a longitudinal section in the centerline plane of the pontoon: 1 – aft part of the floating base pontoon; 2 – speed scale; 3 – isotachs

По изотахам для каждого из упомянутых продольных сечений заполнили таблицы, в которые

занесли скорости на различных удалениях x от среднего поперечного сечения плавучего основания или иначе от миделя и при различных значениях координаты z . Ось z в данном случае направлена вертикально вниз. Одна из таких таблиц (табл. 1) для примера приведена ниже.

Структура таблиц для всех продольных сечений одинакова. При этом сочетание заполненных и незаполненных ячеек различно, что объясняется особенностями прохождения изотах в разных сечениях. Совокупность данных по всем сечениям даёт достаточно полное представление о поле скоростей в рассматриваемой зоне.

По данным полученных таблиц были построены графики зависимостей скоростей от x и z для всех упомянутых продольных сечений. В качестве примера такие графики представлены на рисунке 3 для диаметральной плоскости плавучего основания модуля.

На рисунке 3 по ряду величин z графики не представлены в связи с их выраженной фрагментарностью, объясняющейся наличием большего количества пустых ячеек в соответствующей таблице. Эти фрагментированные графики сделали бы рисунок менее наглядным. Характер зависимостей у приведённых и не приведённых графиков аналогичен при некоторых количественных различиях.

Таблица 1
Данные о скоростях потока в
диаметральной плоскости плавучего основания
Table 1
Data on flow velocities in the centerline of the
floating base

Удаление от миделя x , м Distance from midship x , m	Скорости (м/с) при z 0,280-0,850 м Velocity (m/s) at z 0.280-0.850 m				
	0,280	0,300	0,450	0,665	0,850
2,80	1,350	-	1,362	-	1,328
2,85	-	-	-	1,346	-
3,00	-	-	1,374	1,346	1,326
3,10	1,323	-	1,374	1,343	-
3,15	-	-	-	-	1,317
3,25	-	-	-	1,330	-
3,30	1,291	-	1,361	-	1,304
3,60	-	1,258	1,297	1,275	1,266
3,80	-	-	-	1,241	-
3,90	-	1,187	1,224	-	-
4,00	-	-	-	1,215	1,222
4,20	-	1,160	1,185	1,200	1,209
4,40	-	1,167	1,177	1,191	1,201
4,50	-	-	-	1,189	-

4,60	-	1,174	1,172	1,185	1,196
4,75	-	-	-	1,183	-
4,80	-	-	-	-	1,193
4,90	-	1,171	1,167	1,181	-

Учитывая, что кормовые окончания понтонов плавучего основания удалены от миделя на 3,25 м, отмечаем, что между понтонами скорость потока несколько больше расчётной скорости буксировки равной 1,25 м/с (рис. 3). До выхода из межпонтонного пространства изменения скорости потока незначительны. Это подтверждает изложенные выше предположения об увеличении скорости в результате стеснения потока между понтонами и о более слабом, чем у обычных судов влиянии попутного потока. В данном случае воздействие первого фактора более существенно.

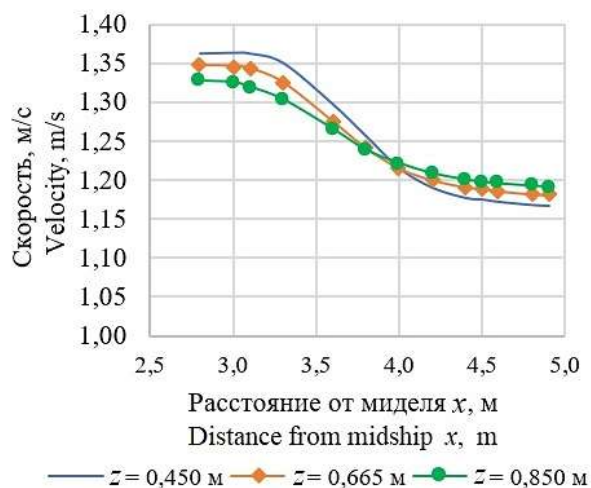


Рисунок 3. Графики зависимостей скоростей в диаметральной плоскости плавучего основания модуля от расстояний, отсчитываемых от миделя x, для различных z

