

УДК 656.62.052.4  
DOI: 10.37890/jwt.vi77.440

## **Способ оценки поперечных усилий, развиваемых двигательно-рулевым комплексом, по результатам циркуляционных испытаний судна**

**В.И. Тихонов**

*ORCID: 0000-0002-3147-0668,*

**Ю.В. Бажанкин**

*ORCID: 0000-0001-8720-218X,*

**И.М. Осокин**

*ORCID: 0000-0002-5988-6745,*

**А.В. Мухин**

*ORCID: 0009-0004-1058-9493,*

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

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены наиболее распространенные двигательно-рулевые комплексы, используемые на судах. Приведено общее выражение для определения поперечной составляющей силы, развиваемой двигательно-рулевым комплексом любого типа. Рассмотрены значения коэффициентов, описывающих трансформацию потока корпусом судна, полученные в результате исследований А.Д. Гофмана. Описаны недостатки общего метода определения поперечных усилий, развиваемых ДРК. В данной статье предложен способ оценки поперечных усилий, развиваемых ДРК, который заключается в вычислении суммарных сил, действующих на систему корпус – винт – рулевой орган, по результатам натурных испытаний судов. По результатам натурных циркуляционных испытаний судна с использованием метода наименьших квадратов вычислены значения коэффициентов, которые характеризуют поперечную составляющую силы, развиваемой ДРК этого судна. По полученной методике были вычислены такие коэффициенты для двух проектов грузовых судов. Была выполнена проверка корректности выполненных вычислений и сделан вывод об удовлетворительной сходимости полученных результатов.

**Ключевые слова:** натурные испытания, расчетный метод, усилия на ДРК, циркуляционное движение судна, гидродинамика корпуса судна.

## **A method for estimating the transverse forces developed by the propulsion and steering complex, based on vessel circulation tests results**

**Vadim I. Tikhonov**

*ORCID: 0000-0002-3147-0668,*

**Yuriy V. Bazhankin**

*ORCID: 0000-0001-8720-218X,*

**Igor M. Osokin**

*ORCID: 0000-0002-5988-6745,*

**Alexey V. Mukhin**

*ORCID: 0009-0004-1058-9493,*

*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** In the article the most common ships' propulsion and steering complexes are considered. General equation for calculating transverse force developed by any type of a propulsion and steering complex is shown. The authors discuss values of flow transformation coefficients discovered by A. Gofman. Disadvantages of general method for estimating transverse propulsive forces are described. In the article the method for numerical evaluation of transverse propulsion complex forces is presented. This method is based on calculation of total force acting on hull-screw-rudder complex using full-scale trials data. Based on the results of the full-scale circulation trials coefficients values describing total force acting on propulsion and steering complex are calculated using mean least squares method. According to the presented methodology values for two cargo vessels projects were calculated. Calculation verification has been done, and the conclusion about the obtained results satisfactory convergence has been made.

**Keywords:** full-scale trials, numerical method, propulsion complex forces, ship turning motion, hydrodynamics of ship's hull.

### Введение

На подавляющем большинстве судов внутреннего плавания применяются движительно-рулевые комплексы (ДРК) двух основных типов:

одиночных или спаренных рулей, установленных за открытым гребным винтом или комплексом винт – неподвижная насадка, и соответствующих движителей;

комплексов гребной винт – поворотная направляющая насадка.

Указанные ДРК развивают как полезную тягу, необходимую для продольного перемещения судна, так и поперечную силу, которая необходима для изменения направления его движения.

В случае криволинейного движения между корпусом судна и элементами ДРК при переключке рулевого органа существует весьма сложное и многогранное динамическое взаимодействие. Применение теории крыла и идеального движителя для определения поперечных усилий, возникающих на руле или поворотной насадке, приводит к грубо приближённым результатам.

