

# Влияние ветро-волновых возмущений на гидродинамические характеристики корпуса судна

З. М. Абдуллаева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики  
E-mail: zmadullaeva@etu.ru

**Аннотация.** Ветро-волновые возмущения могут значительно влиять на динамику и движение судна. Например, при сильном ветре и высоких волнах судно может начать крениться и терять устойчивость. Ветер и волны могут повлиять на маневренность судна, особенно при выполнении маневровых операций, таких как повороты на заданной криволинейной траектории.

Взаимодействие корпуса судна с волновыми возмущениями представляет собой сложный физический процесс. В настоящей статье рассмотрены связи между параметрами волны и силовыми и моментными характеристиками на судне. Приведена математическая модель движения судна по заданной криволинейной траектории при неровном дне с учетом полученных зависимостей.

Полученные результаты исследования могут быть использованы при разработке математической модели для решения задач удержания курса судна на заданной траектории с учетом таких факторов как: неровное дно, мелководье и ветро-волновые возмущения.

**Ключевые слова:** ветро-волновые возмущения; гидродинамические коэффициенты; маневрирование судна

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вопросы безопасности при движении судов в условиях ветро-волновых возмущений очень важны и могут иметь серьезные последствия. Несоблюдение рекомендаций и правил может привести к авариям, потере жизней и материальных потерь. Поэтому необходимо уделять достаточное внимание способам стабилизации, которые позволяют снизить колебания и уменьшить риск переворачивания.

Постоянное воздействие на движение судна таких внешних факторов как ветер, течение, морское волнение приводит к возникновению гидроаэродинамических сил и моментов, которые образуют ветро-волновые возмущения.

Ветер и волны могут повлиять на маневренность судна, особенно при выполнении маневровых операций, таких как повороты и остановки.

Одним из способов исследования влияния ветро-волновых возмущений динамику судна является учет соотношений между параметрами волны и силовыми и моментными характеристиками в математической модели движения судна.

Мелководье приводит к увеличению возмущающих сил и момента на длинных волнах и уменьшению на коротких.

Ветро-волновые возмущения оказывают существенное влияние на все мореходные качества судна, в том числе и на его управляемость. При движении судна на попутном волнении со скоростью хода, близкой к скорости бега волн, может наступить ухудшение и даже полная потеря устойчивости на курсе с последующим разворотом судна лагом к волне.

При движении в условиях морского волнения на судно в горизонтальной плоскости действуют силы и моменты, которые вызывают отклонение от заданной траектории движения, что приводит к необходимости вносить коррективы при задании курса судна.

В данной работе разработана математическая модель, которая учитывает соотношения между параметрами волны и силовыми и моментными характеристиками движения судна. Особое внимание уделено исследованию влияния морского волнения на динамику судна при движении на попутном волнении и на горизонтальной плоскости.

Модель может быть использована для решения конкретных задач по управлению судном на мелководье по криволинейной траектории. Она также может быть полезна для прогнозирования погодных условий на море, определения оптимальных маршрутов судов и проектирования морских сооружений.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке более точных и эффективных моделей, которые будут использоваться в морской инженерии. Важно уделять достаточное внимание способам стабилизации судна, чтобы снизить колебания и уменьшить риск переворачивания в условиях ветро-волновых возмущений.

## II. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

*A. Расчетные формулы для определения влияния ветро-волновых возмущений на скорость хода и сопротивление движению судна*

В работе [1] приведена расчетная формула для определения волнового сопротивления:  $R_{wy} = C_B W_n^2$ , где  $W_n$  – скорость истинного ветра.

Коэффициент внешних возмущений  $C_B$  определяется по приближенным эмпирическим кривым, из чего следует, что расчетное значение сопротивления будет сильно отличаться от экспериментально полученных.

Для приближенной оценки дополнительного сопротивления воды  $\Delta R_{\omega}$ , вызванного действием встречных волна корпус судна при умеренных

амплитудах килевой качки, можно использовать формулу Давидсона:

$$\Delta R_{\omega} = 0.5 * \rho * C_b * B * H^2 * (1 - \cos(\theta))$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $C_b$  – коэффициент блочности судна,  $B$  – ширина судна,  $H$  – амплитуда килевой качки,  $\theta$  – угол между направлением движения судна и направлением ветра.

