

## Раздел 2 СУДОВОЖДЕНИЕ, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.618.1 [629.5.018.712:517.958]

DOI: 10.34046/aumsuomt99/11

### УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОГО СУДНА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

*Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор*

*Г.Ю. Ищейкин, аспирант*

В данной статье представлена математическая модель буксирной системы (буксирующее судно-буксирный трос-буксируемое судно), которая использована для исследования курсовой устойчивости буксирного судна в условиях ветровой нагрузки. Оценка курсовой устойчивости буксирного судна выполнялась методом численного моделирования при различных значениях курсового угла ветра и его скоростях. Кроме того, варьировались значения скорости буксировки, длины буксирного троса и его натяжения с использованием буксирной лебёдки, установленной на буксирующем судне в пределах значений её тяговых усилий. Исследование курсовой устойчивости буксирного судна выполнялось с использованием линейного анализа, при заданном направлении движения буксирного судна. Динамические свойства буксирного судна в представленной модели движения буксирной системы не рассматривались. Буксирный трос рассматривается как жёсткий стержень заданной длины, шарнирно закреплённый на буксирующем и буксируемом судне. Результаты симуляций движения буксирной системы в условиях ветровой нагрузки позволили выявить наиболее опасные с точки зрения безопасности выполнения буксирной операции сочетания следующих факторов: скорость и направление ветра, скорость буксировки, длину буксирного троса и его натяжение. Симуляция движения буксирной системы в условиях ветровой нагрузки позволяет оценить не только курсовую устойчивость буксирного судна, но и оценить вероятность обрыва буксирного троса при его чрезмерных колебательных движениях, вызванных ветровым воздействием.

**Ключевые слова:** буксировка, буксируемое судно, управляемость, ветровая нагрузка.

### STABILITY OF THE TOWED VESSEL MOVEMENT UNDER WIND LOAD CONDITIONS

*Yu. I. Yudin, G. Y. Ishcheikin*

This article presents a mathematical model of a towing system (towing vessel-towing cable-towed vessel), which was used to study the directional stability of a towed vessel under wind load conditions. Evaluation of the directional stability of the towed vessel was carried out by the method of numerical simulation at various values of the directional wind angle and its speeds. In addition, the values of the towing speed, the length of the towing cable and its tension were varied using a towing winch installed on the towing vessel within the values of its pulling forces. The study of directional stability of the towed vessel was carried out using linear analysis, for a given direction of movement of the towing vessel. The dynamic properties of the towing vessel were not considered in the presented model of the towing system movement. A tow rope is considered as a rigid rod of a given length, pivotally attached to the towing and towed vessel. The results of simulations of the towing system movement under wind load conditions revealed the most dangerous combinations of the following factors from the point of view of the safety of the towing operation: wind speed and direction, towing speed, tow rope length and tension. Simulation of the towing system movement under wind load conditions allows not only to assess the directional stability of the towed vessel, but also to assess the probability of the towing rope breaking in case of its excessive oscillatory movements caused by wind action.

**Key words:** towing, towed vessel, controllability, wind load.

#### 1. Введение

Курсовая устойчивость движения буксирной системы имеет существенное значение в любых условиях, включая условия, при которых по маршруту выполнения буксирной операции присутствуют внешние факторы, влияющие на характер движения судна. Одним из таких факторов является ветер, который как известно существенно влияет на управляемость судна, что весьма заметно проявляется при определённом соотношении его скорости и скорости судна и направления

по отношению к курсу судна. Ряд закономерностей от такого воздействия достаточно исследованы и изучены, о чём свидетельствуют материалы, опубликованные в работах [1] [4], [14] [15] и др. Структурные особенности буксирной системы создают особенности её поведения в условиях внешнего силового воздействия, включая, прежде всего, ветровое воздействие. Это фактор требует проведения отдельного исследования для оценки курсовой устойчивости движения буксирной системы в целом и буксирного судна в частности.

