

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАНЕВРА СУДНА «РАЗВОРОТ НА МЕСТЕ»

П.Н. Токарев

*Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Судоводитель должен хорошо знать маневренные качества своего судна, а также возможности судовых средств управления для выполнения того или иного маневра. В «Информации» о параметрах поворотливости, которая имеется на судне, нет данных о выполнении такого важного маневра, как «разворот на месте», который часто используется на стесненной по габаритам акватории. В работе, приняв некоторые допущения, приведено решение системы уравнений движения судна применительно к рассматриваемому маневру. Автором получены аналитические выражения для расчета угловой скорости вращения и угла разворота судна по времени маневра «разгона», вращение по инерции и активного гашения инерции вращения. Используя полученные выражения, выполнен расчет параметров оборота теплохода проекта 507.

Приведены графики зависимости угловой скорости и угла поворота судна от времени маневра.

Ключевые слова: двухвинтовое судно, работа движителей «враздрай», носовое подруливающее устройство, стесненная акватория, разворот «на месте», расчет параметров.

В практике судовождения довольно часто возникает необходимость выполнения маневров при скоростях хода, близких к нулю. Это происходит при маневрировании судов на акваториях ограниченных размеров (постановка судна на якорь и снятие с якоря, привально-отвальные маневры в порту). В этом случае практический интерес для судоводителей представляет знание возможностей судовых средств управления своего судна для выполнения таких видов маневра, как движение судна лагом и вращение «на месте».

Рассмотрим маневр судна «разворот на месте». Принимаем допущение о том, что судно не имеет крена и дифферента, и пренебрегаем асимметрией судна относительно поперечной вертикальной плоскости, проходящей через начало системы координат, связанной с судном. Аналитические выражения для определения параметров выполнения оборота на месте, когда радиус циркуляции центра масс судна стремится к нулю ($R_{LM} \rightarrow 0$) найдем из решения системы уравнений (35) [1].

Полагая, что продольного и поперечного смещения судна нет ($\frac{dv_x}{dt} = \frac{dv_y}{dt} = 0$), вращение судна «на месте» с учетом схемы действия усилий на судно (рис.1.) может быть описано следующей системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} T_{E1} - T_{E2} &= 0; \\ Y_Y + Y_R &= 0; \\ J_z(1 + k_{66}) \frac{d\omega}{dt} &= M_R + M_F + M_P - M_G. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где T_{E1} и T_{E2} – полезный упор движителей на передний и задний ход соответственно;

Y_Y и Y_R – боковая составляющая гидродинамической силы на корпусе судна и рулевом органе соответственно;

M_R , M_F , M_P и M_G – момент, создаваемый рулевым устройством, подруливающим устройством, работой движителей «враздрай» и гидродинамический момент на корпусе судна соответственно;

J_z – момент инерции судна относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс судна.

Выражения для определения момента инерции J_z предложены В.Г. Павленко [2], Р.Я. Першицем [3], Н.Ф. Сторожевым [4]. При расчетах маневренных качеств речных судов обычно используются формулы Н.Ф. Сторожева или В.Г. Павленко.

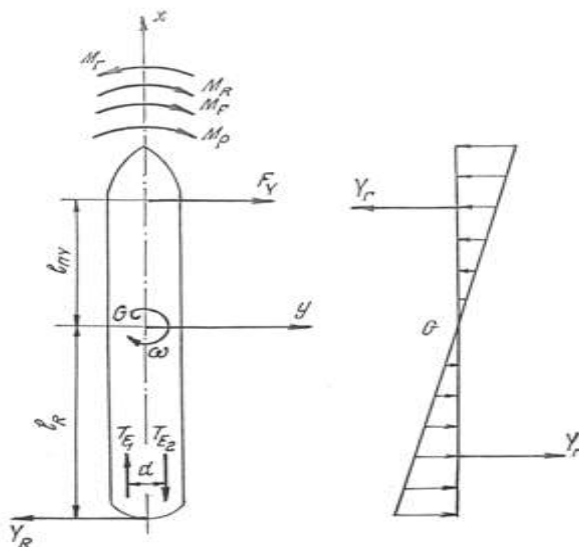


Рис. 1. Схема сил и моментов, действующих на судно при выполнении оборота «на месте»

