

FORCES ON THE MANOEUVRING SHIP PROPELLER

M. P. Lebedeva¹, L. I. Vishnevskii^{2,3}

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

² — St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

³ — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The longitudinal and lateral components of hydrodynamic force on propeller of manoeuvring ship are considered in the paper. Data of the Shipbuilding manual (Sudostroenye, Leningrad, 1973) are used to define the longitudinal force. The propeller thrust is shown as an universal coefficient versus universal propeller advance. That allows us to analyze the longitudinal force for all possible values of model speed and propeller frequency. The lateral component of hydrodynamic force is measured in circular towing tank. The propeller force is measured on the model shaft using the miniature dynamometer placing in deadwood pipe. While side force measuring, in addition to changing the model velocity and propeller rotation frequency, the drift angle is changed. Both components of hydrodynamic force on the propeller are shown as a diagram versus universal propeller advance. To calculate the universal propeller advance for longitudinal component of force the velocity projection on X-axis is used, and to calculate the universal propeller advance for lateral component of force the velocity projection on Y-axis is used. The universal coefficients represented in that way do not depend on the propeller work conditions, i.e. the independent parameters number is reduced. The universal lateral component of force turns up multiple-value. The universal advance maximum and minimum values divide the curves into parts at points corresponding to 90° and 270° drift angles.

Keywords: longitudinal force, thrust, lateral force, propeller, manoeuvring, ship, universal advance, universal coefficient, drift angle.

For citation:

Lebedeva, Marina P., and Leonid I. Vishnevskii. "Forces on the manoeuvring ship propeller." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 554–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-554-56.

УДК 629.12

СИЛЫ НА ГРЕБНОМ ВИНТЕ МАНЕВРИРУЮЩЕГО СУДНА

М. П. Лебедева¹, Л. И. Вишневский^{2,3}

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты анализа продольной и боковой составляющих сил, возникающих на гребном винте маневрирующего судна. Для определения продольной составляющей силы или упора гребного винта использовались ранее полученные данные, опубликованные в открытой печати. Упор гребного винта определялся в виде универсальных коэффициентов в зависимости от универсальной поступи, что давало возможность рассматривать значения силы во всем возможном диапазоне скоростей хода и частоты вращения гребного винта. Боковая сила на гребном винте определялась по результатам испытаний в опытном бассейне. Измерения боковой силы проводились непосредственно на гребном валу модели с помощью миниатюрного динамометра, вмонтированного в дейвуд. Боковая сила, измеренная на гребном винте, также была представлена в виде универсальных коэффициентов. Во время измерений боковой силы на винте, кроме скорости буксировки модели и частоты вращения гребного винта, варьировался угол дрейфа модели. Обе составляющие силы на гребном винте представлялись графически в зависимости от универ-

сальной поступи. При расчете универсальной поступи для продольной составляющей силы использовалось значение проекции скорости при центре тяжести модели на диаметрально плоскость, а при расчете универсальной поступи для построения боковой составляющей силы использовалось значение проекции скорости при центре тяжести модели на плоскость шпангоута. Представленные в таком виде значения универсальных коэффициентов практически не зависели от режима работы гребного винта, т. е. сократилось число независимых параметров. Универсальная боковая сила на винте, построенная от универсальной поступи, оказалась неоднозначной. Значения функции при максимальной поступи делят кривую на части в точках, соответствующих углам дрейфа 90° и 270° .

Ключевые слова: продольная сила, упор, поперечная сила, винт, маневрирование, судно, универсальная поступь, универсальный коэффициент, угол дрейфа.

Для цитирования:

Лебедева М. П. Силы на гребном винте маневрирующего судна / М. П. Лебедева, Л. И. Вишневецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 554–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-554-56.

Введение (Introduction)

В последнее время с развитием вычислительной техники появилась возможность решения более сложных задач, чем рассматриваемые во второй половине XX в. К числу задач, не рассмотренных до настоящего времени, относятся задачи маневрирования судна в стесненной акватории [1]–[3], описания маневров аварийной остановки судна [4], описания швартовных операций и др. Решение этих задач невозможно без учета всех действующих на движущемся произвольно судне сил, включая обе составляющие силы на гребном винте.

Гидродинамические силы на гребном винте всегда были и остаются предметом особого внимания исследователей, поскольку правильная их оценка позволяет правильно предсказать ходовые качества судна, расход топлива и др. Известны работы ведущих специалистов в теории гребных винтов, к которым относятся: А. М. Басин, И. Я. Миниович, А. Ф. Пустошный, В. М. Штумпф, А. А. Русецкий, В. Ф. Бавин, Н. Ю. Завадовский, Ю. Л. Левковский, В. Г. Мишкевич [5]–[9]. Прежде всего, теория гребного винта исследует силу, действующую на судно в продольном направлении, т. е. упор гребного винта, прямо связанный со скоростью движения судна.