Буксирующее судно и буксируемое судно по-разному реагируют на воздействие ветра из-за ряда причин, конечно, прежде всего это различные размерные характеристики и архитектура надводной части корпуса судна. Немаловажное значение в данном случае имеет и положение точки приложения одного из основных усилий, действующих на корпус судна и во многом определяющих характер его движения, а именно усилия, действующего со стороны буксирного троса. Для более глубокого понимания курсовой устойчивости буксирной системы при рассматриваемом здесь внешнем воздействии требуется надежное исследование с использованием теоретического или экспериментального подхода.

В последние годы в нескольких исследованиях курсовой устойчивости буксирной системы в условиях ветровой нагрузки оценивались параметры движения буксируемого судна при различных скоростях и направлениях ветра по отношению к курсу буксировки. Авторы работы [15] провели линейный анализ и обнаружили, что при изменении угла ветра с встречного на попутный, курсовая устойчивость буксирной системы имела тенденцию к нестабильности. Кроме того, авторы работы [14] полагаясь на результаты выполненных ими экспериментов утверждают, что курсовая устойчивость буксируемого судна, как правило, нестабильна при курсовых углах ветра в диапазоне от траверзного до кормового ветра. В работе [19], используя физическую модель судна, авторы провели серию испытаний, результаты которых свидетельствуют о том, что курсовая устойчивость изначально неустойчивого на курсе буксируемого судна (баржа) несколько улучшалась при курсовых углах ветра в диапазоне от траверзного до встречного. Однако эти исследования проводились при отсутствии буксирующего судна, т.е. движение буксирующего судна предполагалось заданным.

Исследования, результаты которых представлены в данной статье, проводились с использованием нелинейной математической модели судна с учётом ветрового воздействия. Данная модель – это модель в перемещениях, т.к. предполагалось заранее, что значения угла дрейфа и поперечных смещений могут не находиться в рамках допустимых значений, которые позволяют использовать в исследованиях упрощённую модель, представленную в предыдущей работе автора [9]. Необходимо отметить, что нелинейная модель буксирной системы, в которой буксирный трос представлен в виде 2D системы с распределёнными массами [12] нами не использовалась из-за

отсутствия убедительных доказательств её преимуществ по отношению к классической модели, в которой буксирный трос представлен в виде жесткого стержня. Более того, авторы работ [17], [19], [18], предлагая 2D модель буксирного троса не обременяют себя доказательствами её преимуществ, а также, после подробных описаний указанной модели, линеаризируют полученную модель до уровня модели с буксирным тросом в виде жесткого стержня.

В данной работе преследуется цель оценить не только влияние направления и скорости ветра на устойчивость движения буксируемого судна, но и дать оценку влияния других факторов на курсовую устойчивость буксируемого судна и, как следствие, представить рекомендации по снижению степени влияния на неё ветра. Направление проводимых исследований предполагает их дальнейшее продолжение. Ожидается, что представленный численный подход снизит экспериментальные затраты, даже несмотря на то, что проверка модельных испытаний все ещё рекомендуется.

## 2. Математические основы исследования

### 2.1 Системы координат

Системы координат показаны на рисунке 1.  $O-X_0Y_0$  – неподвижная система координат, фиксированная на плоскости и  $G-xuz$  – подвижная система координат, связанная с судном.

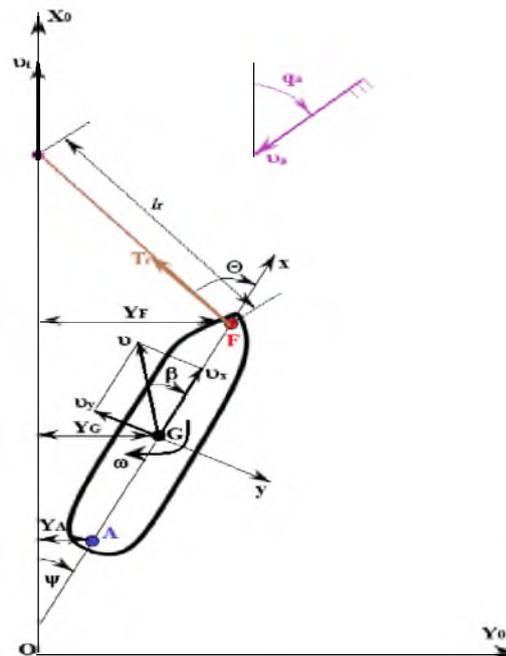


Рисунок 1 - Системы координат

### 2.2 Математическая модель

Движение буксируемого судна в процессе его буксировки в условиях ветровой нагрузки может происходить при относительно больших углах дрейфа  $\beta$  (рисунк 1).