Эта формула позволяет оценить дополнительное сопротивление, вызванное встречными волнами, которые возникают при движении судна против направления ветра. Однако она не учитывает другие факторы, такие как влияние бокового ветра или изменение формы волн при изменении скорости и направления ветра. Поэтому для точных расчетов необходимо использовать более сложные модели и программы.

Приблизительный расчет полных потерь на ветровом волнении с учетом водоизмещения судна, а также высоты и курсового угла волны можно применив формулу В. В. Дремлюга:

$$\Delta V_w = V_0 - \left[ \frac{V_0^2 (1 + K_q) - K_q W^2}{1 + K_q} \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{K_q W}{1 + K_q} \cos q_w,$$

где  $\Delta V_w$  – потери скорости судна, вызванные ветровыми возмущениями, уз;  $V_0$  – скорость судна на тихой воде, уз;  $W$  – скорость истинного ветра, м/с;  $q_w$  – курсовой угол истинного ветра, град;  $K_q = c_x * S / 81 \xi \Omega$ ;  $c_x$  – коэффициент сопротивления ветра для соответствующего курсового угла;  $S$  – площадь проекции подводной части судна на плоскость миделя, м<sup>2</sup>;  $\xi$  – коэффициент полного сопротивления воды подводной части судна;  $\Omega$  – смоченная поверхность судна, м<sup>2</sup>.

Эта формула учитывает не только встречные волны, но и другие факторы, такие как сопротивление воздуха и трение с водой. Однако для ее применения необходимо знать точные характеристики судна и условия плавания.

Формула Б. И. Сайфуллина и Б. А. Андрианова:

$$v = v_0 - (fl + gl^2) + j\gamma_k l,$$

где  $v$  – скорость судна на волнении, уз;  $v_0$  – скорость судна на тихой воде, уз;  $f, g, j$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа судна;  $l$  – высота волны 3 %-й обеспеченности, м;  $\gamma_k$  – курсовой угол волны, град.

Эта формула учитывает только сопротивление воздуха и качение судна, не учитывая другие факторы, такие как встречные волны и трение с водой. Однако она может быть полезна для простых расчетов

Крылов А. Н. предложил формулу для определения потери скорости на волнении:

$$\Delta v_l = A^2 p l^2 c^2 + 2A p l^2 c (0.5c * \cos q_h + v_0) - A p l^2 B,$$

где  $A = (0.03 \delta L B) / D$ ;  $A = 1 - \exp(-4 \pi T / \lambda)$ ;  $\Delta v_l$  – волновая составляющая потеря скорости судна;  $p$  – плотность морской воды, м/м<sup>3</sup>;  $l$  – средняя высота волн, м;  $c$  – фазовая скорость волн, м/с;  $q_h$  – угол между направлением движения судна и направлением волнения, град;  $B$  – ширина судна, м;  $L$  – длина судна, м;

$W$  – водоизмещение судна, т;  $\lambda$  – вероятностная длина волны, соответствующая высоте волны, м.

Эта формула учитывает влияние волн на движение судна и может быть полезна при проектировании судов, работающих в условиях волнения. Однако она также не учитывает другие факторы, такие как воздействие ветра и течений.

Формула П. М. Хохлова:

$$V = V_0 - (0.745h - 0.275\varphi_h h)(1 - 1.35 * 10^{-6} W V_0), \quad (1)$$

где  $V$  – скорость судна с учетом волновых возмущений, уз;  $V_0$  – скорость судна на безвихревой воде, уз;  $h$  – высота волны 3 %-й обеспеченности, м;  $\varphi_h$  – угол между направлением движения судна и направлением волнения, рад;  $W$  – водоизмещение судна, т.

Эта формула учитывает влияние не только волнения, но и ветра на движение судна. Она может быть полезна при проектировании судов, работающих в условиях сильного ветра и волнения.