Вопрос о существовании боковой силы на гребном винте был исследован в работах И. Я. Миниовича еще в 1946 г. [10]. Спустя 20 лет он был рассмотрен М. А. Гречиным [11]. Упоминается об этом и в работе А. Д. Гофмана [9]. Больше к этому вопросу не возвращались, поскольку было установлено, что боковая сила на винте при выполнении стандартных маневров для движущегося передним ходом судна значительно меньше его упора. Несмотря на то, что с момента первой постановки задачи о силах на гребном винте прошло более 70 лет, состояние вопроса существенно не изменилось. Значительная часть работ посвящена исследованию упора гребного винта при движении прямым курсом [12], а также расчету влияния боковой силы на параметры маневра «Зигзаг» [13]. Стало традиционным заменять физический эксперимент численным моделированием. В частности, расчетным способом были определены значения боковой силы на гребном винте при движении судна передним и задним ходом [14], а также выполнено расчетное исследование влияния угла дрейфа на силы взаимодействия руля винта и корпуса [15]–[17].

В ряду указанных задач отдельно находится исследование влияния боковой силы на гребном винте на колебания гребного вала [18]. Во всех указанных работах боковая сила рассматривается только при нулевом или малом угле дрейфа. Известны лишь результаты измерения тяги гребного винта при различных углах натекания потока и угол разворота вектора тяги, выполненные Е. Мюллером в Дуйсбургском опытовом бассейне [9], однако при развороте вектора тяги, упор гребного винта и боковая сила изменяются, и разделить их не представляется возможным. Между тем известны маневры, при расчете которых необходимо выделение отдельных компонентов силы на винте при произвольном значении углов дрейфа. Такие результаты были получены авторами в рамках исследований масштабного эффекта управляемости, завершенной в конце 80-х гг. XX в. Первая

публикация материалов вышла в трудах конференции XIV «Крыловские чтения» в 2013 г. [19]. Настоящую работу можно рассматривать как продолжение этих исследований. На данном этапе был выполнен углубленный анализ экспериментальных данных, на основании которого составлена схема пересчета боковой составляющей силы на гребном винте на натурное судно.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Модель и методика проведения эксперимента. Экспериментальное исследование боковой силы на гребном винте выполнялось в циркуляционном опытовом бассейне ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Для этих целей была выбрана схематизированная модель танкера со следующими главными размерениями:

- длина — $L = 1,98$ м;
- ширина — $B = 0,396$ м;
- осадка — $T = 0,11$;
- коэффициент общей полноты $C_p = 0,76$.

Теоретический чертеж модели приведен на рис. 1.

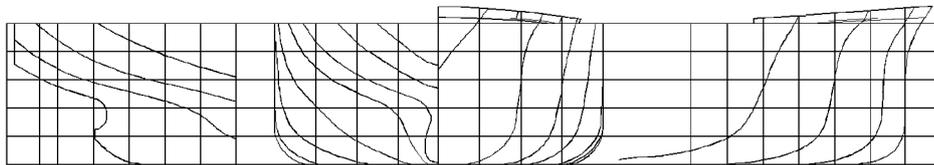


Рис. 1. Эскиз корпуса испытанной модели

Модель была оборудована одним полубалансирным рулем, установленным в диаметральной плоскости за гребным винтом правого вращения. Диаметр гребного винта был равен $D_p = 0,064$ м, относительный шаг составлял $H/D_p = 1$. Угол перекладки руля во время эксперимента не изменялся и равнялся нулю.

Условие свободного самохода модели под кабиной буксировочного устройства обеспечивалось при нулевом значении угла дрейфа. При этом выдерживались следующие параметры:

- скорость хода $V = 0,35$ м/с;
- частота вращения гребного винта $n = 8,75$ с⁻¹;
- поступь гребного винта $J_p = 0,625$.

Специально для измерения боковой силы на винте был изготовлен миниатюрный динамометр, который был встроен в дейдвудную трубу модели и измерял боковую силу непосредственно на гребном валу. Диапазон измеряемых величин составляет ± 1 Н.

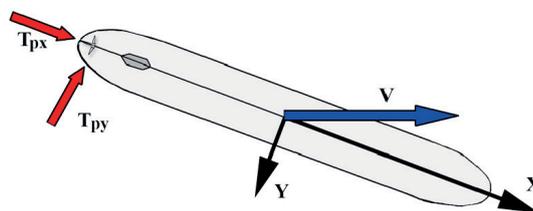


Рис. 2. Схема действия сил

Буксировка модели осуществлялась по круговой траектории радиусом 30 м, что соответствовало размеру, равному 15 длин корпуса модели. Несмотря на то, что траектория движения модели была пологой, при обработке результатов учитывались все необходимые поправки. Для парирования возможного масштабного эффекта шероховатость поверхности корпуса искусственно увеличивалась. Увеличение сопротивления учитывалось при обеспечении режима свободного самохода.

При измерениях принималась система координат, связанная с моделью. Положительными считались продольная сила, направленная в сторону носовой оконечности модели, боковая сила, направленная в сторону правого борта. Нулевое значение угла дрейфа β соответствовало переднему ходу модели. Угол дрейфа отсчитывался модели по часовой стрелке начиная от нулевого значения. В процессе испытаний величина угла дрейфа изменялась в пределах от 0° до 360° с шагом 5 град.