Учитывая это обстоятельство, для выполнения исследований была выбрана математическая модель судна в перемещениях, разработанная и предложенная А. П. Тумашиком [2], [3]. Справедливости ради, следует отметить, что существуют и другие математические модели подобного типа, широко используемые зарубежными исследователями [14], [16]. Но выбранная нами модель достаточно хорошо зарекомендовала себя при проведении ряда исследований, которые мы проводили ранее [6], [7], [11]. Более того, структурно все упомянутые модели, включая модель, разработанную А.П. Тумашиком, принципиально не отличаются, расхождения обусловлены способами определения гидродинамических характеристик составляющих гидродинамической силы и её момента, приложенных к корпусу судна. Общий вид рассматриваемой модели представлен системой уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} - (m + \lambda_{22}) v_y \omega &= X \\ (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + (m + \lambda_{11}) v_x \omega &= Y \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} &= M_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $m$ ,  $I_z$  - масса и момент инерции массы судна;  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{22}$ ,  $\lambda_{66}$  - присоединённые массы при продольном и поперечном движении судна и присоединённый момент инерции при вращательном движении судна;  $v_x$ ,  $v_y$  - продольная и поперечная составляющие линейной скорости судна  $v$ ;  $\omega$  - угловая скорость судна.

В правые части уравнений системы (1) входят следующие силы и моменты:

$$X = X_H + X_R + X_A + X_T \quad (2)$$

$$Y = Y_H + Y_R + Y_A + Y_T \quad (3)$$

$$M_z = M_H + M_R + M_A + M_T \quad (4)$$

в уравнениях (2) – (4) переменные с индексом «Н» представляют составляющие гидродинамической силы и её момента, возникающие на корпусе бук-

сируемого судна, составляющие гидродинамической силы на руле с индексом «R», силы и моменты с индексом «A» - составляющие аэродинамической силы и момента, переменные представляющие буксирный трос обозначены индексом «Т».

Из рисунка 1, очевидно, что

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$\beta = \begin{cases} \arccos\left(\frac{v_x}{v}\right), & \text{если } v_y < 0 \\ -\arccos\left(\frac{v_x}{v}\right), & \text{если } v_y > 0 \end{cases}$$

### 2.2.1 Гидродинамические силы на корпусе

Гидродинамические усилия на корпусе буксируемого судна представлены известными зависимостями:

$$\begin{aligned} X_H &= C_{xH} 0.5 \rho F_{dp} v^2 \\ Y_H &= C_{yH} 0.5 \rho F_{dp} v^2 \\ M_H &= C_{mH} 0.5 \rho F_{dp} L_{bp} \end{aligned} \quad (5)$$

В выражения (5) входят гидродинамические коэффициенты  $C_{xH}$ ,  $C_{yH}$ ,  $C_{mH}$ ,  $C_{m0}$ ,  $C_{m\omega}$ , определяемые известными способами, краткое изложение которых представлено ниже. Кроме того, в указанные выражения входят известные параметры [2]:

- приведённая площадь погруженной части диаметрального батокса

$$F_{dp} = \sigma_{dp} L_{bp} d$$

$$\sigma_{dp} = 0.962 + \frac{0.054 L_{bp}}{d} \times \tau$$

$$\tau = \frac{d_a - d_f}{L_{bp}}$$

$$d = (d_a + d_f) / 2$$

- обобщенная угловая скорость

$$\Omega = \frac{L_{bp} \omega}{\sqrt{v^2 + (L_{bp} \omega)^2}}$$

где  $L_{bp}$  - длина между перпендикулярами;  $d_f$ ,  $d_a$  - осадки носом и кормой, соответственно

Гидродинамические характеристики корпуса танкера, входящие в выражения (5) рассчитываются в следующей последовательности [2]:

$$C_{xH} = -0.075 \times \sin \left[ (\pi - \varphi) \times \left( 1 - \text{Abs} \left( \frac{\beta^\circ}{\beta_x} \right) \right) \right] \quad (6)$$