В работе [2] был проведен анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода. По результатам исследования наибольшее приближение к «истинным» имели результаты, полученные по формуле П. М. Хохлова.

В целом, использование таких расчетных формул позволяет оценить влияние ветро-волновых возмущений на движение судна и принять меры для обеспечения его безопасности и эффективности.

#### В. Силы и моменты ветро-волновой природы действующие на судно

Силы и моменты ветро-волновой природы, действующие на судно, зависят от характеристик волнения, скорости и направления ветра, формы судна и его скорости. Они могут оказывать существенное влияние на движение судна в волнении и требуют учета при проектировании и эксплуатации судов.

По результатам испытания судов в натуральных условиях и их моделей в бассейне в работе [4] приведена методика определения сил и моментов:

$$X_w = C_x^w (0.1 - \cos q_w) \rho g L \left( \frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \left( 1 + A_1 \frac{V_n}{V_w} \right);$$

$$Y_w = C_y^w \sin q_w \rho g L \left( \frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \left( 1 + A_1 \frac{V_n}{V_w} \right);$$

$$M_w = C_m^w \frac{\sin(2q_w)}{1 + \frac{\pi - |q_w|}{\pi}} \rho g L^2 \left( \frac{h_{3\%}}{2} \right)^2 e^{-A_0 \frac{\lambda}{L}} \left( 1 + A_1 \frac{V_n}{V_w} \right),$$

$$C_x^w = 0,062 \frac{B}{T} - 0,0085 \frac{L}{T} + 0,328 \delta_v;$$

$$C_y^w = 0,0823 \frac{L}{B} + 2,56 \frac{T}{L} + 0,903 \delta_v^2;$$

$$C_m^w = 0,15 \delta_v + 0,197 \delta_v^2 - 0,00373 \frac{L}{T},$$

где  $X_w, Y_w, M_w$  – силы и моменты, возникающие при действии на судно регулярного волнения;  $C_x^w, C_y^w, C_m^w$  – безразмерные коэффициенты волновых сил и моментов;  $B$  – ширина судна;  $T$  – осадка судна;  $L$  – длина судна по миделю;  $\delta_v$  – коэффициент общей полноты судна;  $q_w$  – курсовой угол волны;  $g$  – ускорение свободного падения;  $A_0$  – эмпирический коэффициент, учитывающий соотношение длины волны и судна (рекомендуется принимать  $A_0=0,33$ );  $\lambda$  – длина волны;

$A_1$  – эмпирический коэффициент, учитывающий степень влияния скорости движения судна на силы от волнения  $A_1 \in [1,0; 8,5]$ ;  $V_n$  – составляющая скорости движения судна, направленная вдоль направления бега волн;  $V_w$  – скорость бега волн.

Полученные зависимости позволяют с достаточной точностью определить как характер, так и численные значения средних (постоянных) составляющих сил и момента зависящие от сил волнового дрейфа.

### С. Математические модели с учетом ветро-волновых возмущений

Математические модели с учетом ветро-волновых возмущений используются для описания движения жидкости под воздействием внешних сил, таких как ветер и волны. Они также могут быть использованы для определения оптимальных маршрутов судов, чтобы избежать сильных ветров и волн. Модели могут быть использованы для проектирования морских сооружений, чтобы учитывать влияние ветра и волн на их поведение.

Для моделирования ветровых возмущений используются данные о скорости и направлении ветра. Эти данные могут быть получены с помощью метеорологических станций или спутниковых систем. В моделях учитывается влияние ветра на поверхность моря и на движение жидкости.

Для моделирования волновых возмущений используются уравнения гидродинамики, которые описывают распространение волн на поверхности моря. В моделях учитывается влияние волн на движение жидкости и на поведение судов и других морских сооружений.

