

USE OF CLARIFIED MATHEMATICAL MODELS FOR PRACTICAL PROBLEMS OF NAVIGATION

A. A. Ershov, A. A. Malkov

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

The article is aimed at improving traffic safety in narrows and when entering ports in strong winds. The proposed methods of mathematical models clarification according to field observations allow using them for all ships, including those for which tests have never been carried out in wind tunnels. Proposed in the paper approaches to carry out field observations to clarify the mathematical models can be directly used before the passage of the vessel in the narrows, as well as at entering the ports in wind conditions. In this case, the status of vessels loading and the wind-wave conditions of the forthcoming maneuver operations are more accurately taken into account. The solution of practical problems with the use of clarified mathematical models ensures the most accurate results for specific conditions of the vessel movement in the wind conditions. Proposed in the paper field observations on the mathematical models clarification can be made after the vessel leaving for the voyage under specific loading conditions and deck cargo condition, as well as directly before the ship pilotage through the narrows and approaches to the port in wind conditions. This allows you to take into account the features of a specific vessel passage and ensure the most accurate result. Carrying out field observations to clarify the mathematical models of the vessel in the voyage can reduce the cost of mathematical models creation, including the cost of carrying out such expensive measures as "purge" the vessel models in wind tunnels. The strong wind caused the cancellation of the expected approach to St. Petersburg of the Celebrity Silhouette liner with three thousand passengers on Board in July 2018. The ship was supposed to arrive in the northern capital, but stopped at the dam. As a result, after staying at Kronstadt for a day the liner headed for the German Rostock. At the same time, the Celebrity Silhouette was not the only liner that was supposed to arrive in St. Petersburg on that day; the rest of the vessels safely passed through the fairways and channels of the Gulf of Finland and entered the port. However, the captain of Celebrity Silhouette announced that it was not safe to enter the port and refused to enter the port of St. Petersburg, which led to numerous losses. The reason for such a decision was that the captain of Celebrity Silhouette did not know the vessel speed on the fairway in strong wind conditions, which would allow him to "keep" the ship in the safe dimensions of its width. The proposed in the paper scientific and practical justification of the possibility of increasing the vessel's speed to overcome the wind on the rectilinear sites of channel or fairway can contribute to the solution of this problem. Practical problems with the use of clarified mathematical models describing the vessel movement in wind conditions, allow us to reliably justify the safety conditions, including an increase in the vessel's speed when the wind strengthens. This will allow you to make the right decisions about the ship's calls at specific ports.

Keywords: ship movement in wind conditions, clarification of mathematical models, solution of practical problems, increase in the vessel's speed in wind conditions.

For citation:

Ershov, Andrey A., and Alexander A. Malkov. "Use of clarified mathematical models for practical problems of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 22–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-22-32.

УДК 656.61.052

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УТОЧНЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СУДОВОЖДЕНИЯ

А. А. Ершов, А. А. Мальков

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

Статья направлена на повышение безопасности движения в узкостях и при заходах в порты при сильном ветре. Предложенные в настоящей статье методики уточнения математических моделей по данным

натурных наблюдений позволяют использовать их для всех судов, в том числе для тех, для которых никогда не проводились испытания в аэродинамических трубах. Подходы к проведению натурных наблюдений для уточнения математических моделей, предложенные в настоящей статье, могут использоваться непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях, а также при заходах в порты в условиях ветра. В этом случае более точно учитывается состояние загрузки судна и ветроволновых условий предстоящих маневренных операций. Решение практических задач с использованием уточненных математических моделей гарантирует получение наиболее точных результатов для конкретных условий движения судна в условиях ветра. Предложенные в настоящей статье натурные наблюдения по уточнению математических моделей могут проводиться после выхода судна в рейс в условиях конкретной загрузки и состояния палубного груза, а также непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях и подходах к порту в условиях ветра. Это позволяет максимально учитывать особенности конкретного прохода судна и гарантировать получение наиболее точного результата. Проведение натурных наблюдений по уточнению математических моделей судна в рейсе дает возможность снизить затраты на создание математических моделей, в том числе на проведение таких дорогостоящих мероприятий, как «продувка» моделей судов в аэродинамических трубах. Отмечается, что причиной отмены ожидаемого захода в Санкт-Петербург лайнера *Celebrity Silhouette*, на борту которого в июле 2018 г. находилось три тысячи пассажиров, явился сильный ветер. Лайнер должен был прибыть в северную столицу, однако «встал» у дамбы. В итоге, пробыв у Кронштадта сутки, он взял курс на немецкий Росток. При этом в тот день он был не единственным лайнером, который должен был прибыть в Санкт-Петербург, остальные суда благополучно прошли по фарватерам и каналам Финского залива и вошли в порт. Однако капитан лайнера *Celebrity Silhouette* сообщил об отказе от захода в порт Санкт-Петербург, что привело к многочисленным убыткам. Причиной принятия такого решения явилось то, что капитану судна были неизвестны значения скорости движения судна по фарватеру в условиях сильного ветра, которые позволили бы ему «удерживать» судно в безопасных габаритах его ширины. В результате проведенного исследования в статье сделан вывод о том, что решению данной задачи могут способствовать научное и практическое обоснования возможности увеличения скорости судна для преодоления ветра на прямолинейных участках канала или фарватера. Установлено также, что практические задачи с использованием уточненных математических моделей, описывающих движение судна в условиях ветра, позволяют надежно обосновывать условия безопасности, в том числе увеличение скорости судна при усилении ветра, что даст возможность принимать верные решения о заходах судна в конкретные порты.