$\beta_x$  - значение угла дрейфа  $\beta$ , при котором  $C_{xH} = 0$ ;  $\varphi = \arcsin \left[ \frac{C_{xH0}}{0.075} \right]$ ;  $C_{xH0} = \frac{R}{0.5 \rho v^2 F_{dp}}$ ;  $R$  - сопротивление движению судна при угле дрейфа  $\beta = 0$ .

$$C_{yH} = 0.5 C_{y\beta} \sin(2\beta) \times \cos(\beta) + c_2 \sin^2(\beta) + c_3 \sin^4(2\beta) \quad (7)$$

$$C_{mH} = C_{m\beta} - C_{m0} \left( \frac{L_{bp}}{v} \right)^2 |\omega| \omega - C_{m\omega} \frac{1}{\pi} \left[ 1 + \left( \frac{L_{bp}}{v} \right)^2 \right] \omega^2 \times \sin(\pi \Omega) \quad (8)$$

$$C_{m\beta} = m_1 \sin(2\beta) + m_2 \sin(\beta) + m_3 \sin^3(2\beta) + m_4 \sin^4(2\beta)$$

$$C_{m0} = 0.059c_2$$

$$C_{m\omega} = C_{m\omega}^\omega + n_1 |\sin(\beta)| + n_2 \{1 - \cos[(2\pi - 4 \times |\beta|) \cos(\beta) + 0.1 \times |\sin(2\beta)|]\}$$

$$C_{m\omega}^\omega = \left[ 0.739 + 8.7 \left( \frac{d}{L_{bp}} \right) \right] \times (1.611\sigma_{dp}^2 - 2.873\sigma_{dp} + 1.33)$$

$$n_1 = 0.09 - C_{m\omega}^\omega - 0.0033 \left( \frac{L_{bp}}{B} - 7.0 \right) - 20 \left( \frac{d}{L_{bp}} - 0.005 \right)^2 + 0.4(\sigma_{dp} - 0.9) + 0.05(C_m - 0.9)$$

$$n_2 = 0.008 \frac{L_{bp}}{B} + 0.9 \left( \frac{d}{L_{bp}} - 0.05 \right) + 0.45(\sigma_{dp} - 0.955).$$

Способы расчёта коэффициентов, входящих в уравнения (7), (8) достаточно подробно изложен в справочнике [2].  $C_m$  – коэффициент полноты площади погруженной части мидель-шпангоута.

### 2.2.2 Усилия на руле

При выполнении буксирной операции перо руля и гребной винт на буксируемом судне неактивны, тем не менее перо руля подвержено воздействию встречного потока, так как угол его атаки  $\alpha \neq 0$ . Таким образом перо руля в некоторой степени стабилизирует процесс движения буксируемого судна, что нельзя не учитывать в симуляции этого движения. На перо руля действует гидродинамическая сила, имеющая две составляющих и, как следствие, момент:

$$X_R = C_{xR} 0.5 \rho v^2 F_R \quad (9)$$

$$Y_R = C_{yR} 0.5 \rho v^2 F_R \quad (10)$$

$$M_R = Y_R x_R \quad (11)$$

$F_R$  – площадь пера руля;  $x_R$  – отстояние пера руля от ЦТ судна.

Величину продольной составляющей гидродинамической силы на руле можно определить, воспользовавшись формулой, предложенной К.К. Федяевским

$$C_{xR} = C_{xR0} + k_\lambda \sin^2 \alpha + 2 \sin^3 \alpha$$

где  $C_{xR0}$  – коэффициент продольной составляющей силы на руле при нулевом угле атаки

$$\alpha = 0, \text{ вычисляемый по формуле}$$

$$C_{xR0} = (0.0221 - 0.0023 \lg R_e) c_x$$

где  $k_\lambda$  – коэффициент, определяющий зависимость продольной силы на руле от удлинения руля  $\lambda_R [= h_R^2 / F_R]$  ( $h_R$  – высота пера руля), для его определения автором настоящей статьи получена следующая расчетная формула

$$k_\lambda = 0.65 \sqrt{\lambda_R} - 0.04 \lambda_R;$$

$R_e [= vL/\nu]$  – число Рейнольдса ( $\nu$  – кинематическая вязкость воды),

$c_x$  – коэффициент, учитывающий телесность пера руля

$$c_x = 4.96\bar{t} + 0.76$$

где  $\bar{t}$  – относительная толщина профиля пера руля (отношение наибольшей толщины профиля пера руля к длине его хорды). Так как на испытуемом судне установлено перо руля с профилем NASA 0018, примем  $\bar{t} = 0.18$ .