При измерениях боковой силы на гребном винте скорость буксировки модели превышала значения скорости при движении свободным самоходом и составляла 0,6 м/с ($Fn = 0,15$). Увеличение скорости буксировки было принято вынужденно с целью повышения точности измерений. Для сохранения значения поступи частота вращения гребного винта была увеличена до $15,0 \text{ с}^{-1}$. Частота вращения гребного винта варьировалась в пределах от $-15,0 \text{ с}^{-1} \leq n \leq +15,0 \text{ с}^{-1}$, что позволяло рассмотреть работу гребного винта во всем возможном диапазоне значений частоты вращения, характерной для этой модели. Значения частоты вращения гребного винта при испытаниях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения частоты вращения гребного винта при испытаниях

	Режим работы гребного винта	Частота вращения, с^{-1}
1	Передний ход	15,0
2	Передний ход	8,75
3	Винт застопорен	0
4	Задний ход	-8,75
5	Задний ход	-15,0

При вариации угла дрейфа скорость буксировки и частота вращения гребного винта сохранялись неизменными. Результаты измерения боковой силы на гребном винте при различных значениях β показаны на рис. 3. По оси абсцисс отложены значения углов дрейфа. По оси ординат отложены безразмерные значения боковой силы на винте, отмеченной индексом P , определяемые по формуле

$$C_{yP} = \frac{Y_P}{0,5\rho V_0^2 LT}, \quad (1)$$

где Y_P — измеренное значение боковой силы на гребном винте; V_0 — скорость буксировки модели при $\beta = 0^\circ$; L, T — соответственно длина и осадка модели.

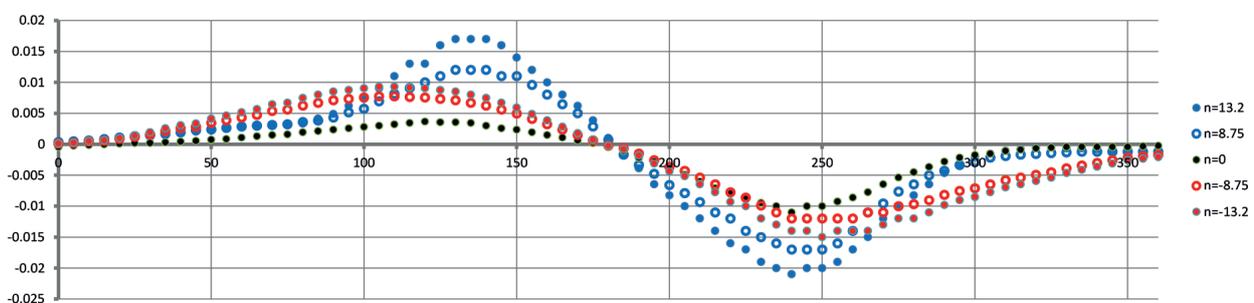


Рис. 3. Боковая составляющая нагрузки гребного винта на циркуляции

Результаты измерения показали, что изменение угла набегающего на винт потока (угла дрейфа) приводит к возникновению значительной по величине боковой силы, зависящей от величины этого угла и от частоты вращения гребного винта.

Боковая сила на гребном винте знакопеременна. Причем знак силы не зависит от направления вращения гребного винта. Максимальные значения боковой силы на гребном винте достигаются при его работе на задний ход. При этом экстремальные значения боковой силы достигаются при углах дрейфа порядка 140 и 240 град.

При работе гребного винта на передний ход боковая сила достигает максимальной величины при углах дрейфа, близких к 90 град. Значения боковой силы меньше по величине, чем соответствующие значения, наблюдаемые при работе гребного винта на задний ход. Значения боковой силы на застопоренном гребном винте (черные точки на рис. 3, $n = 0$), соответствующие работе гребного винта при бесконечной поступи, примерно вдвое меньше соответствующих значений при ходовой поступи.

Универсальные коэффициенты на гребном винте модели для случая движения с нулевым углом дрейфа. Для решения задач управляемости в общей постановке необходимы данные о значениях гидродинамических сил во всем возможном диапазоне параметров. Применительно к гребному винту необходимо знать составляющие гидродинамической силы при значениях углов дрейфа в диапазоне от 0 до 360 град и при значениях поступи гребного винта:

$$J_p = \frac{V}{n_p D_p},$$

где V — скорость перемещения судна; n_p — частота вращения гребного винта; D_p — диаметр гребного винта.