Ключевые слова: движение судна в условиях ветра, уточнение математической модели, решение практических задач, увеличение скорости судна в условиях ветра.

Для цитирования:

Ершов А. А. Использование уточненных математических моделей для решения практических задач судовождения / А. А. Ершов, А. А. Мальков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 22–32. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-22-32.

Введение (Introduction)

Развитие современных технологий и включение математических моделей практически во всех сферах деятельности современного судна обуславливают решение вопроса о достоверности результатов и соответствия математической модели изменяющейся окружающей обстановке. Это особенно важно, когда математическое моделирование прогнозирует режимы безопасного движения судна в условиях ветра и волнения. При решении задач обеспечения безопасности судна в условиях ветра наиболее важным элементом математических моделей являются аэродинамические силы и моменты, действующие на надводную часть корпуса судна. В условиях переменной палубной загрузки судна или плохообтекаемой надводной части аэродинамические силы и моменты изменяются. Указанные составляющие математических моделей при движении судна в узкостях при сильном ветре в максимальной степени определяют его безопасность.

Анализ аварий, произошедших с судами в российских и иностранных портах и при подходах к ним, показывает, что многие из них явились результатом посадок на мель, навалов на суда и другие объекты в условиях ветра. Иногда при сильном ветре судно отказывается от захода в порт из-за того, что капитан не уверен в возможности обеспечить безопасность своего судна. Такой случай произошел летом 2018 г. в Санкт-Петербурге с лайнером *Celebrity Silhouette*. Заходящее пассажирское судно должно было осуществлять движение по ограниченному по ширине подходным каналам и фарватерам порта Санкт-Петербург. Движение необходимо было осуществлять

в условиях ветра, достигавшего скорости 18 м/с. Отсутствие необходимой информации о безопасных режимах движения в этих условиях способствовали решению капитана *Celebrity Silhouette* отказаться от захода в порт.

Вопросу решения задач безопасности судов в узкостях и при швартовках в условиях ветра посвящены многочисленные научные исследования. Так, в работах [1] – [3] авторами предлагалось для этих целей рассчитывать специальные диаграммы (планшеты) управления судном при швартовках в условиях ветра. Подобные задачи рассматривались в источниках [4] – [7] и др. В работе [4] предлагалась процедура проведения натурного эксперимента для проверки и уточнения заранее рассчитанных диаграмм (планшетов) управления судном. В работах [6] – [10] рассматривались различные задачи безопасности судов в узкостях и в условиях чрезмерного сближения с другими судами. Комплексные задачи обеспечения безопасности движения судов в узкостях и при подходах к портам решались в работе [11]. В иностранных работах данные проблемы рассматривались в источниках [12], [13].