### Существующие методы расчёта поперечных усилий, развиваемых ДРК

Более или менее надёжные методы практического расчёта усилий, развиваемых ДРК, были разработаны ещё во второй половине прошлого столетия трудами А.М. Басина, А.Д. Гофмана, В.Г. Павленко, Р.Я. Першица, Г.В. Соболева и других отечественных и зарубежных учёных. Однако исследования работы движительно-рулевых комплексов различного типа в тех или иных условиях плавания до сих пор остаются актуальными, о чём свидетельствуют многочисленные научные публикации последних лет, например, [1]–[8]. В то же время общее выражение для определения поперечной составляющей силы, развиваемой указанными выше традиционными ДРК судов речного флота, имеет следующий вид [9]:

$$Y_r = \mu_r \left[ \delta_r - \kappa_r (\beta + \bar{l}_r \bar{\omega}) \right] \frac{\rho}{2} S_r v^2 \phi_K^2, \quad (1)$$

где  $Y_r$  – поперечная составляющая силы, развиваемой ДРК;

$\mu_r$  – коэффициент боковой составляющей силы, развиваемой ДРК;

$\delta_r$  – угол переключки рулевого органа;

$\kappa_r$  – коэффициент, учитывающий влияние судового корпуса и работающего винта на направление потока воды, набегающего на рулевой орган;

$\beta$  – угол дрейфа по центру масс (ЦМ) судна;

$\bar{l}_r = \frac{l_r}{L}$  – относительное расстояние от ДРК до ЦМ судна;

$L$  – расчетная длина судна;

$\bar{\omega} = \frac{L}{R}$  – безразмерная угловая скорость;

$R$  – радиус циркуляции по ЦМ судна;

$\rho$  – массовая плотность воды;

$S_r$  – площадь рулевого органа;

$v$  – линейная скорость ЦМ судна;

$\varphi_k$  – коэффициент, учитывающий влияние корпуса судна на скорость потока воды в месте расположения ДРК.

Величины  $\mu$ ,  $K_r$  и  $S_r$  для движительно-рулевых комплексов разных типов подсчитываются различно по методике, изложенной в работе [9]. При этом для определения коэффициента  $K_r$  необходимо иметь значение коэффициента  $K_k$ , учитывающего влияние судового корпуса на направление потока воды, набегающего на рулевой орган.

Для судов речного флота влияние трансформации потока корпусом судна на скорость и направление движения воды в районе расположения ДРК было экспериментально исследовано на ротативной установке и в опытовом бассейне А.Д. Гофманом. Было установлено, что коэффициенты  $K_k$  и  $\varphi_k$  существенно зависят от того, на каком борту (внешнем или внутреннем) по отношению к траектории циркуляционного движения расположен движительно-рулевой комплекс; форма обводов кормовой оконечности практически не оказывает влияния на их величину. Значения этих коэффициентов представлены в табл. 1 [9].

Таблица 1

Экспериментальные значения коэффициентов  $K_k$  и  $\varphi_k$

Коэффициент	Расположение ДРК		Среднее значение
	внешний борт	внутренний борт	
$\varphi_k$	$1,05 \pm 0,15$	$0,85 \pm 0,20$	0,95
$K_k$	$1,00 \pm 0,20$	$0,90 \pm 0,20$	0,95

Таким образом, общий метод определения поперечных усилий, развиваемых ДРК, заключается в подсчёте боковой силы, действующей на рулевой орган, расположенный за кормовой оконечностью судна и отклонённый на некоторый угол от его диаметральной плоскости (ДП), приближённой оценке коэффициентов влияния судового корпуса и работающего винта на скорость и направление потока воды, набегающего на рулевой орган, и вычислении поперечной силы, действующей на систему корпус – винт – рулевой орган, в предположении, что эта сила приложена к органу управления.

Указанный метод имеет два недостатка, которые ограничивают возможность его применения:

1) корректное расчётное определение поперечной силы ДРК возможно только при постоянной или мало меняющейся частоте вращения винта;

2) значения коэффициентов  $\varphi_k$  и  $K_k$ , приведённые в табл. 1, являются лишь ориентировочными, а для получения более точных значений этих коэффициентов применительно к конкретному судну необходимо проводить сложные, трудоёмкие и дорогостоящие модельные испытания.