Как видно из определения поступи, она принимает бесконечно большие значения при движении с застопоренным винтом, что является основным режимом при расчете маневра торможения. Это обстоятельство является серьезной проблемой при вычислении кинематических параметров движения судна. Исключить эту особенность можно используя понятие *универсальных коэффициентов*, предложенное В. Г. Бакаевым и В. М. Лаврентьевым 1955 г. [1]. Формулы для расчета универсальных коэффициентов имеют вид:

– для расчета универсального коэффициента упора гребного винта

$$K_{px} = \frac{P}{\rho D_p^2 (V_0^2 + n_p^2 \cdot D_p^2)}; \quad (2)$$

– для расчета универсальной поступи гребного винта

$$\Lambda_p = \frac{V_0}{\sqrt{V_0^2 + n_p^2 \cdot D_p^2}}, \quad (3)$$

где P — упор гребного винта, V_0 — скорость перемещения судна с нулевым углом дрейфа.

Значения универсальных кривых для испытанного гребного винта при нулевом значении угла дрейфа приведены далее. Поскольку оборудование не позволяло выполнить измерение упора гребного винта, для анализа были использованы универсальные кривые для гребного винта серии В [20] с шагом $H/D_p = 1$. Кривые воспроизведены здесь на рис. 4. По оси абсцисс отложены значения универсальной поступи. Значения K_{px} определяют продольную составляющую силы на гребном винте, т. е. упор гребного винта. Значение K_{px} рассчитывалось по формуле (2). На приведенных кривых красным цветом выделены значения упора гребного винта, работающего на передний ход, синим цветом — значения упора гребного винта, работающего на задний ход.

На рис. 4 можно выделить четыре режима работы гребного винта: режимы 1 и 2 определяют движение модели передним и задним ходом соответственно, режимы 3 и 4 обеспечивают торможение модели. Упор гребного винта K_{px} , соответствующий свободному самоходу модели, обозначен буквой A (область 1).

Значения боковой силы на гребном винте модели, буксируемой с нулевым углом дрейфа, приведены на рис. 5. Данные также представлены в универсальной форме, т. е.

$$K_{py} = \frac{P_y}{\rho D_p^2 (V_0^2 + n_p^2 \cdot D_p^2)}. \quad (3)$$

Универсальная поступь сохранялась той же, что и в формуле (2).

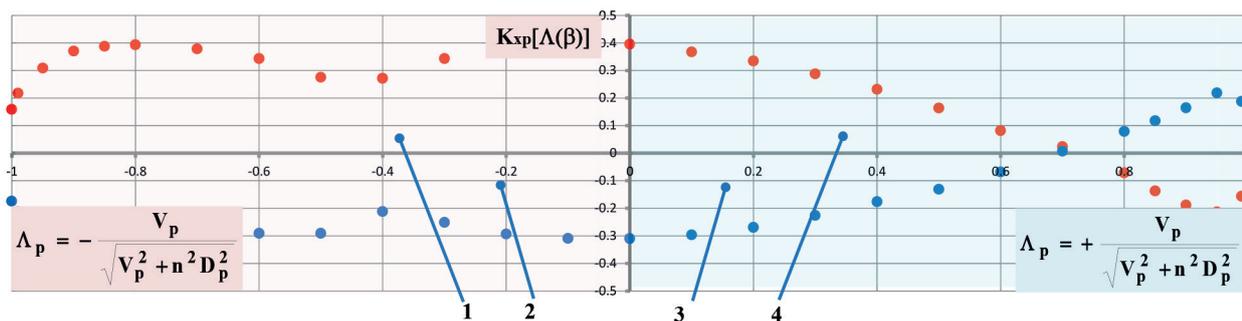


Рис. 4. Значения универсального упора гребного винта:
1, 2 — торможение модели; 3 — движение модели задним ходом;
4 — движение модели передним ходом

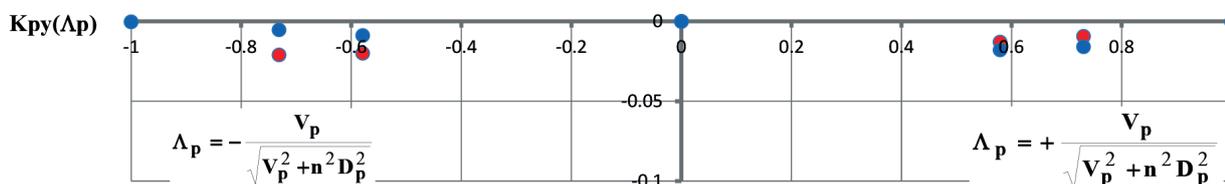


Рис. 5. Значения универсальной боковой силы на гребном винте

Сравнивая значения, приведенные на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы:

- боковая сила на винте принимает нулевые значения при швартовном режиме работы и при движении с застопоренным винтом;
- при значениях поступи, близких к рабочим, боковая сила отлична от нуля и сопоставима с соответствующими значениями для упора, однако обе составляющие малы по сравнению со значениями упора на швартовых.