Гидродинамический момент на корпусе судна M_{Γ} по исследованиям Р.Я. Першица [3] определяется по выражению:

$$M_{\Gamma} = 0,059c_2 \frac{\rho}{2} L^4 T \omega^2 . \quad (2)$$

По исследованиям Г.В. Соболева [5]:

$$M_{\Gamma} = 0,067c_2 \frac{\rho}{2} L^4 T \omega^2 . \quad (3)$$

где L – длина судна;
 T – осадка судна.

Условия равенства $v_x = v_y = 0$ можно определить из решения первого и второго уравнений системы при заданной частоте вращения движителя, работающего на передний или задний ход по выражениям, предложенным в работе [6].

Зависимости вида $\Theta = f(t)$, $\omega = f(t)$, $\omega = f(\Theta)$ для эволюционного периода вращения «на месте» получим из решения третьего уравнения системы (1), которое можно привести к следующему виду:

$$\frac{d\omega}{dt} = B - A\omega^2 , \quad (4)$$

где коэффициенты A и B определяются из выражений:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{c_{MBP} L^4 T}{2J_z (1 + k_{66})}; \\ B &= \frac{M_R + M_F + M_P}{J_z (1 + k_{66})}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После разделения переменных в уравнении (4) и интегрирования имеем

$$t = \frac{1}{2AE} \ln \left| \frac{E + \omega}{E - \omega} \right| , \quad (6)$$

где $E = \sqrt{B/A}$ – скорость вращения судна в установившемся режиме.

Выражение (6) позволяет получить зависимость $\omega = f(t)$

$$\omega = E \frac{e^{2AEt} - 1}{1 + e^{2AEt}} . \quad (7)$$

Учитывая, что $\omega = d\Theta/dt$, зависимость угла поворота судна от времени определим из интегрирования выражения (7).

После интегрирования имеем

$$\Theta = \frac{1}{2A} \left[\ln \frac{(1 + e^{2AEt})^2}{e^{2AEt}} - 1,386 \right]. \quad (8)$$

В некоторых случаях необходимо знать значение угла поворота от угловой скорости вращения ω . Для этого запишем следующее соотношение:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\Theta} \cdot \frac{d\Theta}{dt} = \omega \frac{d\omega}{d\Theta}. \quad (9)$$

Тогда

$$\Theta = \int_0^{\omega} \frac{\omega d\omega}{B - A\omega^2}. \quad (10)$$

После интегрирования выражения (10) и некоторых преобразований, получим

$$\Theta = \frac{1}{2A} \ln \left| \frac{E^2}{E^2 - \omega^2} \right|, \quad (11)$$

или

$$\omega = E \sqrt{1 - \frac{1}{e^{2A\Theta}}}. \quad (12)$$

Для определения параметров разгона до установившегося значения используем выражение (4), принимая $d\omega/dt = 0$, тогда

$$B - A\omega_0^2 = 0. \quad (13)$$

откуда

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{B}{A}} = E. \quad (14)$$

Подставляя выражение (14) в формулу (7), находим, что

$$\frac{e^{2AEt} - 1}{1 + e^{2AEt}} = 1. \quad (15)$$

Соотношение (15) равно единице при $t \rightarrow \infty$. Для практических расчетов обычно принимают:

$$\omega_0 = 0,95E. \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в формулу (7), имеем:

$$t_{\text{раз}} = \frac{1,83}{AE}. \quad (17)$$

Угол, на который повернется судно до установившегося значения угловой скорости, определяем из выражения (8) с учетом (17)

$$\Theta = \frac{1,165}{A}. \quad (18)$$

Используя полученные зависимости (7), (8) и (12), выполнен расчет $\omega = f(t)$, $\Theta = f(t)$ и $\omega = f(\Theta)$ для теплохода пр. 507 в полном грузу. Результаты расчета приведены на рис. 2.