Figure 3. Graphs of the dependence of the speeds in the center plane of the floating base of the module on the distances measured from the midsection x, for different z

После выхода из межпонтонного пространства поток несколько расширяется и его скорость начинает снижаться (рис. 3), при этом некоторое воздействие попутного потока продолжается. Более интенсивное снижение скорости наблюдается на начальном участке за кормой плавучего основания. Примерно через полметра от кормы скорость потока становится равной 1,25 м/с. Далее следует участок более постепенного снижения скорости и её стабилизации. Очевидно, что на большем удалении, величина которого в рассматриваемом случае не имеет практического значения, перестаёт сказываться

влияние и попутного потока. Скорость движения воды относительно буксировочного модуля возвращается к величине близкой 1,25 м/с. Подобный анализ выполнен по всем упомянутым продольным сечениям и всем рассмотренным z. Его результаты аналогичные при некоторых количественных отличиях. Из изложенной информации следует, что гидродинамическое влияние плавучего основания буксировочного лесотранспортного модуля на работу движителей существенно отличается от соответствующего влияния у обычных судов. Формула (2) в рассматриваемом случае даёт существенные погрешности. Для более корректной оценки упомянутого влияния выполнены следующие действия.

По данным численного эксперимента заполнили таблицы скоростей для девяти поперечных сечений потока, удалённых от миделя на 2,8, 3,0, 3,1, 3,3, 3,6, 4,2, 4,4, 4,6, 4,9 м. Одна из этих таблиц (табл. 2) для примера приведена ниже.

Таблица 2

Данные о скоростях потока в поперечном сечении, удалённом от миделя на 4,2 м

Table 2

Data on flow velocities in the cross-section 4.2 m from the midship section

Координата z, м Coordinate z, m	Скорости (м/с) на удалении от диаметральной плоскости на y 0-1,270 м Velocity (m/s) at a distance from the centerline at y 0-1.270 m				
	0	0,280	0,560	0,911	1,270
0,300	1,160	1,165	1,165	1,177	1,192
0,450	1,185	1,183	1,170	1,139	1,177
0,665	1,200	1,196	1,187	1,183	1,196
0,850	1,209	1,207	1,202	1,202	1,209

Отметим, что и в данном случае в ряде таблиц не все ячейки были заполнены по ранее указанной причине.

Используя данные этих таблиц с помощью программы IBM SPSS Statistics 23 [20] получили для каждого из указанных сечений уравнения регрессии, приведённые ниже в соответствующей последовательности, начиная с сечения, удалённого от миделя на 2,8 м.

$$v_1 = 1,343 + 0,070z + 0,033y - 0,104z^2 - 0,0341y^2 + 0,0284yz; \quad (3)$$

$$v_1 = 1,287 + 0,298z + 0,268y - 0,310z^2 - 0,0626y^2 - 0,180yz; \quad (4)$$

$$v_1 = 1,092 + 1,104z + 0,053y - 1,086z^2 - 0,0141y^2 + 0,0296yz; \quad (5)$$

$$v_1 = 1,042 + 1,173z + 0,0856y - 0,0139y^2 - 0,080yz; \quad (6)$$

$$v_1 = 1,327 - 0,161z - 0,307y + 0,143z^2 + 0,147y^2 + 0,103yz; \quad (7)$$

$$v_1 = 1,168 - 0,0144z - 0,021y + 0,0871z^2 + 0,0299y^2 - 0,0306yz; \quad (8)$$

$$v_1 = 1,175 - 0,0462z + 0,0713y + 0,093z^2 - 0,00326y^2 - 0,0803yz; \quad (9)$$

$$v_1 = 1,197 - 0,114z + 0,0791y + 0,129z^2 - 0,0164y^2 - 0,0591yz; \quad (10)$$

$$v_1 = 1,254 - 0,401z + 0,060y + 0,434z^2 - 0,0108y^2 - 0,0532yz; \quad (11),$$

где v_1 - скорость в заданной точке поперечного сечения, м/с.