### **Методика оценки поперечных усилий, развиваемых ДРК, по результатам натуральных циркуляционных испытаний судна**

В данной статье предлагается способ оценки поперечных усилий, развиваемых ДРК, который заключается в вычислении суммарных сил, действующих на систему корпус – винт – рулевой орган, по результатам натуральных испытаний судов.

Общие уравнения плоского движения судна имеют следующий вид [10]:

$$\begin{aligned} & \left(m + \lambda_{11}\right) \cos \beta \frac{dv}{dt} - \left(m + \lambda_{11}\right) v \sin \beta \frac{d\beta}{dt} + \\ & + mv\omega \sin \beta = X ; \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & -\left(m + \lambda_{22}\right) \sin \beta \frac{dv}{dt} - \left(m + \lambda_{22}\right) v \cos \beta \frac{d\beta}{dt} + \\ & + mv\omega \cos \beta + \lambda_{26} \frac{d\omega}{dt} = Y ; \end{aligned} \tag{3}$$

$$\left(J_z + \lambda_{66}\right) \frac{d\omega}{dt} - \lambda_{26} \sin \beta \frac{dv}{dt} - \lambda_{26} v \cos \beta \frac{d\beta}{dt} = M_z . \tag{4}$$

В выражениях (2) – (4) обозначено:

$m$  – масса судна;

$\lambda_{11}, \lambda_{22}$  – присоединённые массы жидкости;

$t$  – время;

$\omega$  – угловая скорость вращения судна относительно вертикальной оси  $Z$ , проходящей через его ЦМ;

$\lambda_{26}$  – присоединённый статический момент;

$J_z$  – момент инерции судна относительно вертикальной оси, проходящей через его ЦМ;

$\lambda_{66}$  – момент инерции присоединённых масс;

$X, Y$  – проекции главного вектора приложенных к судну сил неинерционной природы на оси  $X$  и  $Y$  подвижной системы координат;

$M_z$  – проекция главного момента приложенных к судну сил неинерционной природы на ось  $Z$  подвижной системы координат.

Правые части уравнений (2) – (4) могут быть представлены следующим образом [10]:

$$X = \sum_{i=1}^{z_r} X_{r_i} - X_{\Gamma} + X_a ; \quad (5)$$

$$Y = Y_{\Gamma} - \sum_{i=1}^{z_r} Y_{r_i} + Y_a ; \quad (6)$$

$$M_z = M_{\Gamma} + l_r \sum_{i=1}^{z_r} Y_{r_i} + M_a . \quad (7)$$

Здесь  $X_{\Gamma}, Y_{\Gamma}, M_{\Gamma}$  – гидродинамические усилия, действующие на подводную часть корпуса судна;

$X_a, Y_a, M_a$  – аэродинамические усилия, действующие на надводную часть судна;

$X_{r_i}, Y_{r_i}$  – составляющие усилия, развиваемого  $i$ -м ДПК;

$z_r$  – количество ДПК.

Для случая установившейся циркуляции из выражений (2)–(7) без учёта внешних факторов получим:

$$mv\omega \sin \beta = \sum_{i=1}^{z_r} X_{r_i} - X_{\Gamma} ; \quad (8)$$

$$mv\omega \cos \beta = Y_{\Gamma} - \sum_{i=1}^{z_r} Y_{r_i} ; \quad (9)$$

$$M_{\Gamma} + l_r \sum_{i=1}^{z_r} Y_{r_i} = 0 . \quad (10)$$

Усилия, действующие на подводную часть корпуса судна, принято представлять в следующей форме:

$$X_{\Gamma} = 0,5C_{x_{\Gamma}}\rho L T v^2 ; \quad (11)$$

$$Y_{\Gamma} = 0,5C_{y_{\Gamma}}\rho L T v^2 ; \quad (12)$$

$$M_{\Gamma} = 0,5C_{m_{\Gamma}}\rho L^2 T v^2 , \quad (13)$$

где  $C_{x_{\Gamma}}, C_{y_{\Gamma}}, C_{m_{\Gamma}}$  – безразмерные коэффициенты гидродинамических усилий;

$T$  – расчетная осадка судна.