Универсальные коэффициенты на гребном винте модели для случая движения с произвольным углом дрейфа. Расчетная оценка влияния угла дрейфа на величину упора гребного винта была выполнена на основании следующих рассуждений. Если при изменении угла дрейфа скорость буксировки модели и частота вращения гребного винта остаются постоянными и равными значениям в условиях свободного самохода модели, то упор гребного винта при буксировке модели с углом дрейфа $\beta = 90^\circ$ (см. рис. 4, точка B) будет соответствовать упору при нулевом значении поступи. Полагая, что при изменении угла дрейфа поступь гребного винта изменяется по закону:

$$\Lambda_{px}(\beta) = \frac{V_0 \cdot \cos \beta}{\sqrt{(V_0 \cos \beta)^2 + n_p^2 D_p^2}}, \quad (4)$$

а упор гребного винта остается функцией универсальной поступи:

$$K_{px}(\beta) = K_{px}[\Lambda_{px}(\beta)], \quad (5)$$

можно рассчитать изменение универсального упора, обусловленное изменением угла дрейфа. Результаты расчетной оценки $K_{px}(\beta)$ показаны на рис. 6, откуда следует, что величина упора гребного винта на переднем ходу возрастает от значения $K_{px} = 0,09$ при $\beta = 0^\circ$ до $K_{px} = 0,4$ при $\beta = 90^\circ$. При работе гребного винта на задний ход те же значения будут следующие: $K_{px} = 0,05$ при $\beta = 0^\circ$ и $K_{px} = 0,3$ при $\beta = 90^\circ$. Аналогичные рассуждения будут справедливы и для другой начальной поступи. Следует отметить, что влияние угла дрейфа на величину упора гребного винта максимально при режимах 3 и 4 (см. рис. 4) его работы. При режимах 1 и 2 работы величина упора гребного винта от частоты вращения практически не зависит.

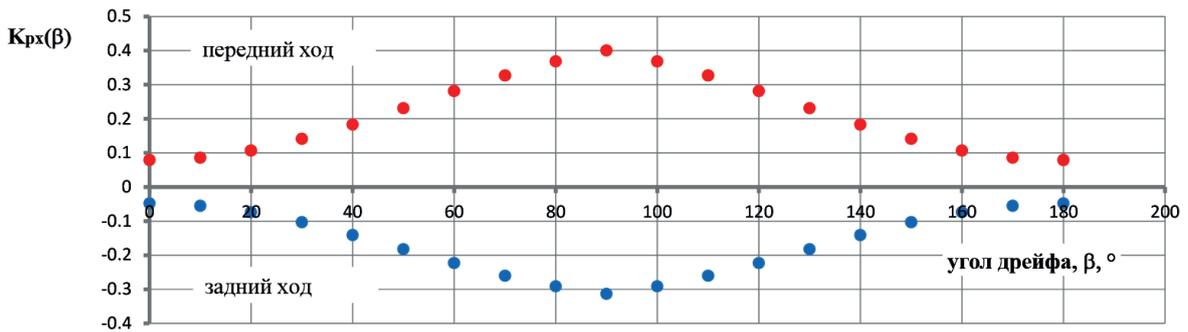


Рис. 6. Значения универсального упора гребного винта при различных углах дрейфа

При оценке значений универсальной боковой силы на гребном винте использовались те же значения характерных величин, что и при оценке упора, т. е. V_0 и n_p соответствовали условию свободного самохода. В качестве характерной скорости использовалась проекция скорости на ось «у», в связанной с моделью системе координат. Формула для расчета универсальной боковой силы имела вид

$$K_{py} = \frac{P_y}{\rho D_p^2 ((V_0 \sin \beta)^2 + n_p^2 D_p^2)}, \quad (6)$$

Результаты расчетов K_{py} при различных значениях угла дрейфа приведены на рис. 7, откуда следует, что влияние поступи гребного винта на величину боковой силы невелико. При работе гребного винта на передний ход (красные точки) боковая сила на винте достигает максимальных значений при углах дрейфа 110° и 250° и составляет:

$$K_{py} = 0,2 \text{ — при } \beta = 110^\circ;$$

$$K_{py} = 0,3 \text{ — при } \beta = 250^\circ,$$

что сопоставимо с величиной упора гребного винта на швартовых.

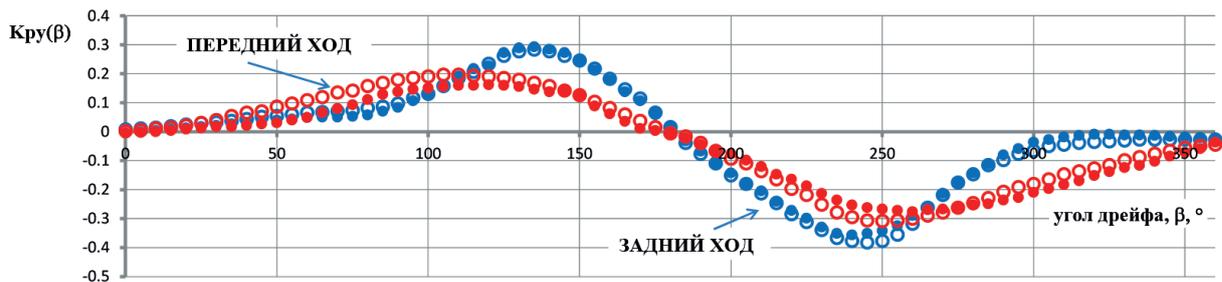


Рис. 7. Значения универсальной боковой силы на гребном винте при различных углах дрейфа

При работе гребного винта на задний ход боковая сила на винте достигает максимального значения при углах дрейфа 140° и 240° и составляет:

$$K_{py} = 0,3 \text{ — при } \beta = 140^\circ;$$

$$K_{py} = 0,38 \text{ — при } \beta = 240^\circ.$$

При работе гребного винта в швартовном режиме боковая сила близка к нулю.