Существенным недостатком вышеуказанных и других работ в данной области являлось то, что коэффициенты аэродинамических сил и моментов, входящие в уравнения движения судна при математическом моделировании, оставались неизменными, соответствующими полученным для аналогичных судов по результатам специальных испытаний в аэродинамических трубах («продувок»). Конкретные характеристики надводной части судна при изменении загрузки палубным грузом и особенностей ее обтекания при реальных осадках судна в этом случае не учитываются. В условиях ветра эти погрешности могут приводить к существенным ошибкам в результатах математического моделирования и, как следствие, лишать судоводителя уверенности при управлении судном в условиях ветра. В работах [14], [15] предлагался метод уточнения составляющих математических моделей, связанных с движением судна в условиях ветра по данным натурных испытаний и наблюдений, осуществляемых непосредственно перед выполнением маневра в условиях конкретной загрузки судна, а также направлений и скоростей ветра.

В настоящей работе предлагается практический способ получения и использования уточнённых математических моделей для решения актуальных практических задач судовождения, связанных с движением судна в условиях ветра.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Метод, предложенный в работах [14], [15], позволяет уточнять аэродинамические характеристики при каждом выходе судна в рейс и, следовательно, открывает большие возможности использования методов математического моделирования для прогноза движения судна и решения практических задач судовождения в условиях ветра.

Сущность данного метода состоит в следующем. Уравнения движения судна с разнородным палубным грузом или плохообтекаемой надстройкой (например, пассажирского судна или газовоза) в условиях ветра с постоянной скоростью могут быть записаны следующим образом (рис. 1):

Уравнения движения судна с разнородным палубным грузом или плохообтекаемой надстройкой (например, пассажирского судна или газовоза) в условиях ветра с постоянной скоростью могут быть записаны следующим образом (рис. 1):

$$\begin{aligned} Y_{\beta} - Y_A - Y_r &= 0; \\ M_{\beta} - M_A - Y_r l r &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где Y_{β} — проекция гидродинамической силы на ось Y , связанную с движением судна, кН;

Y_A — проекция аэродинамической силы на ось Y , кН;

Y_r — проекция боковой силы на руле на ось Y , кН;

M_{β} и M_A — моменты гидро- и аэродинамических сил, кН·м;

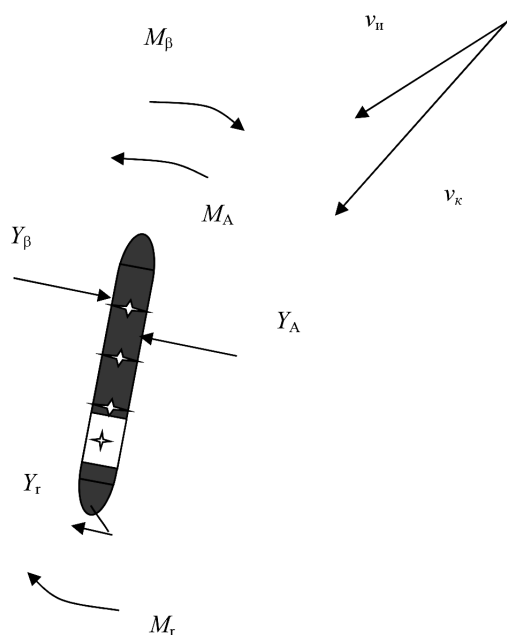


Рис. 1. Расчетная схема для уравнений движения судна в условиях ветра

l_r — отстояние баллера руля от центра тяжести (ЦТ) судна, м.

Раскроем выражения, входящие в систему (1):

$$\begin{aligned} C_{Y\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} - C_{YA} \frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} - C_{YR}^\alpha (\delta - \mu\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_R &= 0; \\ C_{M\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} L - C_{MA} \frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} L + C_{YR}^\alpha (\delta - \mu\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_R l_r &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $C_{Y\beta}$ — коэффициент позиционной силы корпуса;

$C_{M\beta}$ — коэффициент позиционного момента корпуса;

$A_{L\sigma}$ — приведенная площадь погруженной части ДП судна, м²;

C_{YA} — коэффициент нормальной составляющей силы ветра;

C_{MA} — коэффициент ветрового момента корпуса;

A_{vL} — площадь проекции надводной части судна на продольную вертикальную плоскость;

L — длина судна по действующей ватерлинии, м;

v — скорость движения судна, м/с;

v_k — скорость кажущегося ветра, м/с;

μ — коэффициент влияния корпуса;

β — угол дрейфа судна, рад;

δ — угол перекладки руля, рад;

A_r — площадь руля, м²;

ρ — плотность воды, кг/м³;

ρ_a — плотность воздуха, кг/м³.