Подставляя выражения (13) и (1) в равенство (10), получаем:

$$C_{m_{\Gamma}} \frac{\rho}{2} L^2 T v^2 + l_r \mu_r \left[ \delta_r - \kappa_r (\beta + \bar{l}_r \bar{\omega}) \right] \frac{\rho}{2} S_r z_r v^2 \phi_K^2 = 0 . \quad (14)$$

После несложных преобразований соотношение (14) примет вид

$$C_{m_{\Gamma}} + \bar{l}_r E_r \left[ \delta_r - \kappa_r (\beta + \bar{l}_r \bar{\omega}) \right] = 0 . \quad (15)$$

Здесь  $E_r$  – эффективность рулевых органов, подсчитываемая по формуле [9]:

$$E_r = \frac{\mu_r S_r z_r \phi_K^2}{LT}. \quad (16)$$

На основе анализа динамического взаимодействия судна с окружающей его жидкостью и условной замены реального судового корпуса его эквивалентным аналогом в работе [10] получено следующее выражение для подсчёта коэффициента  $C_{m\Gamma}$ , учитывающее индивидуальные геометрические характеристики погруженной части судна:

$$\begin{aligned} C_{m\Gamma} &= C_{m_{\text{цир}}} + C_{m_{\text{отр}}} + C_{m_V} + C_{m_W} + C_{m_\theta} = \\ &= (B_1 + B_{1\theta}) \sin \beta \cos \beta - (B_2 + B_{2\theta} + B'_2 - B''_2) \bar{\omega} \cos \beta + \\ &+ (B_3 + B_{3V} + B_{3W}) \sin^2 \beta - (B_4 + B_{4V} + B_{4W}) \bar{\omega} \sin \beta + \\ &+ (B_5 + B_{5V} + B_{5W}) \bar{\omega}^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь  $C_{m_{\text{цир}}}$  – коэффициент момента гидродинамических усилий циркуляционной природы;

$C_{m_{\text{отр}}}$  – коэффициент момента гидродинамических усилий отрывной природы;

$C_{m_V}$  – коэффициент момента гидродинамических усилий вязкостной природы;

$C_{m_W}$  – коэффициент момента гидродинамических усилий волновой природы;

$C_{m_\theta}$  – коэффициент момента гидродинамических усилий, обусловленных креном судна на циркуляции.

Значения входящих в выражение (17) величин  $B_i$ , определяются следующим образом [10]:

$$B_1 = (0,25\sigma_H^2 - \bar{l}_{y,H}^2) \sin \bar{q}_H \cos \bar{q}_H + (0,25\sigma_K^2 - \bar{l}_{y,K}^2) \sin \bar{q}_K \cos \bar{q}_K; \quad (18)$$

$$B_2 = \frac{2}{3} \left[ \left( 0,125\sigma_H^3 - \bar{l}_{y,H}^3 \right) \sin \bar{q}_H \cos \bar{q}_H - \left( 0,125\sigma_K^3 - \bar{l}_{y,K}^3 \right) \sin \bar{q}_K \cos \bar{q}_K \right]; \quad (19)$$

$$B_2' = \frac{2\delta B}{L} \left[ \frac{\delta_K (0,25\sigma_K^2 - \bar{l}_{y,K}^2)}{4\delta} \cos^2 \bar{q}_K - \frac{\delta_H (0,25\sigma_H^2 - \bar{l}_{y,H}^2)}{4\delta} \cos^2 \bar{q}_H \right]; \quad (20)$$

$$B_2'' = \frac{B}{2L} \left[ \delta_H \left( 0,25\sigma_H^2 - \bar{l}_{y,H}^2 \right) A_{\gamma_H} \cos^2 \bar{q}_H + \delta_K \left( 0,25\sigma_K^2 - \bar{l}_{y,K}^2 \right) A_{\gamma_K} \cos^2 \bar{q}_K \right]; \quad (21)$$