Расчет произведен для случая, соответствующего работе двигателей «враздрай» полным ходом и перекладки насадок «внутри». При любом другом режиме работы двигателей, а также в случае перекладки насадок «наружу» угловая скорость вращения уменьшится и потребуются больший промежуток времени для поворота на заданный угол.

Выражения для определения параметров вращения по инерции определяется из решения уравнения

$$\frac{d\omega}{dt} = -A\omega^2. \quad (19)$$

Зависимости $\omega = f(t)$, $\Theta = f(t)$ и $\omega = f(\Theta)$ получены в следующем виде:

$$\omega = \frac{\omega_1}{1 + A\omega_1 t}. \quad (20)$$

$$\Theta = \frac{1}{A} \ln|1 + A\omega_1 t|. \quad (21)$$

$$\Theta = \frac{1}{A} \ln \left| \frac{\omega_1}{\omega} \right|. \quad (22)$$

В выражениях (20–22) ω_1 – угловая скорость вращения судна в момент остановки работы ПУ и двигателей.

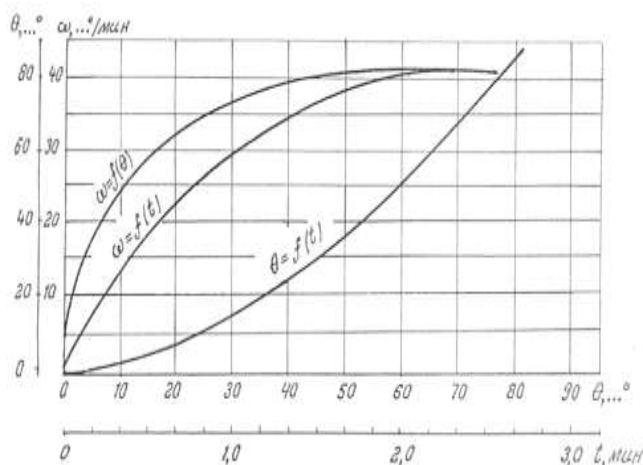


Рис. 2. Зависимость ω и Θ от времени маневра

Результаты расчетов $\Theta = f(t)$ и $\omega = f(\Theta)$ для предыдущего примера при $\omega_1 = \omega_0$ приведены на рис. 3.

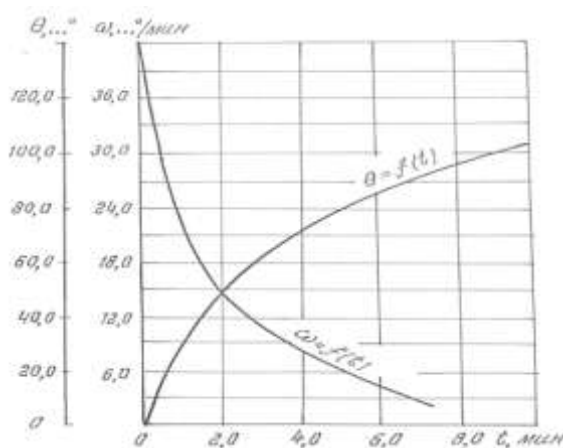


Рис. 3. Изменение ω и Θ при вращении судна по инерции

В случае активного гашения инерции вращения судна, зависимости $\Theta = f(t)$ и $\omega = f(t)$ находим из решения уравнения вида:

$$\frac{d\omega}{dt} = -B - A\omega^2. \quad (23)$$

Интегрирование уравнения (23) позволяет получить

$$t = \frac{1}{\sqrt{AB}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\sqrt{B/A}} \right), \quad (24)$$

из выражения (24)

$$\omega = \sqrt{\frac{B}{A}} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} - \sqrt{AB}t \right). \quad (25)$$

Если учесть, что $d\Theta/dt = \omega$ и проинтегрировать выражение (25) по времени, можно получить зависимость $\Theta = f(t)$ вида

$$\Theta = \frac{1}{A} \ln \frac{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} - \sqrt{AB}t \right)}{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} \right)}. \quad (26)$$

В формулах (24–26) ω_2 – угловая скорость вращения судна на момент начала активного гашения инерции вращения.