Из выражений (2) могут быть получены уравнения для определения C_{YA} и C_{MA} :

$$\begin{aligned} C_{YA} &= \frac{C_{Y\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} - C_{YR}^\alpha (\delta - \mu\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_R}{\frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL}}; \\ C_{MA} &= \frac{C_{M\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} L - C_{YR}^\alpha (\delta - \mu\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_R l_r}{\frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} L}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) могут быть использованы для уточнения аэродинамических характеристик C_{YA} и C_{MA} по данным натурных испытаний или наблюдений за движением судна в эксплуатации.

В работах [16] показано, что для определения аэродинамических характеристик могут быть использованы следующие выражения:

$$\begin{aligned} C_{YA} &= K \sin \gamma_k; \\ C_{MA} &= C_{YA} \left(0,25 + b_0 - \frac{\gamma_k}{360} \right) = K \sin \gamma_k \left(0,25 + b_0 - \frac{\gamma_k}{360} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где γ_k — угол кажущегося ветра, град;

b_0 — относительное отстояние от миделя центра парусности.

С учетом уравнений (4) выражения (3) могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} K &= \frac{C_{Y\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} - C_{YR}^\alpha (\delta - \mu\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_R}{\frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} \sin \gamma_k}; \\ K &= \frac{C_{M\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} L - C_{YR}^\alpha (\delta - \mu\beta) \frac{\rho v^2}{2} A_R l_r}{\frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} L \sin \gamma_k \left(0,25 + b_0 - \frac{\gamma_k}{360} \right)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, оба уравнения системы (5) могут быть использованы для определения и уточнения коэффициента K , входящих в выражения для C_{YA} , C_{MA} (см. выражения (4)). В работах [16], [17] рекомендуется принимать значение $K = 1,05$, которое может быть принято в качестве исходного для проведения уточнения по данным натурных испытаний или наблюдений.

Для проведения наблюдений или натурных испытаний необходимо определение следующих величин v , v_k , β . Скорость судна v может быть определена по лагу или обсервациям, скорость v_k и направление γ_k кажущегося ветра можно определить с использованием судовых приборов, угол дрейфа β может быть определен с использованием текущих обсерваций судна как разница между путевым углом и курсом судна. Если натурные наблюдения проводятся с целью уточнения конкретных аэродинамических характеристик при постоянном значении курса (курсового угла ветра) γ_k , то могут быть использованы уравнения (3). Это позволяет накапливать данные по C_{YA} , C_{MA} в процессе конкретного рейса для различных значений γ_k и уточнять данные по большему диапазону значений курсовых углов ветра.

С целью практического использования уравнений (3), (5) необходимо определение гидродинамических характеристик судна и рулевого устройства судна при данном варианте загрузки. Для этих целей могут быть использованы известные методики, рассмотренные в источниках [16], [17]. Предлагаемый метод был применен на судне-газовозе с плохообтекаемой надстройкой для определения коэффициента K (см. выражения (4), (5)) в условиях ветра. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты натурных измерений и расчетов коэффициента K на судне-газовозе с плохообтекаемой надстройкой

Номер измерения и расчета	Угол кажущегося ветра γ_k , град	Значение коэффициента K
1	15	1,185
2	18	1,187
3	120	1,186
4	130	1,185
5	90	1,038

Как показали результаты натурных наблюдений и расчетов по выражениям (4), (5), проведенных на вышеуказанном судне-газовозе, наибольшее отклонение от обычно рекомендуемого значения коэффициента ($K = 1,05$) возникает на носовых и кормовых курсовых углах ветра. Как следует из теории и практики судовождения, на кормовых углах ветра возникают наибольшие трудности при управлении судном, а максимальная величина сноса бокового сноса судна возникает при углах кажущегося ветра, близких к 90 град, что создает особую опасность при плавании в узкостях и при движении по ограниченным по ширине подходным каналам и фарватерам, а также может привести к отказу судна от захода в порт в условиях сильного ветра.