$$B_3 = \frac{1}{2} \left[ \left( 0,25\sigma_H^2 - \bar{l}_{y,H}^2 \right) A_{\gamma_H} \sin^2 \bar{q}_H + \left( \bar{l}_{y,H}^2 - \bar{l}_{y,K}^2 \right) A_{\gamma_H} - \left( 0,25\sigma_K^2 - \bar{l}_{y,K}^2 \right) A_{\gamma_K} \sin^2 \bar{q}_K \right]; \quad (22)$$

$$B_4 = \frac{2}{3} \left[ \left( 0,125\sigma_H^3 - \bar{l}_{y,H}^3 \right) A_{\gamma_H} \sin^2 \bar{q}_H + \left( \bar{l}_{y,H}^3 + \bar{l}_{y,K}^3 \right) A_{\gamma_H} + \left( 0,125\sigma_K^3 - \bar{l}_{y,K}^3 \right) A_{\gamma_K} \sin^2 \bar{q}_K \right]; \quad (23)$$

$$B_5 = \frac{1}{4} \left[ \left( 0,0625\sigma_H^4 - \bar{l}_{y,H}^4 \right) A_{\gamma_H} \sin^2 \bar{q}_H + \left( \bar{l}_{y,H}^4 - \bar{l}_{y,K}^4 \right) A_{\gamma_H} - \left( 0,0625\sigma_K^4 - \bar{l}_{y,K}^4 \right) A_{\gamma_K} \sin^2 \bar{q}_K \right]; \quad (24)$$

$$B_{3V} = C_{V_y} \frac{B}{2T} \left[ \delta_H \left( 0,25\sigma_H^2 - \bar{l}_{y,H}^2 \right) - \delta_K \left( 0,25\sigma_K^2 - \bar{l}_{y,K}^2 \right) + \beta_M \left( \bar{l}_{y,H}^2 - \bar{l}_{y,K}^2 \right) \right]; \quad (25)$$

$$B_{4V} = C_{V_y} \frac{2B}{3T} \left[ \delta_H \left( 0,125\sigma_H^3 - \bar{l}_{y,H}^3 \right) + \delta_K \left( 0,125\sigma_K^3 - \bar{l}_{y,K}^3 \right) + \beta_M \left( \bar{l}_{y,H}^3 + \bar{l}_{y,K}^3 \right) \right]; \quad (26)$$

$$B_{5V} = C_{V_y} \frac{B}{4T} \left[ \delta_H \left( 0,0625\sigma_H^4 - \bar{l}_{y,H}^4 \right) - \delta_K \left( 0,0625\sigma_K^4 - \bar{l}_{y,K}^4 \right) + \beta_M \left( \bar{l}_{y,H}^4 - \bar{l}_{y,K}^4 \right) \right]; \quad (27)$$

$$B_{3W} = Fr_0^2 \frac{L}{100T} B_3; \quad B_{4W} = Fr_0^2 \frac{L}{100T} B_4; \quad B_{5W} = Fr_0^2 \frac{L}{100T} B_5; \quad (28)$$

$$B_{1\theta} = \frac{B\theta}{T} \left[ \delta_H \left( 0,25\sigma_H^2 - \bar{l}_{y,H}^2 \right) \sin \bar{q}_H \cos \bar{q}_H - \delta_K \left( 0,25\sigma_K^2 - \bar{l}_{y,K}^2 \right) \sin \bar{q}_K \cos \bar{q}_K \right]; \quad (29)$$

$$B_{2\theta} = \frac{2B\theta}{3T} \left[ \delta_H \left( 0,125\sigma_H^3 - \bar{l}_{y,H}^3 \right) \sin \bar{q}_H \cos \bar{q}_H + \delta_K \left( 0,125\sigma_K^3 - \bar{l}_{y,K}^3 \right) \sin \bar{q}_K \cos \bar{q}_K \right]. \quad (30)$$