При застопоренном винте величина боковой силы на винте определится величиной нагрузки гребного винта, определяемой формулой (1).

Использование универсальных коэффициентов для расчета упора и боковой силы на гребном винте. Если построить значения универсальной боковой силы на гребном винте, выбрав в качестве характерных частоту вращения гребного винта, равную соответствующему значению при свободном самоходе, а в качестве характерной скорости хода — ее проекцию на ось «у» в связанной с моделью системе координат, то получим выражение для универсальной боковой силы явно не зависящей от угла дрейфа, т. е.

$$K_{py} [\Lambda_p (\beta)] = \frac{k_{1y} (J_{p0})}{\Lambda_p (\beta)^2 + 1}, \quad (7)$$

где $k_{1y} (J_{p0})$ — упор гребного винта при движении в режиме свободного самохода; $\Lambda_p (\beta)$ — универсальная поступь гребного винта при текущем угле дрейфа, т. е.

$$\Lambda_{py} (\beta) = \frac{V_0 \cdot \sin \beta}{\sqrt{(V_0 \sin \beta)^2 + n^2 \cdot D_p^2}}. \quad (8)$$

Результаты обработки экспериментальных данных, построенные по универсальной поступи для движения модели передним и задним ходом при различной частоте сращения гребного винта, показаны на рис. 8. Приведенные кривые $K_{py} [\Lambda_p (\beta)]$ в явном виде не содержат угла дрейфа, а влияние частоты вращения гребного винта незначительно.

Зависимость $K_{py} [\Lambda_p (\beta)]$ от универсальной поступи $\Lambda_p (\beta)$ двузначна. Максимальные значения поступи соответствуют углам дрейфа $\beta = 90^\circ$ и $\beta = 270^\circ$ (см. точки на рис. 8). Для положительной поступи верхние ветви кривых соответствуют углам дрейфа $0^\circ \leq \beta < 90^\circ$, а нижние — соответствуют углам дрейфа $90^\circ \leq \beta < 180^\circ$. Для отрицательной поступи нижние ветви кривых соответствуют углам дрейфа $180^\circ \leq \beta < 270^\circ$, а верхние — углам дрейфа $270^\circ \leq \beta < 360^\circ$. Вид кривых определяется значением поступи при нулевом угле дрейфа $\Lambda_p (0)$. С увеличением поступи $\Lambda_p (0)$. Предельные значения $\Lambda_p (\beta)$ увеличиваются, стремясь к ± 1 .

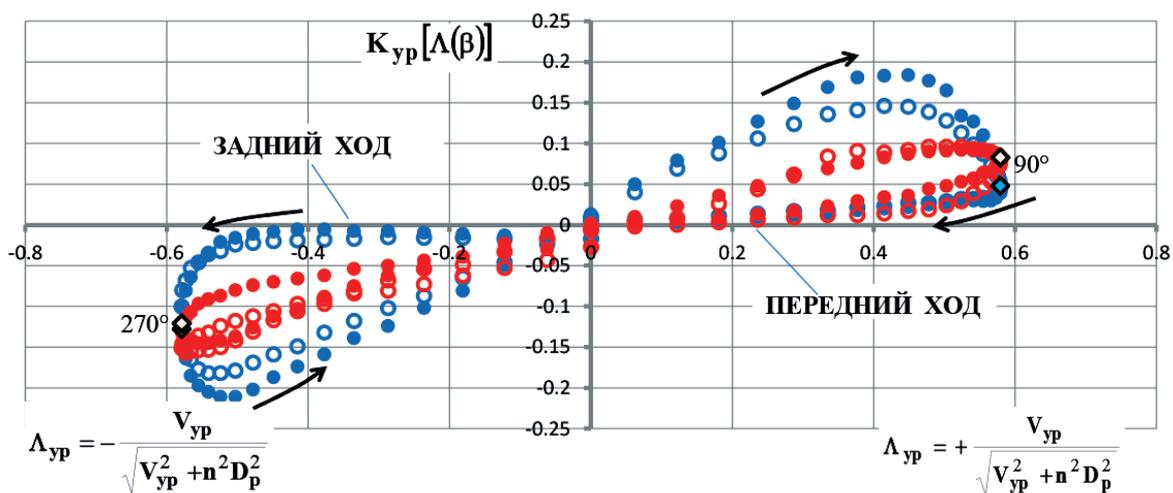


Рис. 8. Значения универсальной боковой силы на гребном винте, построенные по приведенной поступи