Сильный ветер явился причиной отмены ожидаемого захода в Санкт-Петербург лайнера *Celebrity Silhouette* на борту в июле 2018 г., который должен был прибыть в северную столицу, но неожиданно «встал» у дамбы. Пробыв у Кронштадта сутки, он взял курс на немецкий Росток. При этом в тот день он был не единственным лайнером, который должен был прибыть в порт Санкт-Петербург, остальные суда благополучно прошли по фарватерам и каналам Финского залива и вошли в порт. Однако капитан лайнера *Celebrity Silhouette* сообщил о том, что заходить в порт Санкт-Петербург небезопасно, в результате данное решение привело к многочисленным убыткам. Причиной принятия такого решения явилось то, что капитану судна были неизвестны значения скорости движения судна по фарватеру в условиях сильного ветра, которые позволили бы ему удерживать судно в безопасных габаритах его ширины.

Решению задачи безопасного захода в порт крупнотоннажного лайнера может способствовать научное и практическое обоснование возможности увеличения скорости судна для преодоления ветра на прямолинейных участках канала или фарватера. Суть подобной практической задачи

состоит в следующем. Проход любого крупнотоннажного судна приемного буя до пассажирских причалов морского порта Санкт-Петербург может занимать 3–5 ч. При этом большая часть проходит по прямолинейным участкам каналов и фарватеров. В течение этого времени могут произойти изменения метеорологической обстановки, и любое судно может оказаться в условиях порывистого ветра, в полтора-два раза превосходящих средние значения. Для судна с большой парусностью, к которым относятся пассажирские суда и газовозы, такое увеличение скорости ветра может привести к смещению судна с оси фарватера, посадке на бровку, навалу на другие суда и другим аварийным ситуациям. Для преодоления усиления скорости и / или порывов ветра может быть предложено увеличение скорости судна.

Теоретическое обоснование возможности увеличения скорости для преодоления усиления ветра может быть выполнено следующим образом. Из уравнения (2) может быть получено выражение

$$C_{M\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} L - C_{MA} \frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} L + \left(C_{YA} \frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{L\sigma} - C_{Y\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{L\sigma} \right) lr = 0 \quad (6)$$

или после преобразований —

$$C_{M\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{I\sigma} L + C_{Y\beta} \frac{\rho v^2}{2} A_{L\sigma} lr = C_{MA} \frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} L + C_{YA} \frac{\rho_a v_k^2}{2} A_{VL} lr, \quad (7)$$

Составляющие, входящие в правую часть уравнения (7), зависят от скорости кажущегося ветра: при увеличении скорости ветра увеличивается значение его правой части. Для соблюдения равенства правой и левой части уравнения выражения при постоянной скорости движения судна необходимо увеличение коэффициентов гидродинамических сил и моментов $C_{M\beta}$, $C_{Y\beta}$, входящих в левую часть уравнения (7), которые, в свою очередь, зависят от угла дрейфа судна. Следовательно, угол дрейфа судна должен увеличиться, и судно начнет смещаться с оси канала. Плотность воды ρ , входящая в выражения в левой части уравнения (7), приблизительно в 816 больше плотности воздуха ρ_a , которая входит в выражения в правой части уравнения. Таким образом, даже незначительное увеличение скорости движения судна v , входящей в левую часть уравнения (7), позволит преодолеть значительное увеличение скорости кажущегося ветра v_k , входящей в правую часть уравнения. При этом угол дрейфа судна не увеличится, а судно останется в безопасной ширине канала.

Для определения необходимого увеличения скорости судна δv на прямолинейном участке канала или фарватера при увеличении скорости ветра может быть использовано следующее выражение, являющееся следствием уравнения (7):

$$\delta v = \sqrt{\frac{\rho_a v_k^2 (C_{MA} L + C_{YA} lr) A_{VL}}{\rho (C_{M\beta} L + C_{Y\beta} lr) A_{I\sigma}}} - v, \quad (8)$$

где v — начальная скорость движения судна, м/с;

v_k — скорость кажущегося ветра, м/с;

δv — необходимое увеличение скорости судна, м/с.

Для определения необходимого угла дрейфа β , от которого зависят величины $C_{Y\beta}$, $C_{M\beta}$, входящие в выражение (8), может быть использована схема, приведенная на рис. 2.