Поперечная составляющая рассчитывается следующим образом

$$C_{yR} = C_{yR}^\alpha \sin \alpha$$

$$C_{yR}^\alpha = 0.82 + (C_{yRu}^\alpha - 0.82)$$

$C_{yRu}^\alpha$  – коэффициент поперечной составляющей гидродинамической силы, образующейся на изолированном руле. Для руля рассматриваемого типа, получим зависимость [2]:

$$C_{yRu}^\alpha = 0.0002\alpha^2 + 0.0049\alpha - 0.0079$$

Учитывая влияние корпуса судна на работу руля ( $\kappa$  – коэффициент влияния корпуса на работу руля)

$$\alpha = -\kappa \beta_R$$

$$\kappa = 0.5 \times [1 + \kappa_0 - (1 - \kappa_0) \times \cos(2\beta_R)]$$

$\kappa_0 = 1.0$  (с учётом конструкции кормовой части балкера).

Угол дрейфа в районе расположения пера руля  $\beta_R$

$$\beta_R = \begin{cases} \arccos \frac{v_x}{v_R}, & \text{если } v_y + x_R \omega < 0 \\ -\arccos \frac{v_x}{v_R}, & \text{если } v_y + x_R \omega > 0 \end{cases}$$

Скорость потока, набегającego на перо руля

$$v_R = \sqrt{v_x^2 + (v_y + x_R \omega)^2}$$

### 2.2.3 Аэродинамические усилия на корпусе

Аэродинамические усилия рассчитываются с использованием результатов модельных экспериментов, выполненных Ишервудом [13] с

учётom постоянного изменения значений курсового угла кажущегося ветра  $q_R$  в процессе движения буксируемого судна. Составляющие аэродинамической нагрузки и аэродинамический момент определяются по формулам:

$$\begin{aligned} X_A &= C_{xA} 0.5 \rho_a v_R^2 S_m \\ Y_A &= C_{yA} 0.5 \rho_a v_R^2 S_{dp} \\ M_A &= C_{mA} 0.5 \rho_a v_R^2 S_{dp} L_{bp} \end{aligned} \quad (12)$$

где  $C_{xA}$ ,  $C_{yA}$ ,  $C_{mA}$  – аэродинамические коэффициенты;  $\rho_a$  – массовая плотность воздуха;  $v_R$  – скорость кажущегося ветра;  $S_{dp}$  – площадь проекции надводной части корпуса на диаметральную плоскость (ДП);  $S_m$  – площадь проекции надводной части корпуса на плоскость мидель шпангоута;  $L_{bp}$  – длина судна между перпендикулярами.

Параметры кажущегося ветра: курсовой угол  $q_R$  и скорость  $v_R$ , определяются следующим образом:

$$v_R = \sqrt{v_a^2 + v^2 + 2v_a v \cos(q_a - \psi + \beta)}$$

$$q_R = \arccos \left[ \frac{v + v_a \cos(q_a - \psi + \beta)}{\sqrt{v_a^2 + v^2 + 2v_a v \cos(q_a - \psi + \beta)}} \right] - \beta$$

где

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

здесь  $v_x$ ,  $v_y$  – составляющие линейной скорости буксируемого судна;  $v_a$ ,  $q_a$  – скорость и курсовой угол истинного ветра (рисунок 1).