Используя полученную зависимость, можно рассчитать значение боковой силы на гребном винте натурного судна. Формула для расчета будет иметь вид

$$P_{yp} = K_{py} [\Lambda_p (\beta)] \cdot (\Lambda_p (\beta)^2 + 1) \rho n_p^2 D_p^4, \quad (9)$$

где $K_{py} [\Lambda_p (\beta)]$ — значение универсальной боковой силы на гребном винте при текущем значении угла дрейфа; $\Lambda_p (\beta)$ — универсальная поступь гребного винта; n — частота вращения гребного винта при условии свободного самохода с нулевым углом дрейфа; D_p — диаметр гребного винта.

Выводы (Summary)

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Боковая сила на гребном винте может считаться малой только при движении судна с углами дрейфа 0° и 180° . При углах дрейфа, близких к лаговым значение боковой силы сопоставимо по величине с упором гребного винта.
2. Боковая сила на гребном винте достигает наибольших значений при работе винта на задний ход.
3. Величину боковой силы на гребном винте необходимо учитывать при расчете кинематических параметров движения судна, особенно при снижении скорости хода, как в условиях тихой воды, так и при ветре.

Авторы выражают благодарность мастеру лаборатории № 26 Е. А. Лысенкову и сотруднику сектора В. И. Левченко за проектирование и изготовление уникального динамометра, позволившего провести уникальные измерения боковой силы на гребном винте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войткунский Я. И.* Справочник по теории корабля / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. — Л.: Судостроение, 1973. — С. 233–241.
2. *Fugino M.* Maneuverability in Restricted Waters: State of the Art / M. Fugino. — University of Michigan, 1976. — 157 p.
3. *Inoue S.* Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring / S. Inoue, M. Hirano, K. Kijima // International Shipbuilding Progress. — 1981. — Vol. 28. — No. 321. — Pp. 112–125. DOI: 10.3233/ISP-1981-2832103.
4. *Hoof J. P.* The steering of a ship during the stopping manoeuvre / J. P. Hoof // International Shipbuilding Progress. — 1970. — Vol. 17. — No. 190. — Pp. 191–203. DOI: 10.3233/ISP-1970-1719003.
5. *Басин А. М.* Теория и расчет гребных винтов / А. М. Басин, И. Я. Миниович. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 760 с.
6. *Кацман Ф. М.* Пропульсивные качества морских судов / Ф. М. Кацман, А. Ф. Пустошный, В. М. Штумпф. — Л.: Судостроение, 1972. — 510 с.
7. *Русецкий А. А.* Судовые движители / А. А. Русецкий, М. М. Жученко, О. В. Дубровин. — Л.: Судостроение, 1971. — 287 с.
8. *Бавин В. Ф.* Гребные винты. Современные методы расчета / В. Ф. Бавин, Н. Ю. Завадовский, Ю. Л. Левковский, В. Г. Мишкевич. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.
9. *Гофман А. Д.* Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна / А. Д. Гофман. — Л.: Изд. Судостроение, 1988. — С. 125–129.
10. *Миниович И. Я.* Действие судового гребного винта в косом потоке / И. Я. Миниович // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. — 1946. — Вып. 14.
11. *Гречин М. А.* Торможение судов при движении по криволинейной траектории / М.А. Гречин // Труды ЦНИИМФ. — 1972. — Вып. 153.
12. *Blanke M.* Dynamic model for thrust generation of marine propellers / M. Blanke, K. P. Lindegaard, T. I. Fossen // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33. — Is. 21. — Pp. 353–358. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37100-8.
13. *Mofidi A.* Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller / A. Mofidi, P. M. Carrica // Computers & fluids. — 2014. — Vol. 96. — Pp. 191–203. DOI: 10.1016/j.compfluid.2014.03.017.
14. *Chang P. A.* Propeller forces and structural response due to crashback / P. A. Chang, M. Ebert, Y. L. Young, Z. Liu, K. Mahesh, H. Jang, M. Shearer // 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. — ONR, 2008.
15. *Badoe C. E.* Influence of drift angle on the computation of hull-propeller-rudder interaction / C. E. Badoe, A. B. Phillips, S. R. Turnock // Ocean engineering. — 2015. — Vol. 103. — Pp. 64–77. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.059.
16. *Guo H.* Investigation on hull-propeller-rudder interaction by RANS simulation of captive model tests for a twin-screw ship / H. P. Guo, Z. J. Zou, Y. Liu, F. Wang // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 162. — Pp. 259–273. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.035.