Сравнение результатов, полученных при проведении численного эксперимента, с соответствующими результатами, вычисленными по приведённым уравнениям регрессии, в большинстве случаев показало расхождение не более 1-2%, в редких случаях около 3%. Отчасти это объясняется относительно небольшой амплитудой изменения результатов в пределах поперечного сечения. Наличие этих уравнений регрессии позволяет достаточно точно вычислять скорости в любой из точек рассматриваемых поперечных сечений.

Далее в приложении Microsoft Excel был реализован разработанный авторами алгоритм определения скоростей в точках поперечных сечений, в круглых контурах предполагаемого расположения гребных винтов. При расчётах и использовались полученные уравнения регрессии (3)-(11). Вычисления выполнялись для случаев расположения одного винта в диаметральной плоскости плавучего основания и двух винтов, расположенных симметрично относительно указанной плоскости. Скорости вычислялись с шагом 0,01 м по горизонтали и по высоте. Для установления принадлежности конкретной точки к кругу заданного радиуса вычислялась сумма квадратов расстояний от неё до вертикальной и горизонтальной осей круга. Если эта сумма оказывалась меньше квадрата радиуса или равна ему, то вычислялась скорость, в противном случае её вычисление не выполнялось. В целом на один круг, соответствующий месту расположения винта, получалось более 2300 равномерно распределённых точек. За скорость v_0 в зоне расположения винта принимали среднее значение скоростей v_1 , вычисленных по указанным точкам. Результаты расчётов скоростей v_0 приведены в таблице 3.

Таблица 3

Средние скорости v_0 по поперечным сечениям в зонах одного и двух винтов, м/с

Table 3

Average velocities v_0 across cross sections in the zones of one and two propellers, m/s

Расстояние сечения от миделя x , м Distance of the section from midship x , m	1 винт 1 propeller	2 винта 2 propellers
2,8	1,352	1,358
3,0	1,365	1,393
3,1	1,356	1,368
3,3	1,365	1,371
3,6	1,259	1,226
4,2	1,186	1,181
4,4	1,183	1,188
4,6	1,181	1,188
4,9	1,178	1,182

По полученным значениям v_0 для каждого поперечного сечения находили величины коэффициента φ для случаев использования одного и двух винтов. При этом использовали выражение, полученное из формулы (1).

$$\varphi = 1 - \frac{v_0}{v}. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

В данном случае называть величину φ коэффициентом попутного потока не совсем правильно, поскольку в действительности с её помощью помимо влияния попутного потока учитывается влияние сжатия потока между понтонами. Причём влияние второго фактора на определённом участке в данном случае более существенно. В связи с этим решили далее называть эту величину коэффициентом перехода к скорости поступательного перемещения движителей. Отметим также, что в межпontonном пространстве этот коэффициент принимает отрицательные значения поскольку скорость потока там больше скорости движения буксировочного модуля, в связи с тем, что фактор сжатия потока там более значим, чем фактор попутного потока. За кормой буксировочного модуля значимость факторов меняется на противоположную и коэффициент φ становится положительным. С удалением от кормы его величина возрастает.

Согласно полученным данным наиболее благоприятный скоростной режим для работы движителей будет иметь место при их установке в межпontonном пространстве или непосредственно при выходе из него в кормовой зоне плавучего

основания буксировочного модуля. Значение коэффициента φ при расчётах в этом случае следует принимать $-0,08 \dots -0,09$ при установке одного винта и $-0,09 \dots -0,11$ при установке двух. При отрицательных значениях коэффициента φ , то есть при увеличенной по сравнению с забортной набегающей скорости на движители, увеличивается относительная поступь винтов и соответственно согласно диаграммам Папмеля увеличивается их КПД. На расстоянии от кормы $0,05 \dots 0,10$ м начинается увеличение значения коэффициента φ . Это наглядно демонстрирует графики, приведённые на рисунке 4. Следует иметь в виду, что корма плавучего основания заканчивается на расстоянии $3,25$ м от миделя.