В работе [3] приведена математическая модель движения судна с учетом ветра, как наиболее значимого фактора, влияющего на управляемость судна:

$$\begin{aligned} -C_{x_r}(\eta) - \varphi_a(\bar{v}_a^2 + 1 + 2\bar{v}_a \cos \aleph)C_{x_a}(\aleph, \bar{v}_a) + \\ + \varphi_p(1 - t)\sigma_\varepsilon(\delta, \eta, \bar{v}) = 0; \\ \varphi_p k_p \sigma_y(\delta, \eta, \bar{v}) + C_{y_a}(\aleph, \bar{v}_a)\varphi_a(\bar{v}_a^2 + 1 + 2\bar{v}_a \cos \aleph) + \\ + C_{y_r}(\eta) = 0; \\ C_{m_a}(\aleph, \bar{v}_a)\varphi_a(\bar{v}_a^2 + 1 + 2\cos \aleph \bar{v}_a) + C_{m_r}(\alpha) + \\ + \varphi_p c_p c_\varepsilon l \sigma_y(\delta, \eta, \bar{v}) = 0, \end{aligned}$$

где  $C_{x_r}, C_{y_r}, C_{m_r}$  – безразмерные коэффициенты гидродинамических сил и моментов;  $C_{x_a}, C_{y_a}, C_{m_a}$  – безразмерные коэффициенты аэродинамики сил и моментов;  $C_{y_r}, C_{m_r}$  – зависят от угла дрейфа  $\alpha$ ;  $C_{y_a}, C_{m_a}$  – от угла ветра  $\varphi$ ; безразмерные коэффициенты по нагрузке  $\sigma_y$  и по тяге  $\sigma_\varepsilon$ , зависящие от угла перекладки руля  $\delta$ , угла дрейфа  $\eta$  и падения скорости судна  $\bar{v}$ ;  $c_\varepsilon$  – коэффициент смещения точки приложения поперечной силы движительно-рулевого комплекса при его работе за корпусом;  $c_p$  – коэффициент «поперечного засасывания»;  $l$  – относительное отстояние комплекса от центра тяжести судна;  $\bar{v}_a$  – скорость ветра;  $\aleph$  – угол курса по отношению к направлению ветра в районе плавания.

Данная система уравнений при любых заданных значениях параметров ветра, т.е. при заданной скорости ветра в районе плавания  $\bar{v}_a$  и известном курсе судна по отношению к ветру  $\aleph$ , может быть разрешена относительно следующих неизвестных: поперечной силы движительно-рулевого комплекса  $\sigma_y$  или угла перекладки руля  $\beta$ ; образующегося у судна угла дрейфа; потери скорости судна.

В работе [1] предложил следующую систему уравнений, учитывающий влияние ветра на динамику судна:

$$\begin{aligned} c_2 \beta_0^2 + \left( c_1 + \mu \aleph \varphi_1^2 \frac{S_\Pi}{F_D} \right) \beta_0 - C_{y_a} \left( \frac{v_k}{v_0} \right)^2 \frac{\rho_1 Q}{\rho F_D} - \\ - \mu \varphi_1^2 \frac{S_\Pi}{F_D} \alpha_p = 0; \\ \left( q_\Pi - \mu \varepsilon \aleph \varphi_1^2 \frac{S_\Pi}{F_D} \right) \beta_0 + \mu \varepsilon \varphi_1^2 \frac{S_\Pi}{F_D} \alpha_p - C_{m_a} \left( \frac{v_k}{v_0} \right)^2 \frac{\rho_1 Q}{\rho F_D} = 0 \end{aligned}$$

где  $\beta_0$  – угол дрейфа;  $F_D$  – площадь погруженной части диаметральной плоскости корабля;  $Q$  – площадь парусности надводной части корабля;  $\rho_1$  – массовая плотность воздуха ( $\rho_1 = 0,125 \text{ кг.сек}^2/\text{м}^4$ );  $C_{y_a}$  – коэффициент учета силы давления кажущегося ветра на движение судна;  $C_{m_a}$  – коэффициент аэродинамического момента, вызванный силами давления кажущегося ветра;  $c_1, c_2$  – коэффициенты боковой силы, действующей на судно;  $\mu$  – производная коэффициента подъемной силы руля;  $\aleph$  – приведенный коэффициент влияния корпуса и винта на руль;  $\varphi_1$  – коэффициент влияния корпуса на руль;  $S_\Pi$  – приведенная площадь рулей;  $q_\Pi$  – коэффициент позиционного момента;  $\varepsilon$  – относительное отстояние оси баллера от мидель-шпангоута судна;  $\alpha_p$  – угол перекладки руля;  $v_k$  – кажущаяся скорость ветра;  $v_0$  – исходная скорость хода судна.