17. Martin J. E. Validation of a propeller model for maneuvering applications / J. E. Martin, A. Mofidi, T. Michael, P. M. Carrica // *Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp.* — 2015. — Vol. 15.
18. Vartdal B. J. Lateral propeller forces and their effects on shaft bearings / B. J. Vartdal, T. Gjestland, T. I. Arvidsen // *First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim Norway.* — 2009. — Pp. 475–481.
19. Лебедева М. П. Боковая сила на гребном винте при произвольном движении судна / М. П. Лебедева // *Труды НТО XIV Крыловские чтения.* — СПб.: ФГУП «Крыловский научный центр», 2013.
20. Van Lammeren W.P.A. Ostervald. The Wageningen B — Screw Series / W. P. A. van Lammeren, J.D. van Manen, M. W. C. Ostervald. — 1969. — Vol. 77. — Is. 8. — Pp. 269–317.

REFERENCES

1. Voitkunskii, Ya. I., R. Ya. Pershits, and I. A. Titov. *Spravochnik po teorii korablya.* L.: Izd. Sudostroenie, 1973. 233–241.
2. Fugino, M. *Maneuverability in Restricted Waters: State of the Art.* University of Michigan, 1976.
3. Inoue, Shosuke, Masayoshi Hirano, and Katsuro Kijima. “Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring.” *International Shipbuilding Progress* 28.321 (1981): 112–125. DOI: 10.3233/ISP-1981-2832103
4. Hooft, J. P. “The steering of a ship during the stopping manoeuvre.” *International Shipbuilding Progress* 17.190 (1970): 191–203. DOI: 10.3233/ISP-1970-17 190034.
5. Basin, A. M., and I. Ya. Miniovich. *Teoriya i raschet grebnykh vintov.* L.: Sudpromgiz, 1963.
6. Katsman, F. M., A. F. Pustoshnyi, and V.M. Shtumpf. *Propul'sivnye kachestva morskikh sudov.* L.: Sudostroenie, 1972..
7. Rusetskii, A. A., M. M. Zhuchenko, and O.V. Dubrovin. *Sudovye dvizhiteli.* L.: Sudostroenie, 1971.
8. Bavin, V. F., N. Yu. Zavadovskii, Yu.L. Levkovskii, and V.G. Mishkevich. *Grebnye vinty. Sovremennye metody rascheta.* L.: Sudostroenie, 1983.
9. Gofman, A. D. *Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovaniye sudna.* L.: Izd. Sudostroenie, 1988. 125–129.
10. Miniovich, I. Ya. “Deistvie sudovogo grebnogo vinta v kosom potoke.” *Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova* 14 (1946).
11. Grechin, M. A. “Tormozhenie sudov pri dvizhenii po krivolineinoi traektorii.” *Trudy TsNIIMF* 153 (1972).
12. Blanke, Mogens, Karl-Petter Lindegaard, and Thor I. Fossen. “Dynamic model for thrust generation of marine propellers.” *IFAC Proceedings Volumes* 33.21 (2000): 353–358. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37100-8
13. Mofidi, Alireza, and Pablo M. Carrica. “Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller.” *Computers & fluids* 96 (2014): 191–203. DOI: 10.1016/j.compfluid.2014.03.017
14. Chang, P. A., M. Ebert, Y. L. Young, Z. Liu, K. Mahesh, H. Jang, and M. Shearer. “Propeller forces and structural response due to crashback.” *27th Symposium on Naval Hydrodynamics.* ONR, 2008.
15. Badoe, Charles E., Alexander B. Phillips, and Stephen R. Turnock. “Influence of drift angle on the computation of hull–propeller–rudder interaction.” *Ocean engineering* 103 (2015): 64–77. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.059.
16. Guo, Hai-peng, Zao-jian Zou, Yi Liu, and Feng Wang. “Investigation on hull-propeller-rudder interaction by RANS simulation of captive model tests for a twin-screw ship.” *Ocean Engineering* 162 (2018): 259–273. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.035
17. Martin, J. Ezequiel, Alireza Mofidi, Thad Michael, and Pablo M. Carrica. “Validation of a propeller model for maneuvering applications.” *Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp.* Vol. 15. 2015.
18. Vartdal, Bjørn Johan, Tormod Gjestland, and Terje Ingvar Arvidsen. “Lateral propeller forces and their effects on shaft bearings.” *First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim Norway.* 2009. 475–481.
19. Lebedeva, M. P. “Bokovaya sila na grebnom vinte pri proizvol'nom dvizhenii sudna.” *Trudy NTO XLV Krylovskie chteniya.* FGUP «Krylovskii nauchnyi tsentr», 2013.
20. Van Lammeren, W. P. A., J. D. Van Manen, and M. W. C. Oosterveld. “The Wageningen B-screw series.” 77.8 (1969): 269–317.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедева Марина Петровна —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: imp45@yandex.ru, lebedevamp@gumrf.ru

Вишневский Леонид Иосифович —
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет
190008, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: vishli@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedeva, Marina P. —
PhD,
Senior Researcher
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: imp45@yandex.ru, lebedevamp@gumrf.ru

Vishnevskii, Leonid I. —
Dr. of Technical Sciences,
Senior Researcher
St. Petersburg State Marine Technical University
3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190008,
Russian Federation
Krylov State Research Centre
44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: vishli@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 14 мая 2019 г.
Received: May 14, 2019.*