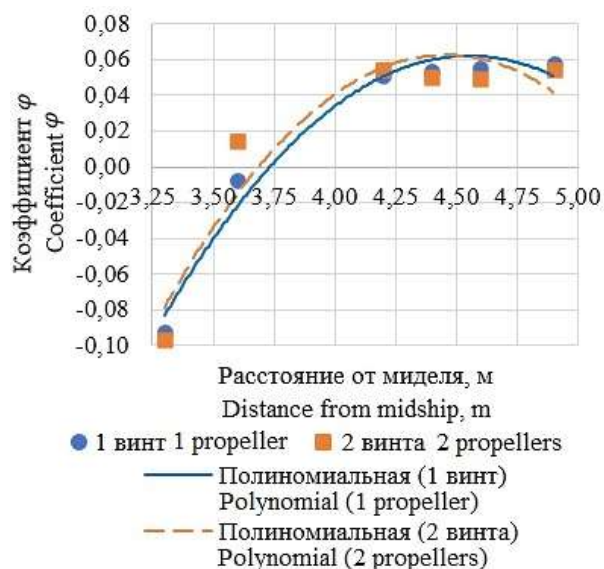


Рисунок 4. Графики зависимости коэффициента φ от расстояния от миделя
Figure 4. Graphs of the dependence of the coefficient φ on the distance from the midship

По графикам видно (рис. 4), что при теоретически возможном расположении движителей на расстоянии $4,5$ м от миделя коэффициент φ у данного плавучего основания достигает максимального значения $0,06$. Напомним, что расчёт по формуле (2), предназначенной для обычных судов, при том же водоизмещении и диаметре бортовых винтов даёт результат $\varphi = 0,14 \dots 0,15$. То есть даже при сравнении с максимумом значения коэффициента φ различаются в $2,5$ раза. Соответствующие данные для катамаранов при литературном поиске не обнаружены.

Для возможности расчёта коэффициента φ при установке винтов за кормой буксировочного модуля получены соответствующие графикам

аппроксимирующие зависимости. Для случая установки одного винта зависимость имеет вид

$$\varphi = -0,0926x^2 + 0,843x - 1,856, \quad (13)$$

$$R^2 = 0,98;$$

при установке двух винтов

$$\varphi = -0,103x^2 + 0,926x - 2,011, \quad (14)$$

$$R^2 = 0,93.$$

Разумеется, при выборе места установки движителей наряду со скоростным режимом следует учитывать и другие факторы. В частности, если предполагается использование винторулевых колонок, то установка их между понтонами может быть несколько проблематичной поскольку при их повороте на пути потока, отбрасываемого винтами, могут оказаться кормовые части понтонов. Поэтому такие колонки целесообразно устанавливать в створе, проходящем через кормовые окончания понтонов. Кроме того, в межпontonном пространстве можно установить либо один винт достаточно большого диаметра, либо два диаметром не более $0,5$ м, поскольку поперечный габарит буксировочного модуля лимитирован условиями перевозки. При этом расчёты показывают, что при использовании силовой установки мощностью 125 кВт и более при необходимости получения наибольшей тяги и эффективном использовании мощности двигателя при условии достаточных глубин на маршрутах целесообразно применение двух винтов с диаметрами, превышающими $0,5$ м. В таких случаях створ расположения винтов должен быть вынесен за кормовые окончания понтонов в непосредственной близости от них. В любом случае применение для рассматриваемого буксировочного модуля плавучего основания катамаранного типа наряду с другими достоинствами, указанными в введении, обеспечивает более благоприятный скоростной режим для работы движителей, чем у обычных буксирных судов.

Заключение

В результате теоретического анализа сделан вывод о том, что формула, обычно применяемая для определения коэффициента попутного потока, с помощью которого оценивается гидродинамическое влияние корпуса судна на скоростной режим, в котором работают движители, для рассматриваемого буксировочного лесотранспортного модуля может давать существенные погрешности. При этом отмечены три основных особенности буксировочного модуля, позволивших сделать такой вывод. Первая особенность - нетипичное для обычных судов соотношение водоизмещения плавучего основания и диаметра винтов, что важно для эмпирической формулы. Вторая особенность - наличие сжатия водного потока между понтонами плавучего основания, что может влиять не менее существенно на скоростной режим в месте расположения движителей, чем наличие попутного потока. Третья

особенность - винты размещаются за пределами поперечного габарита понтонов в то время, как у обычных судов даже бортовые винты не выходят за поперечный габарит корпуса, что предполагает в рассматриваемом случае более слабое влияние попутного потока.