По известной безопасной ширине канала или фарватера определяется максимальный угол дрейфа β , который может иметь судно для того, чтобы уложиться в заданную ширину. Для этого может быть использовано выражение (9), полученное из рис. 2:

$$\text{Ш}_\phi = L \sin \beta + B \cos \beta, \quad (9)$$

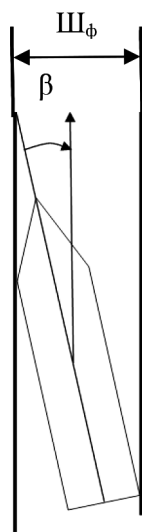


Рис. 2. Расчетная схема для определения угла дрейфа β с использованием ширины фарватера (Ш_ϕ)

где Ш_ϕ — безопасная для данного судна ширина канала или фарватера, м;

L — длина судна, м; B — ширина судна, м;

β — угол дрейфа судна, град.

С учетом малости значения угла дрейфа, который может обеспечить безопасное прямолинейное движение судна по фарватеру заданной ширины, формула (9) может быть преобразована к следующему виду:

$$\text{Ш}_\phi = L \sin \beta + B \beta, \quad (10)$$

откуда необходимый угол дрейфа для удержания судна в заданной полосе фарватера может быть определен в виде

$$\beta = \arcsin \frac{\text{Ш}_\phi - B}{L} 57,3. \quad (11)$$

Последовательность расчёта с использованием выражения (8):

1. Перед предстоящим проходом по прямолинейному участку канала или фарватера в условиях ветра с использованием уравнений (3) уточняются значения C_{YA} , C_{MA} или с использованием выражений (4), (5) уточняется значение коэффициента K для данного состояния судна.

2. С использованием навигационной карты определяется безопасная для данного судна ширина канала или фарватера Ш_ϕ .

3. С использованием уравнения (11) определяется угол дрейфа β для удержания судна в заданной ширине фарватера.

4. С использованием методик, рассмотренных в работе [2], для данного угла дрейфа β определяются значения величин $C_{Y\beta}$ и $C_{M\beta}$.

5. Для измеренных скоростей v_k и известной скорости судна v по уравнению (8) определяется необходимое увеличение скорости судна δv для удержания судна в безопасной для данного судна ширине канала или фарватера Ш_ϕ .

Пример расчета необходимого увеличения скорости δv для удержания судна-газовоза с плохобтекаемой надстройкой в безопасной полосе Ш_ϕ в зависимости от скорости кажущегося ветра v_k с курсовым углом ветра 90 град приведен на рис. 3.

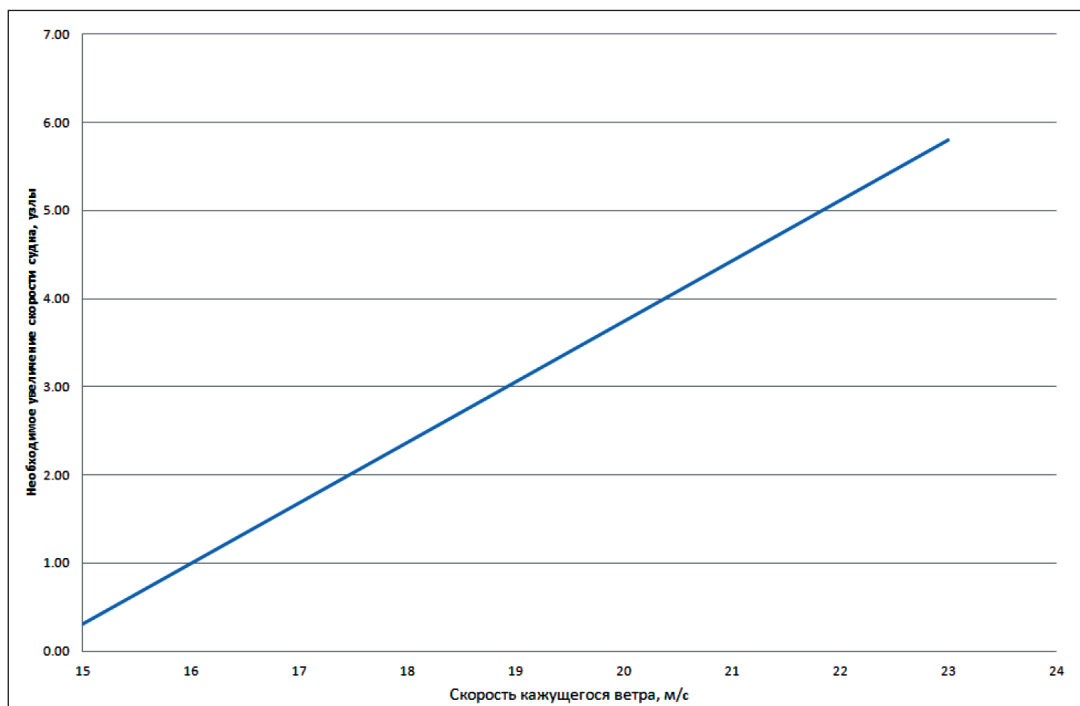


Рис. 3. Необходимое увеличение скорости судна-газовоза для удержания в полосе заданной ширины, уз (начальная скорость движения судна: $v = 10$ уз, $v_k = 15$ м/с, курсовой угол ветра 90 град)