Для определения зависимости $\Theta = f(t)$, воспользуемся выражением (9), тогда

$$\Theta = -\frac{1}{A} \int_{\omega_2}^0 \frac{\omega d\omega}{\left[\left(\sqrt{B/A} \right)^2 + \omega^2 \right]}. \quad (27)$$

После интегрирования (26) и некоторых преобразований имеем

$$\Theta = \frac{1}{2A} \ln \left| 1 + \left(\frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}} \right)^2 \right|. \quad (28)$$

Для определения времени активного гашения инерции вращения до $\omega = 0$ необходимо проинтегрировать выражение (23) с пределами $(\omega_2; 0)$, тогда

$$t = \frac{1}{\sqrt{AB}} \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\sqrt{B/A}}. \quad (29)$$

Результаты расчетов $\Theta = f(t)$ и $\omega = f(\Theta)$ для теплохода пр. 507 в полном грузу с установившейся скорости вращения ω_0 при таком же режиме работы двигателей, что и для случая разгона представлены на рис. 4.

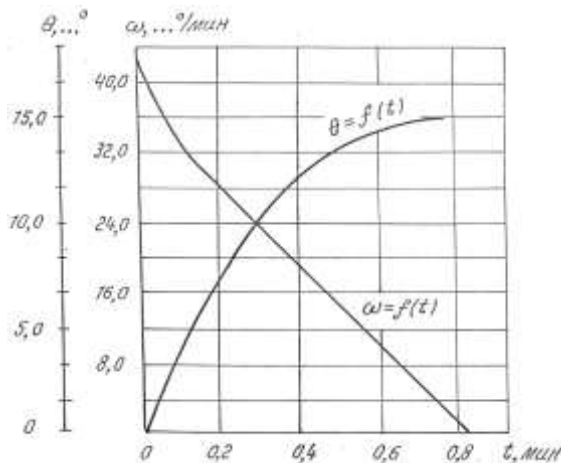


Рис. 4. Изменение ω и Θ при активном гашении инерции вращения

Таким образом, выражения, приведенные в статье, позволяют выполнять расчет параметров маневрирования судна при скоростях движения судна, близких к нулю, при использовании всего комплекса средств управления. Информация об угловой скорости вращения и угла поворота судна по времени маневра будет полезна судоводителям и дополнит «Информации о параметрах поворотливости судна».

Список литературы:

1. Токарев П.Н. Математическая модель произвольного движения и маневрирования судна // П.Н. Токарев // Н.Новгород. Вестник ВГАВТ. – 2017. – №56. – С. 198–214.
2. Павленко В.Г. Маневренные качества речных судов (Управляемость судов и составов) / В.Г. Павленко. – Москва: Транспорт, 1979. – 184 с.

3. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля/ Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов – Ленинград: Судостроение, 1973. – 512 с.
4. Сторожев Н.Ф. К расчету момента инерции судна относительно вертикальной оси / Н.Ф. Сторожев // Новосибирск. Тр. Новосибир. ин-та инж. водн. трансп. (НИИВТ). – 1960. – Вып.5. – С. 64–67.
5. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения / Г.В.Соболев. – Ленинград: Судостроение, 1976. – 478 с.
6. Лебедев Э.П. Средства активного управления судами / Э.П. Лебедев – Ленинград.: Судостроение, 1969. – 264 с.
7. Ходкость и управляемость судов: учебник / утв. Управл. кадров и учеб. заведений МРФ РСФСР для студ. ин-тов водн. тр-та; под ред. В.Г. Павленко. – Москва: Транспорт, 1991. – 455 с.
8. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна / А.Д. Гофман. – Ленинград: Судостроение, 1988. – 360 с.
9. Сандлер Л.Б. Взаимодействие судового руля со струей гребного винта в швартовном режиме /Л.Б. Сандлер //Совершенствование гидродинамических качеств судов и составов на внутренних водных путях. – Новосибирск, 1986. – С. 75–80.
10. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном / Р.Я. Першиц. – Ленинград: Судостроение, 1983. – 272 с.
11. Токарев П.Н. Оценка условий безопасного маневрирования при ветре на малых скоростях хода / П.Н. Токарев // Н.Новгород. Вестник ВГАВТ. – 2019. – №60. – С. 202–212.