В ходе проведения численных экспериментов подтверждена правильность выводов, сделанных на этапе теоретического исследования. При анализе полученных данных по характерным продольным сечениям потока установлено, что скорость в межпontonном пространстве буксировочного модуля выше скорости его движения, что объясняется фактором стеснения потока, который на данном участке более значим, чем фактор попутного потока. За кормой буксировочного модуля при выходе потока из межпontonного пространства значимость факторов меняется. Скорость потока уменьшается и постепенно становится меньше скорости движения модуля. При этом соответствующий коэффициент, учитывающий снижение скорости, остаётся существенно меньше значений, получаемых по обычно используемой формуле. Это свидетельствует о более благоприятном скоростном режиме для работы движителей при предлагаемом техническом решении.

Для установления более достоверных сведений о величине указанного коэффициента с использованием данных численного эксперимента по нескольким поперечным створам получены для каждого из них аппроксимирующие зависимости (3)-(11) скорости от координат. Для каждого створа с использованием указанных зависимостей по специально разработанному алгоритму вычислены средние скорости в пределах круглых контуров, соответствующих расположению одного винта в диаметральной плоскости и двух винтов симметричных относительно её. По этим скоростям установлены значения так называемого коэффициента попутного потока, которому в данном случае присвоено более соответствующее название коэффициента перехода к скорости поступательного перемещения движителей. Значение этого коэффициента при размещении движителей в межпontonном пространстве следует принимать – 0,08...- 0,09 при установке одного винта и - 0,09...- 0,11 при установке двух. Для определения значений указанного коэффициента в случае установки винтов за кормой буксировочного модуля получены соответствующие аппроксимирующие зависимости (13), (14).

Наиболее благоприятный скоростной режим для работы движителей будет иметь место при их установке в межпontonном пространстве на расстоянии до полуметра от кормовой оконечности понтонов. В межпontonном пространстве данного модуля можно установить либо один винт

достаточно большого диаметра, либо два диаметром не более 0,5 м. При установке двух движителей большего диаметра створ расположения винтов должен быть вынесен на минимально возможное расстояние за кормовые окончания понтонов. Если предполагается использование одной винторулевой колонки или двух с диаметром движителей до 0,5 м, их целесообразно устанавливать в крайнем кормовом створе или в непосредственной близости от него со стороны носовой части так, чтобы при их повороте на пути потока, отбрасываемого винтами, не оказались кормовые части понтонов.