Таким образом, если бы информация, подобная представленной на рис. 3, была в распоряжении капитана лайнера *Celebrity Silhouette* в июле 2018 г., то он мог бы принять более обоснованное решение по заходу в порт Санкт-Петербург в условиях сильного ветра.

Результаты (Results)

Для подтверждения достоверности и практической применимости основных положений настоящей статьи были проведены специальные наблюдения и расчеты на судне-газовозе с плохобтекаемой надстройкой. Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показали возможность увеличения скорости судна, полученного по выражению (8), при увеличении скорости кажущегося ветра с курсовым углом 90 град.

Анализ результатов расчетов, проведенных по уравнениям (9)–(11), показал, что значения углов дрейфа β , необходимые для обеспечения безопасного движения в полосе движения с заданной шириной $Ш_{\phi}$, не превышают значений 10 град. Это позволяет надежно применять методики [2] для определения гидродинамических характеристик C_{YB} , C_{MB} (см. уравнения (3), (5), (8)), что и предлагается в настоящей статье.

Анализ результатов уточнения аэродинамических характеристик с использованием натуральных наблюдений показывает возможность их применения в уравнении (8), полученном по результатам наблюдений значений C_{YA} , C_{MA} , без проведения испытаний модели судна в аэродинамической трубе. Это позволяет применять предложенную в настоящей статье последовательность расчета с использованием уравнения (8) для всех судов, в том числе для тех из них, для которых никогда не проводились аэродинамические испытания.

Таким образом, ранее изложенное подтверждает, что предложенные в настоящей статье методики могут быть использованы в составе навигационного оборудования судов с целью предотвращения опасных ситуаций, а также служат надежным обоснованием решения об отказе от захода в порт конкретного судна в условиях сильного ветра.

Обсуждение (Discussion)

Полученные в настоящей статье выводы совпадают с данными других авторов о возможности использования в составе навигационного оборудования современных судов математических моделей, позволяющих решать сложные задачи по управлению судном в узкостях и при заходах в порты при сильном ветре.

Предложенные в настоящей статье методики уточнения математических моделей по данным натуральных наблюдений позволяют использовать их для всех судов, в том числе для тех, для которых никогда не проводились испытания в аэродинамической трубе.

Подходы к проведению натуральных наблюдений для уточнения математических моделей, предложенные в настоящей статье, могут использоваться непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях, а также при заходах в порты в условиях ветра. В этом случае более точно учитывается состояние загрузки судна и ветроволновых условий предстоящих маневренных операций.

Решение практических задач с использованием уточненных математических моделей гарантирует получение наиболее точных результатов для конкретных условий движения судна в условиях ветра.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведение натуральных экспериментов и наблюдений по уточнению математических моделей движения судна в условиях ветра является перспективным подходом к обеспечению безопасности движения судна в узкостях и подходах к портам.

2. Предложенные в настоящей статье натурные наблюдения по уточнению математических моделей могут проводиться после выхода судна в рейс в условиях конкретной загрузки и состояния палубного груза, а также непосредственно перед проведением проходов судна в узкостях

и подходах к порту в условиях ветра. Это позволяет максимально учитывать особенности конкретного прохода судна и гарантировать получение наиболее точного результата.

3. Проведение натурных наблюдений по уточнению математических моделей судна в рейсе позволяет снизить затраты на создание математических моделей, в том числе на проведение таких дорогостоящих мероприятий, как «продувка» моделей судов в аэродинамических трубах.

4. Практические задачи с использованием уточненных математических моделей, описывающих движение судна в условиях ветра, позволяют надежно обосновывать условия безопасности, в том числе увеличение скорости судна при усилении ветра. Все это позволит принимать верные решения при заходах судна в конкретные порты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А.* Совершенствование управления судном при швартовках / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 3. — С. 132–134.