ANALYTICAL CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE MANEUVER OF THE SHIP «U-TURN IN PLACE»

Pavel N. Tokarev

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The skipper must be well aware of the maneuverability of his vessel, as well as the capabilities of the ship's controls to perform a particular maneuver. In the Information «about the parameters of turnability, which is available on the ship, there is no data on the performance of such an important maneuver as «turn in place», which is often used in a confined area of water. Some assumptions have been taken in this article and the solution of the system of equations of the motion of the vessel in relation to the considered maneuver is proposed. The author obtained analytical expressions for calculation of angular speed and the angle of turn of the vessel at the time of the maneuver of «acceleration», the rotation by inertia and active damping rotational inertia. Using the obtained expressions, the calculation of the parameters of the turnover of the project 507 ship was performed. Graphs of the dependence of the angular speed and the angle of rotation of the vessel on the maneuver time are given.

Keywords: twin screw vessel, the propellers «vrazdrai», bow thruster, confined water area, turn «in place», calculation of the parameters.

References:

1. Tokarev P.N. Matematicheskaya model' proizvol'nogo dvizheniya i manevrirovaniya sudna / P.N.Tokarev // N.Novgorod. Vestnik VGAVT. – 2017. – №56. – S. 198–214.
2. Pavlenko V.G. Manevrennye kachestva rechnyh sudov (Upravlyaemost' sudov i sostavov) / V.G. Pavlenko. – Moskva: Transport, 1979. – 184 s.
3. Vojtkunskij YA.I. Spravochnik po teorii korablya/ YA.I.Vojtkunskij, R.YA.Pershic, I.A.Titov – Leningrad: Sudostroenie, 1973. – 512s.
4. Storozhev N.F. K raschetu momenta inercii sudna otnositel'no vertikal'noj osi/N.F.Storozhev // Novosibirsk. Tr. Novosib. in-ta inzh. vodn. трансп. (НИИВТ). – 1960. – Вып.5. – S.64 – 67.
5. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizaciya sudovozhdeniya/G.V.Sobolev. – Leningrad: Sudostroenie, 1976. – 478s.
6. Lebedev E.P. Sredstva aktivnogo upravleniya sudami/E.P.Lebedev – Leningrad.: Sudostroenie, 1969. – 264 s.
7. Hodkost' i upravlyaemost' sudov: uchebnyy / utv. Upravl. kadrov i ucheb. zavedenij MRF RSFSR dlya stud. in-tov vodn. тр-та; под ред. V.G. Pavlenko. – Moskva: Transport, 1991. – 455 s.
8. Gofman A.D. Dvizhitel'no – rulevoj kompleks i manevrirovanie sudna / A.D.Gofman. – Leningrad: Sudostroenie, 1988. – 360 s.
9. Sandler L.B. Vzaimodejstvie sudovogo rulya so struej grebного vinta v shvartovnom rezhime L.B. Sandler //Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh kachestv sudov i sostavov na vnutrennih vodnyh putyah. – Novosibirsk, 1986. – S. 75–80.
10. Pershic R.YA. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom / R.YA.Pershic.. – Leningrad: Sudostroenie, 1983. – 272 s.
11. Tokarev P.N. Ocenka uslovij bezopasnogo manevrirovaniya pri vetre na malyh skorostyah hoda / P.N. Tokarev // N.Novgorod. Vestnik VGAVT. – 2019. – №60. – S. 202–212.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Токарев Павел Николаевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовождения и безопасности судоходства. Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,

Pavel N. Tokarev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Ship Handling and Safety of Navigation. Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru

e-mail: sudovod@vgavt-nn.ru