1. Посыпанов С.В., Калитин Н.С. Экспериментальное исследование эффективности вариантов герметизации FDM-моделей буксировочных устройств для транспортировки малогабаритных лесотранспортных единиц // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2026. - № 4. - С. 36-39. - DOI: 10.31044/1684-2561-2026-0-4-36-39.
2. Васильев В.В., Афоничев Д.Н. Использование плоских сплотовых единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. - 2022. - № 1. - С. 128-142. - DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
3. Посыпанов С.В., Карпачев С.П., Клевеко В.И. Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов // Известия вузов. Лесной журнал. - 2025. - № 1. - С. 164-176. - DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-164-176.
4. Посыпанов С.В., Карпачёв С.П. Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплотовых единиц при формировании в воде // Известия вузов. Лесной журнал. - 2026. - № 1. - С. 161-173. - DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-161-173.
5. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплотовых единицах по принципу плот (линейка) – плот. Resources and Technology. 2021; 18 (2): 48-78. - DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
6. Qi K., Zhang J., Zhang L., Zhang J., Gan R. A Review of Research Progress on Cables and Towed Objects of the Ocean Engineering Towing System. Journal of Marine Science and Engineering. 2025; 13 (2): 257. - DOI: 10.3390/jmse13020257.
7. Песков И.А., Посыпанов С.В. Исследование равномерного движения в воде устройства для формирования двухъярусных пакетных сплотовых единиц // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. - 2020. - № 4 (48). - С. 41-49. - DOI: 10.25686/2306-2827.2020.4.41.
8. Deng R., Wang S., Hu Y., Wang Y., Wu T. The Effect of Hull Form Parameters on the Hydrodynamic Performance of a Bulk Carrier. Journal of Marine Science and Engineering. 2021; 9 (4): 373. - DOI: 10.3390/jmse9040373.
9. Zaghi S., Broglia R., Di Mascio A. Analysis of the wake field in the propeller plane of a twin-hull vessel using CFD. Applied Ocean Research. 2025; 145: 103920. - DOI: 10.1016/j.apor.2025.103920.
10. Aydın Ç., Ünal U., Karabulut U., Sariöz K. Practical computational procedures for predicting steering and braking forces of escort tugs. Ocean Engineering. 2018; 166: 159-171. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.058.
11. Piaggio B., Villa D., Viviani M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics. Applied Ocean Research. 2020; 97: 102075. - DOI: 10.1016/j.apor.2020.102075.
12. Piaggio B., Villa D., Viviani M., Figari M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics – Part II: The skeg effect. Applied Ocean Research. 2020; 100: 102199. - DOI: 10.1016/j.apor.2020.102199.
13. Mauro F. A flexible method for the initial prediction of tugs escort capability. Ocean Engineering. 2022; 246: 110585. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110585.
14. Chen M., Chen Y., Li T., Tang Y., Ye J., Zhou H., Ouyang M., Zhang X., Shi W., Sun X. Analysis of the wet-towing operation of a semi-submersible floating wind turbine using a single tugboat. Ocean Engineering. 2024; 299: 117354. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117354.
15. Huang Y., He Y., Liu Y., Qiu M. Study of the wet-towing transportation of an FPSO with elastomeric-supporting topside modules. Ocean Engineering. 2024; 293: 116602. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116602.
16. Fitriadhy A., Yasukawa H. Course stability of a ship towing system in wind. Ocean Engineering. 2013; 64: 135-145. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.02.004.
17. Zhu H., Hu C. A unified seakeeping and maneuvering analysis of multiple linked towing system with triangular bodies. Ocean Engineering. 2021; 222: 108577. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108577.
18. Han Y., Zhu X., Zhou L. Numerical simulation of multi-tug towing of a gravity-based structure in broken sea ice. Ocean Engineering. 2022; 261: 112070. - DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112070.
19. Park S.H., Lee S.J., Lee S. Experimental investigation of towing- and course-stability of a FPSO towed by a tugboat with lateral motion. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2021; 13: 12-23. - DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.12.003.
20. Nam T.K., Jung C.H., Kim J.M., Choi H. A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments. Journal of Navigation and Port Research. 2014; 38 (5): 463-470. - DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.5.463.
21. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. 4th ed. // Butterworth-Heinemann. - 2019. - 586 p. - ISBN: 978-0-08-100366-4.

22. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. 2nd ed. // Cambridge University Press. – 2017. – 632 p. – ISBN: 978-1-107-14129-8.