2. *Ершов А. А.* Обеспечение безопасности и эффективности швартовных операций / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 65–67.

3. *Ершов А. А.* Перспективы автоматизации управления судном при швартовках / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // XIII Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия»: ежемес. науч. журнал. — Новосибирск, 2015. — № 6 (13). — С. 144–145.

4. *Ершов А. А.* Планирование проведения экспериментальной проверки диаграммы (планшета) управления судном / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 447–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455.

5. *Ершов А. А.* Способы автоматизации штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 62–64.

6. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.

7. *Zubova A. A.* Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHND 2014). — Singapore, 2014. — Pp. 328–340.

8. *Zubova A. A.* Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015). — Curran Associates, Inc., 2016. — Pp. 672–684.

9. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.

10. *Некрасов С. Н.* Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.

11. *Паринов П. П.* Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербурга и на подходах к порту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19; защищена 21.12.2010; утв. 12.06.2011 / Петр Петрович Паринов. — СПб., 2010. — 120 с.

12. *Hasegawa K.* On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation / K. Hasegawa, T. Fukutomi // Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. — 1994. — Pp. 197–210.

13. *Kijima K.* A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier / K. Kijima, Y. Furukawa // Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94). 3rd International Conference. — Southampton, UK, 1994. — Pp. 211–222.

14. *Мальков А. А.* Уточнение математической модели судна по данным натурных испытаний / А. А. Мальков // Материалы IX межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов

«Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 23 мая 2018 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 60–63.

15. Ершов А. А. Совершенствование методов математического моделирования движения судна по данным натурных наблюдений / А. А. Ершов, А. А. Мальков // Проблемы развития технического потенциала и направления его повышения: сб. статей Международной науч.-практ. конф. (15 августа 2018 г., г. Казань). — Уфа: АЭТЕРНА, 2018. — С. 27–29.

16. Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами подержания. — 544 с.

17. Гофман А. Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справ. / А. Д. Гофман. — Л.: Судостроение, 1988. — 360 с.

REFERENCES

1. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. "Improvement of mooring of the ships." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 3 (2015): 132–134

2. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. "Ensuring safe and efficient mooring operations." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 65–67.

3. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

4. Ershov, Andrey A., and Dmitry A. Huharev. "Planning of trials to check the diagrams (tables) maneuvering of a vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 447–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455.

5. Ershov, A. A., and A. V. Terenchuk. "Ways to automate storm navigation of the vessel." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 62–64.

6. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

7. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods." *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014)*. Singapore, 2014: 328–340.

8. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods." *Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015)*. Curran Associates, Inc., 2016: 672–684.

9. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.

10. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.

11. Parinov, P.P. *Novye sposoby obespecheniya bezopasnogo dvizheniya sudov v Bol'shom portu Sankt-Peterburg i na podkhodakh k portu*. PhD diss. SPb., 2010.

12. Hasegawa, Kazuhiko, and T. Fukutomi. "On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation." *Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 1994: 197–210.

13. Kijima, K., and Y. Furukawa. "A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier." *Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94)*. 3rd International Conference. Southampton, UK, 1994: 211–222.

14. Mal'kov, A. A. "Utochnenie matematicheskoi modeli sudna po dannym naturnykh ispytaniy." *Materialy IX mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii» 23 maya 2018 goda*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2018. 60–63.

15. Ershov, A. A., and A. A. Mal'kov. "Sovershenstvovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya dvizheniya sudna po dannym naturnykh nablyudeniy." *Problemy razvitiya tekhnicheskogo potentsiala i napravleniya*

ego povysheniya: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (15 avgusta 2018 g, g. Kazan'). Ufa: AETERNA, 2018. 27–29.

16. Voitkunskiy, Ya. I., eds. *Spravochnik po teorii korablya: v 3-kh t. Vol. 3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya*. L.: Sudostroenie, 1985.

17. Gofman, A.D. *Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovaniye sudna. Spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: ershov_63@mail.ru

Мальков Александр Александрович — аспирант

Научный руководитель:

Ершов Андрей Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: ershov_63@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. — 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: ershov_63@mail.ru

Malkov, Alexander A. — Postgraduate
Supervisor:

Ershov, Andrey A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: ershov_63@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2018 г.

Received: October 29, 2018.