В формулах (12) значения аэродинамических коэффициентов  $C_{xA}$ ,  $C_{yA}$ ,  $C_{mA}$  определяются в формате ряда Фурье [11]:

$$C_{xA} = \sum_{k=0}^7 A(k) \times \cos(kq_R) \quad (13)$$

$$C_{yA} = \sum_{k=0}^7 B(k) \times \sin(kq_R) \quad (14)$$

$$C_{mA} = \sum_{k=0}^7 C(k) \times \sin(kq_R) \quad (15)$$

### 2.2.4 Усилия буксирного троса

В расчётах силы натяжения буксирного троса в первом приближении величина усилия принимается равной сопротивлению движения буксируемого судна, которое, как известно, зависит от скорости буксировки  $v_t$  (рисунок 1), угла дрейфа буксируемого судна, курсового угла кажущегося ветра  $q_R$  и его скорости  $v_R$ . Таким образом,

$$T_t = X_H + X_A$$

Продольная и поперечная составляющие этого усилия равны

$$X_T = T_t \cos \theta \quad (16)$$

$$Y_T = T_t \sin \theta \quad (17)$$

соответственно момент

$$M_T = Y_T x_T \quad (18)$$

В выражениях (16) – (18):  $\theta$  – угол между линией буксирного троса и ДП буксируемого судна;  $x_T$  – абсцисса точки крепления буксирного троса на буксируемом судне.

### 2.3 Допущения

При выполнении симуляций движения буксируемого судна с целью оценки его курсовой устойчивости в условиях ветровой нагрузки приняты допущения, которые упрощают процедуру исследования не снижая уровень достоверности полученных результатов.

В частности, приняты следующие допущения:

1. Движение буксируемого судна рассматривается только в горизонтальной плоскости.
2. Движение буксирующего судна осуществляется вдоль оси  $Y_0$  с постоянным курсом  $\psi_t = 0$  и с постоянной скоростью  $v = v_t$ .
3. Модель буксирного троса рассматривается как нерастяжимая нить.

## 3. Материалы для моделирования

### 3.1 Судно

В качестве модели буксируемого судна в исследованиях использована модель балкера, параметры посадки которого соответствуют его загрузке в балласте. Поскольку устойчивость движения на курсе судна в балласте хуже, чем судна в грузу, выводы по результатам симуляции будут справедливы и при других возможных вариантах загрузки. Основные параметры балкера приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры балкера в балласте

Наименование параметра	Значение параметра
Длина между перпендикулярами $L_{bp}$ , м	171.5
Ширина $B$ , м	28.4
Осадка носом $d_f$ , м	5.5
Осадка кормой $d_a$ , м	6.0
Коэффициент полноты водоизмещения $C_b$	0.775
Площадь пера руля $F_R$ , м <sup>2</sup>	31.6
Высота пера руля $h_R$ , м	7.69
Площадь проекции надводной части корпуса на диаметральную плоскость $S_{dp}$ , м <sup>2</sup>	2443.7
Площадь проекции надводной части корпуса на плоскость мидель-шпангоута $S_m$ , м <sup>2</sup>	642.7
Отстояние центра парусности от носовой оконечности судна $a_a$ , м	96.9

### 3.2 Аэродинамические коэффициенты

Для балкера в балласте численные значения коэффициентов  $A(k)$ ,  $B(k)$ ,  $C(k)$ , входящие в уравнения (13) – (15) представлены в таблице 2.

Зависимости аэродинамических коэффициентов  $C_{xA}$ ,  $C_{yA}$ ,  $C_{mAO}$  курсового угла кажущегося ветра  $qR$ , при заданном состоянии загрузки судна (в балласте) представлены на рисунке 2.

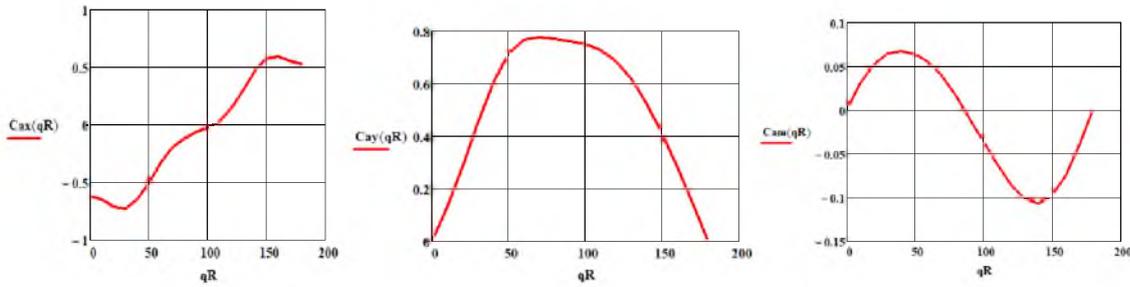


Рисунок 2 - Зависимость аэродинамических коэффициентов от курсового угла ветра  $qR$