References

1. Posypanov S.V., Kalitin N.S. Eksperimental'noe issledovanie effektivnosti variantov germetizatsii FDM-modelej buksirovochnykh ustroystv dlya transportirovki malogabaritnykh lesotransportnykh edinits. [Experimental study of the effectiveness of sealing options of FDM models of towing devices for transporting small-sized timber transport units]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Restoration. Modernization*. 2026;4:36-39. (In Russ.). DOI: 10.31044/1684-2561-2026-0-4-36-39.
2. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Ispolzovanie ploskikh splotochnykh edinit na pervonachalnom splave lesomaterialov. [The use of flat rafting units for the primary timber rafting]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2022;1:128-142. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
3. Posypanov S.V., Karpachev S.P., Kleveko V.I. Raschetnye usiliya pri tortsevanii lesosplavnykh puchkov v usloviyakh beregovykh skladov. [Calculation of forces during trimming of timber rafts at coastal warehouses]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2025;1:164-176. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-164-176.
4. Posypanov S.V., Karpachyov S.P. Silovoe vyravnivanie tortsov dvukhyarusnykh paketnykh splotochnykh edinit pri formirovani v vode. [Strength alignment of the ends of two-tier packaged raft units when forming in water]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2026;1:161-173. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-161-173.
5. Vasiliev V.V., Afonichev D.N. Obosnovanie parametrov transportno-tehnologicheskoy skhemy postavki drevesiny v ploskikh splotochnykh edinitakh po printsipu plot (lineyka) – plot. [Justification of the parameters of the transport and technological scheme of wood supply in flat raft units according to the raft (section lines) – raft principle]. *Resources and Technology*. 2021;18(2):48-78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
6. Qi K., Zhang J., Zhang L., Zhang J., Gan R. A Review of Research Progress on Cables and Towed Objects of the Ocean Engineering Towing System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025;13(2):257. DOI: 10.3390/jmse13020257.
7. Peskov I.A., Posypanov S.V. Issledovanie ravnomernogo dvizheniya v vode ustroystva dlya formirovaniya dvukhyarusnykh paketnykh splotochnykh edinit. [The study of even movement in water of the device to make the packaged bilevel rafting units]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie = Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2020;4(48):41-49. (In Russ.). DOI: 10.25686/2306-2827.2020.4.41.
8. Deng R., Wang S., Hu Y., Wang Y., Wu T. The Effect of Hull Form Parameters on the Hydrodynamic Performance of a Bulk Carrier. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(4):373. DOI: 10.3390/jmse9040373.
9. Zaghi S., Broglia R., Di Mascio A. Analysis of the wake field in the propeller plane of a twin-hull vessel using CFD. *Applied Ocean Research*. 2025;145:103920. DOI: 10.1016/j.apor.2025.103920.
10. Aydın Ç., Ünal U., Karabulut U., Sarıöz K. Practical computational procedures for predicting steering and braking forces of escort tugs. *Ocean Engineering*. 2018;166:159-171. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.058.
11. Piaggio B., Villa D., Viviani M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics. *Applied Ocean Research*. 2020;97:102075. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102075.
12. Piaggio B., Villa D., Viviani M., Figari M. Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics – Part II: The skeg effect. *Applied Ocean Research*. 2020;100:102199. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102199.
13. Mauro F. A flexible method for the initial prediction of tugs escort capability. *Ocean Engineering*. 2022;246:110585. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110585.
14. Chen M., Chen Y., Li T., Tang Y., Ye J., Zhou H., Ouyang M., Zhang X., Shi W., Sun X. Analysis of the wet-towing operation of a semi-submersible floating wind turbine using a single tugboat. *Ocean Engineering*. 2024;299:117354. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117354.
15. Huang Y., He Y., Liu Y., Qiu M. Study of the wet-towing transportation of an FPSO with elastomeric-supporting topside modules. *Ocean Engineering*. 2024;293:116602. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116602.
16. Fitriadhy A., Yasukawa H. Course stability of a ship towing system in wind. *Ocean Engineering*. 2013;64:135-145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.02.004.
17. Zhu H., Hu C. A unified seakeeping and maneuvering analysis of multiple linked towing system with triangular bodies. *Ocean Engineering*. 2021;222:108577. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108577.
18. Han Y., Zhu X., Zhou L. Numerical simulation of multi-tug towing of a gravity-based structure in broken sea ice. *Ocean Engineering*. 2022;261:112070. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112070.

19. Park S.H., Lee S.J., Lee S. Experimental investigation of towing- and course-stability of a FPSO towed by a tug-boat with lateral motion. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2021;13:12-23. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.12.003.
20. Nam T.K., Jung C.H., Kim J.M., Choi H. A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments. *Journal of Navigation and Port Research*. 2014;38(5):463-470. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.5.463.
21. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. 4th ed. *Butterworth-Heinemann*. 2019. 586 p. ISBN: 978-0-08-100366-4.
22. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. 2nd ed. *Cambridge University Press*. 2017. 632 p. ISBN: 978-1-107-14129-8.

Сведения об авторах

Посыпанов Сергей Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геодезии и земельного кадастра, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: s.posypanov@narfu.ru, ResearcherID: ABF-6542-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>. SPIN-код 8592-0690.

Калитин Никита Сергеевич – аспирант ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: kalitin.n@edu.narfu.ru.

Information about the authors

Sergey V. Posypanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy and Land Cadastre of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: s.posypanov@narfu.ru, ResearcherID: ABF-6542-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>. SPIN-code: 8592-0690.

Nikita S. Kalitin – Postgraduate student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: kalitin.n@edu.narfu.ru.