Данная математическая модель позволяет вычислить угол дрейфа, возникающий под действием ветра и средний угол перекладки руля необходимый для обеспечения прямолинейного движения судна.

### III. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА С УЧЕТОМ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ЗАДАННОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Для создания математической модели движения судна с учетом ветра необходимо учитывать следующие факторы:

1. Величину и направление ветра. Это позволит определить силу и направление силы, действующей на судно со стороны ветра.
2. Геометрические параметры судна. Размеры, форма и масса судна определяют его управляемость и способность справляться с воздействием ветра.
3. Характеристики движителя. Мощность и эффективность двигателя также влияют на управляемость и скорость судна.
4. Состояние морской поверхности. Высота и частота волн, направление течения и другие параметры могут оказывать влияние на движение судна.

Используя эти данные, можно создать математическую модель, которая позволит прогнозировать движение судна в условиях ветро-волновых возмущений. Это позволит экипажу принимать более информированные решения, связанные с управлением судном, и уменьшить риск аварийных ситуаций.

Таким образом, анализ данных об условиях ветра и волнения, состоянии груза, экипажа и техническом состоянии судна может значительно повысить

безопасность и эффективность плавания, а также сократить расходы на топливо и время в пути.

В работе [6] приведена математическая модель движения судна без учета ветро-волновых возмущений, т.е. предполагают, что движение окружающей судно воды зависит только от движения судна. Так же математическая модель построена без учета влияния крена и дифферента на величину гидродинамических сил и моментов, действующих на судно:

$$\begin{aligned} -m_{22}\dot{\beta} + m_{26}\dot{\omega}_z + m_{11}\omega &= n_y; \\ m_{66}\dot{\omega}_z - m_{26}\dot{\beta} &= m_z; \\ \dot{v}/\bar{v} + \beta(m_{22}\omega/m_{11} - \dot{\beta}) &= (n_p - n_x)/m_{11}, \end{aligned}$$

где  $m_{11}, m_{22}, m_{26}, m_{66}$  – безразмерные гидродинамические коэффициенты;  $n_p$  – безразмерный коэффициент тяги движителей;  $n_y, m_z$  – безразмерные коэффициенты, характеризующие продольную и поперечную силы;  $n_x$  – безразмерный коэффициент сопротивления движению судна;  $\beta$  – угол дрейфа;  $\bar{v}$  – линейная (приведенная) скорость судна.

С учетом правила знаков (рис. 1), коэффициенты  $n_y$  и  $m_z$  примут вид:

$$\begin{aligned} n_y &= n_y^\beta \beta + n_y^\omega \omega - n_y^\delta \delta [\delta - (\bar{\aleph}_\beta \beta - \bar{\aleph}_\omega \bar{l}_p \omega)] + \\ &+ \sum_B n_{yB}^\beta (\aleph_{\beta B} \beta + \aleph_{\omega B} \bar{l}_B \omega); \\ m_z &= m_z^\beta \beta + m_z^\omega \omega + n_y^\delta \delta \bar{l}_p [\delta - (\bar{\aleph}_\beta \beta - \bar{\aleph}_\omega \bar{l}_p \omega)] + \\ &+ \sum_B n_{yB}^\beta \bar{l}_B (\aleph_{\beta B} \beta + \aleph_{\omega B} \bar{l}_B \omega), \end{aligned}$$

где  $l_p$  – отстояние баллра руля от центра тяжести судна;  $l_b$  – отстояние диска винта от центра тяжести судна;  $\bar{\aleph}_\beta$  – поправка, учитывающая справляющее действие корпуса на скос у руля, обусловленный углом дрейфа;  $\bar{\aleph}_\omega$  – поправка, учитывающая справляющее действие корпуса на скос у руля, обусловленный кривизной траектории;  $\aleph_{\beta B}$  – поправка, учитывающая спрямляющее действие корпуса на скос у винта от угла дрейфа;  $\aleph_{\omega B}$  – поправка, учитывающая спрямляющее действие корпуса на скос у винта от кривизны траектории.