В формулах (18)–(30) обозначено:

$\sigma_n$  – коэффициент полноты носовой половины диаметрального батокса;

$\sigma_k$  – коэффициент полноты кормовой половины диаметрального батокса;

$\bar{l}_{ц.н} = l_{ц.н} / L$  – относительная длина цилиндрической вставки в носовой половине корпуса;

$\bar{l}_{ц.к} = l_{ц.к} / L$  – относительная длина цилиндрической вставки в кормовой половине корпуса;

$\bar{q}_k, \bar{q}_n$  – средние значения курсовых углов нормалей к ватерлиниям в кормовой и носовой оконечностях корпуса;

$\delta$  – коэффициент полноты водоизмещения судна;

$B$  – расчетная ширина судна;

$\delta_k$  – коэффициент полноты водоизмещения кормовой оконечности корпуса судна;

$\delta_n$  – коэффициент полноты водоизмещения носовой оконечности корпуса судна;

$A_{\gamma_n} = \cos^2 \bar{\gamma}_n$  – коэффициент, учитывающий среднее значение снижения нормалей к поверхности обшивки относительно нормалей к ватерлиниям в носовой оконечности корпуса;

$A_{\gamma_k} = \cos^2 \bar{\gamma}_k$  – коэффициент, учитывающий среднее значение снижения нормалей к поверхности обшивки относительно нормалей к ватерлиниям в кормовой оконечности корпуса;

$A_{\gamma_ц} = \cos^2 \bar{\gamma}_ц$  – коэффициент, учитывающий среднее значение снижения нормалей к поверхности обшивки относительно нормалей к ватерлиниям в области цилиндрической вставки корпуса;

$C_{V_y}$  – коэффициент вязкостного сопротивления воды поперечному движению судна;

$Fr_0$  – число Фруда при продольном движении судна со скоростью  $V_0$ ;

$\theta$  – угол крена судна на установившейся циркуляции.

Для случая установившейся циркуляции значение угла крена может быть подсчитано по выражению [10]:

$$\theta = 22 \bar{m} Fr_0^2 \bar{\omega} e^{-1,6 \bar{\omega}}, \quad (31)$$

где  $\bar{m} = 2\delta B / L$  – безразмерная масса судна.

Из соотношений (15) и (17) получаем:

$$\begin{aligned} \bar{\kappa}_r (\beta + \bar{l}_r \bar{\omega}) - E_r \delta_r = & (\bar{B}_1 \sin \beta \cos \beta - \\ & - \bar{B}_2 \bar{\omega} \cos \beta + \bar{B}_3 \sin^2 \beta - \bar{B}_4 \bar{\omega} \sin \beta + \bar{B}_5 \bar{\omega}^2) / \bar{l}_r. \end{aligned} \quad (32)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{\kappa}_r &= E_r \kappa_r; \quad \bar{B}_1 = B_1 + B_{1\theta}; \\ \bar{B}_2 &= B_2 + B_{2\theta} + B'_2 - B''_2; \quad \bar{B}_3 = B_3 + B_{3V} + B_{3W}; \\ \bar{B}_4 &= B_4 + B_{4V} + B_{4W}; \quad \bar{B}_5 = B_5 + B_{5V} + B_{5W}. \end{aligned}$$

Очевидно, что при наличии результатов натуральных циркуляционных испытаний судна уравнение (32) с использованием метода наименьших квадратов [11] позволяет вычислить значения  $E_r$  и  $\kappa_r$ , которые характеризуют поперечную составляющую силы, развиваемой ДРК этого судна.

**Полученные результаты и выводы**

По изложенной выше методике с использованием результатов натуральных циркуляционных испытаний [12], представленных в табл. 2 и 3, были определены величины  $E_r$  и  $\kappa_r$  для двух грузовых судов внутреннего плавания проектов № 550А «Волгонефть» и № 1553 «Нефтерудовоз». Значения получились следующие:

для теплохода проекта №550А  $E_r = 0,321387$ ,  $\kappa_r = 0,464459$ ;

для теплохода проекта №1553  $E_r = 0,302801$ ,  $\kappa_r = 0,345624$ .