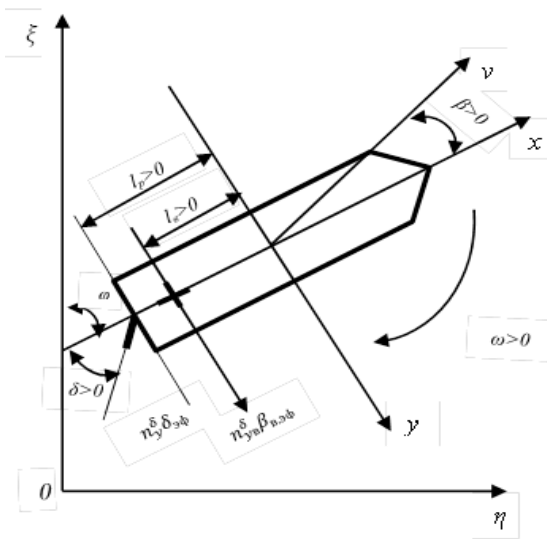


Рис. 1. Правила знаков и обозначения в уравнениях движения судна

Согласно [5] расчетные формулы для определения сил и момента, вызванные действием регулярного волнения на судно, имеют вид:

$$n_{yB} = \bar{\sigma}_B \bar{r}_B \sin \varphi (N_1 \sin \bar{\sigma} s + N_2 \cos \bar{\sigma} s); \quad (2)$$

$$m_{zB} = \bar{\sigma}_B \bar{r}_B \sin \varphi (M_1 \sin \bar{\sigma} s + M_2 \cos \bar{\sigma} s), \quad (3)$$

$$N_1 = -m_{11} \bar{\sigma}_B f_1(\mu) + n_y^\beta (1 - 2\bar{\sigma}_B/\pi\mu) \sin(\pi\mu/2);$$

$$N_2 = n_y^\beta \cos(\pi\mu/2); \quad M_1 = m_z^\beta \sin(\pi\mu/2);$$

$$\begin{aligned} M_2 &= -m_{11} \bar{\sigma}_B f_2(\mu) + \\ &+ m_z^\beta [(4\bar{\sigma}_B/\mu^2 \pi_2) \sin(\pi\mu/2) \\ &+ (1 - 2\bar{\sigma}_B/\pi\mu) \cos(\pi\mu/2)] \end{aligned}$$

где  $\bar{\sigma}_B$  – безразмерная частота волны;  $\bar{\sigma}$  – безразмерная кажущаяся частота волны;  $\bar{r}_B$  – амплитуда волны;  $s$  – безразмерное время ( $vt/L$ )  $\mu$  – относительная длина волны.

Тогда математическая модель движения судна, принимая во внимание уравнение (2) и (3) примет вид:

$$m_{22}\dot{\beta} + m_{26}\dot{\omega} - n_{yB}^\beta \beta + (m_{11} - n_{yB}^\omega)\omega = -n_y^\delta \delta; \quad (4)$$

$$m_{66}\dot{\omega} - m_{26}\dot{\beta} - m_z^\beta \beta - m_z^\omega \omega = n_y^\delta \delta \bar{l}_p; \quad (5)$$

$$\dot{v}/\bar{v} + \beta(m_{22}\omega/m_{11} - \dot{\beta}) = (n_p - n_x)/m_{11}. \quad (6)$$

На управляемость судна сильное влияние оказывает такие возмущающие воздействия как мелководье, неровное дно, ветер и волны [6]. Эти возмущения вызывает рост сопротивления движению судна и уменьшение скорости.

В неподвижной системе координат, местоположение судна могут быть определены по следующим выражениям [6]:

$$x_{цт} = x_0 + \int_0^t V \sin K_{ГК} dt + V_T \sin K_T t; \quad (7)$$

$$y_{цт} = y_0 + \int_0^t V \cos K_{ГК} dt + V_T \cos K_T t; \quad (8)$$

$$K_{ГК} = K_{ГК0} + \int_0^t \omega dt. \quad (9)$$

где  $x_0$  – начальное значение абсциссы центра тяжести судна;  $y_0$  – начальное значение ординаты центра тяжести судна;  $x_{цт}$  – абсцисса центра тяжести судна;  $y_{цт}$  – ордината центра тяжести судна;  $K_{ГК0}$  – начальное значение истинного курса судна.