С целью проверки корректности вычислений были подсчитаны углы перекадки рулевых органов с использованием тех же элементов циркуляций при заданных значениях  $E_r$  и  $\kappa_r$ . Полученные результаты представлены в правых колонках табл. 2 и 3.

*Таблица 2*

**Результаты натуральных циркуляционных испытаний теплохода проекта № 550А «Волгонефть»**

Угол перекадки рулевого органа, град. (эксперимент)	Радиус циркуляции по ЦМ судна, м	Угол дрейфа судна по ЦМ, град.	Угол перекадки рулевого органа, град. (расчёт)
5,0	405	13,5	5,2
10,0	275	17,0	9,9
15,0	215	19,5	14,6
20,0	175	22,0	20,1
25,0	150	23,5	25,4
30,0	135	25,5	29,8
38,0	115	27,5	38,0

*Таблица 3*

**Результаты натуральных циркуляционных испытаний теплохода проекта № 1553 «Нефтерудовоз»**

Угол перекадки рулевого органа, град. (эксперимент)	Радиус циркуляции по ЦМ судна, м	Угол дрейфа судна по ЦМ, град.	Угол перекадки рулевого органа, град. (расчёт)
5,0	295	15,0	5,4
10,0	210	19,0	10,2

15,0	170	21,5	14,8
20,0	145	24,0	19,4
25,0	125	25,5	24,8
30,0	110	27,5	30,6

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчётных значений перекладок рулевых органов позволяет сделать следующие выводы:

1) предлагаемый способ определения поперечных усилий, развиваемых ДРК судна, позволяет избежать оценки коэффициентов взаимодействия в системе корпус – винт – рулевой орган;

2) данный способ применим как к рулям, установленным за открытым гребным винтом или комплексом винт – неподвижная насадка, так и к комплексам гребной винт – поворотная направляющая насадка;

3) очевидно, что величины  $E_r$  и  $K_r$ , характеризующие собой поперечную силу, развиваемую судовым движительно-рулевым комплексом, не зависят от скорости судна, а следовательно, и частоты вращения винтов.

#### Список литературы

1. Бугаев В.Г., Тунг Д.В., Домашевская Я.Р., Хиеп Ф.Ч. Численное моделирование гидродинамических характеристик винто-рулевого комплекса и поворотливости рыболовного судна //Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 62. С. 29-39. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.13>.
2. Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Маневровые качества судов с колесным движительно-рулевым комплексом //Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1 (52). С. 154-159. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.022>.
3. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Динамика судна с колесным движительно-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий //Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 139-146.
4. Ищейкин Г.Ю. Расчет усилий на движительно-рулевом комплексе при моделировании морской буксировки на примере танкера "Архангельск" //Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 4 (105). С. 73-78. DOI: 10.34046/aumsuomt105/17.
5. Горда В.В., Ванифатьев А.В., Дегтярева С.Г., Тарасев В.А. Движительно-рулевой комплекс с электроприводом для подводного аппарата //Морской вестник. 2020. № S1 (14). С. 102-103.
6. Шаринкова О.С., Аносов А.П., Новосельцев И.А. Сравнительная оценка гидродинамических характеристик руля изменяемого профиля в составе винторулевого комплекса судна ледового класса //Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2022. № 66-67. С. 49-57.
7. Долгов Д.С. Проектирование конструкции рулевого устройства морского судна как задача математического программирования //Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2019. Т. 1. № 1. С. 4.
8. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Область применимости алгоритма удержания судна с колесным движительно-рулевым комплексом на курсе //Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2019. № 60. С. 26-33.
9. Павленко, В.Г. Маневренные качества речных судов (Управляемость судов и составов) / В.Г. Павленко. – М.: Транспорт, 1979. – 184 с.
10. Тихонов, В.И. Основы теории динамической системы судно–жидкость : монография / В.И. Тихонов. – Н. Новгород : ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2007. – 262с. (монография).
11. ЩигOLEB, Б.М. Математическая обработка наблюдений / Б.М. ЩигOLEB. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 344 с.
12. Справочник маневренных характеристик судов / сост. В.И. Тихонов; под ред. Д.Ф. Бирюкова. – М.: ЦБНТИ МРФ РСФСР, 1989.– 319 с.

### References

1. Bugaev V.G., Tung D.V., Domashevskaya YA.R., Khiep F.CH. Chislennoe modelirovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik vinto-rulevogo kompleksa i povorotlivosti rybolovnogo sudna, Nauchnye problemy vodnogo transporta, 2020, no. 62, pp. 29-39.
2. Grosheva L.S., Merzlyakov V.I., Plyushchaev V.I. Manevroye kachestva sudov s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom, Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2021, no. 2-1 (52), pp. 154-159.
3. Bychkov V.YA., Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Dinamika sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom v usloviyakh vneshnikh vozdeistvii, Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2019, no. 4-2 (46), pp. 139-146.
4. Ishcheikin G.YU. Raschet usilii na dvizhitel'no-rulevom komplekse pri modelirovanii morskoi buksirovki na primere tankera "Arkhangel'sk", Ehkspluatatsiya morskogo transporta, 2022, no. 4 (105), pp 73-78.
5. Gorda V.V., Vanifat'ev A.V., Degtyareva S.G., Taraseev V.A. Dvizhitel'no-rulevoi kompleks s ehlektroprivodom dlya podvodnogo apparata, Morskoi vestnik, 2020, no. S1 (14), pp. 102-103.
6. Sharinkova O.S., Anosov A.P., Novosel'tsev I.A. Sravnitel'naya otsenka gidrodinamicheskikh kharakteristik rulya izmenyaemogo profilya v sostave vintorulevogo kompleksa sudna ledovogo klassa, Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva, 2022, no. 66-67, pp. 49-57.
7. Dolgov D.S. Proektirovanie konstruksii rulevogo ustroystva morskogo sudna kak zadacha matematicheskogo programmirovaniya, Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta, 2019, T. 1. no. 1, p. 4.
8. Bychkov V.YA., Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Oblast' primenimosti algoritma uderzhaniya sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom na kurse, Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta, 2019, no. 60, pp. 26-33.
9. Pavlenko, V.G. Manevrennye kachestva rechnykh sudov (Upravlyayemost' sudov i sostavov). M.: Transport, 1979. – 184 p.
10. Tikhonov, V.I. Osnovy teorii dinamicheskoi sistemy sudno-zhidkost' . – N. Novgorod: FGOU VPO VGAVT, 2007. – 262 p. (monografiya).
11. Shchigolev, B.M. Matematicheskaya obrabotka nablyudenii. M.: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1962. – 344 p.
12. Spravochnik maneવrennykh kharakteristik sudov / sost. V.I. Tikhonov; pod red. D.F. Biryukova. – M.: TSBNTI MRF RSFSR, 1989.– 319 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / IFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Тихонов Вадим Иванович**, д.т.н., профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, email: vitnn12@mail.ru

**Vadim I. Tikhonov**, Dr. Sci. Tech, Professor of department of Navigation and safety of navigation, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5

**Бажанкин Юрий Владимирович**, к.т.н., доцент кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, email: seaman77@mail.ru

**Yuriy V. Bazhankin**, Ph. D. in Engineering Science, associate professor of department of Navigation and safety of navigation, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5

**Осокин Игорь Михайлович**, аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный

**Igor M. Osokin**, post-graduation student of department of Navigation and safety of navigation, Volga State University of Water

университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, email: osokin.igor98@mail.ru

Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5

**Мухин Алексей Владимирович**, аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, email: mukhalex09@gmail.com

**Alexey V. Mukhin**, post-graduation student of department of Navigation and safety of navigation, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5

Статья поступила в редакцию 09.11.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.  
Received 09.11.2023; published online 20.12.2023.