При составлении модели движения судна согласно [5] предположим что,  $V_T = 0$  (при  $t \leq 0$ );  $V_T = \text{const}$ ,  $K_T = \text{const}$  (при  $t > 0$ ), где  $V_T$  – скорость течения,  $K_T$  – курс течения. А для определения скорости с учетом ветро-волновых возмущений используем формулу П. М. Хохлова (1).

Для управления судном по криволинейной траектории необходимо иметь значение бокового смещения судна  $l_{см}$  и отклонение от заданного курса  $\Delta K$ . Согласно [6] и рис. 2

$$l_{см} = \sqrt{(x_{цт} - x)^2 + (y_{цт} - y)^2};$$

$$\Delta K = \pi/2 - K_{ГК} - \alpha,$$

где  $\alpha$  – заданное направление судна;  $x_{цт}$  – абсцисса центра тяжести судна;

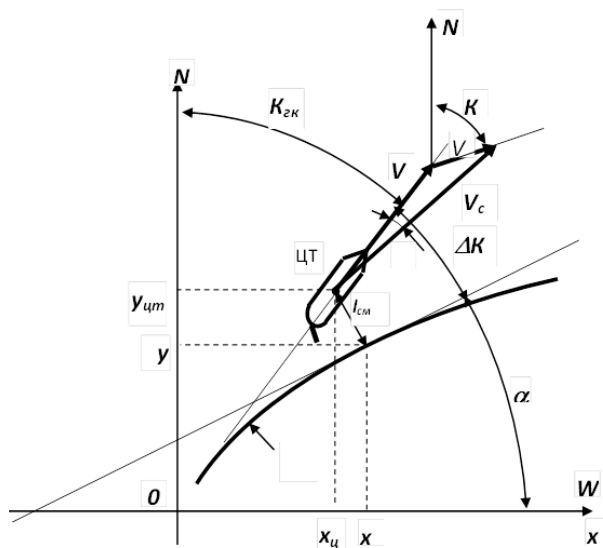


Рис. 2. Возникающие при движении судна по криволинейной траектории, геометрические соотношения

$y_{цт}$  – ордината центра тяжести судна;  $x$ ,  $y$  – соответственно абсцисса и ордината точки пересечения нормали, опущенной из центра тяжести судна с заданной траекторией движения судна.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были рассмотрены основные принципы математических моделей с учетом ветро-волновых возмущений и их применение в морской инженерии. Были проанализированы существующие способы учета ветро-волновых возмущений при расчете сопротивления судна и приведены расчетные формулы для определения действия регулярного волнения на силы и моменты.

На основе проведенных исследований была разработана математическая модель, которая может быть использована для решения конкретных задач по управлению судном на мелководье по криволинейной траектории. Результаты данной работы будут представлены в следующих исследованиях.

Использование математических моделей с учетом ветро-волновых возмущений является важным инструментом для прогнозирования погодных условий на море, определения оптимальных маршрутов судов и проектирования морских сооружений. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке более точных и эффективных моделей, которые будут использоваться в морской инженерии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Войткунский Я.И. Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Судовые двигатели и управляемость. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1973. 512 с.
- [2] Бояринов А.М., Ершов С.М. Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2017. № 6 (9). С.1168-1174.
- [3] Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания. Л.: Судостроение, 1971.182 с.
- [4] Юркaнский А.В. Исследование управляемости судов в условиях ветра и волнения: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.01:утв. 06.03.2006 СПб., 2006. 118 с.
- [5] Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения: Учебник для вузов. Л.: Судостроение. 1976. 479 с.
- [6] Абдуллаева З.М. Моделирование движения судна на мелководье по заданной траектории при переменной глубине // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2017. № 3 (44). С.93-102.