Таблица 2 – Значения коэффициентов  $A(k)$ ,  $B(k)$ ,  $C(k)$ , балкер в балласте

k	A(k)	B(k)	C(k)
0	-0.074	0.0	0.0
1	-0.648	0.818	-0.018
2	0.013	0.035	0.087
3	-0.033	0.035	-0.007597
4	0.02	-0.012	0.006778
5	0.09	-0.024	0.00111
6	-0.002768	-0.011	0.001051
7	0.019	-0.002737	0.001492

### 3.3 Гидродинамические коэффициенты

Гидродинамические коэффициенты, входящие в расчётные формулы представлены в таблице 3.

Зависимости коэффициентов продольной, поперечной составляющих гидродинамической силы на корпусе её момента  $C_{xH}$ ,  $C_{yH}$ ,  $C_{mH}$  от угла дрейфа  $\beta$  и угловой скорости  $\omega$ , при заданном состоянии загрузки балкера (в балласте) представлены на рисунке 3.

Таблица 3 – Гидродинамические коэффициенты

Символ	Значение	Символ	Значение
$C_{xH0}$	0.049	$m_1$	0.031
$C_{yH}^{\beta}$	0.078	$m_2$	0.006
$c_2$	0.504	$m_3$	0.024
$c_3$	0.045	$m_4$	0.004
$C_{m0}$	0.03	$n_1$	0.049
$C_{m\omega}^{\omega}$	0.06	$n_2$	0.039
$C_{m\beta}$	0.069	-	-

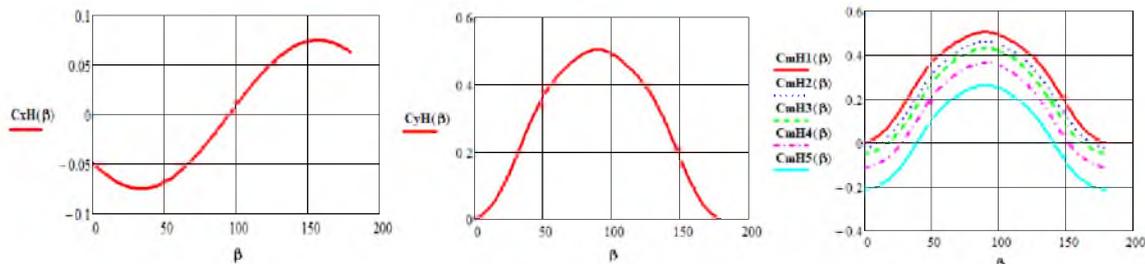


Рисунок 3 – Зависимость гидродинамических коэффициентов от курсового угла дрейфа  $\beta$  и угловой скорости: 1 -  $\omega = 0 \text{ c}^{-1}$ ; 2 -  $\omega = 0.005 \text{ c}^{-1}$ ; 3 -  $\omega = 0.01 \text{ c}^{-1}$ ; 4 -  $\omega = 0.02 \text{ c}^{-1}$ ; 5 -  $\omega = 0.03 \text{ c}^{-1}$

## 4. Результаты

Предварительная оценка влияния ветра (скорость, курсовой угол) на характер устойчивости движения буксируемого балкера выполнена при следующих фиксированных значениях основных параметров буксирной системы:

- скорость буксировки  $v_t = 5 \text{ уз}$  (2.57 м/с);
- длина буксирного троса  $l_t = 171 \text{ м}$  ( $l'_t = 1.0$ ),  $l_t = 342 \text{ м}$  ( $l'_t = 2.0$ ),  $l_t = 513 \text{ м}$  ( $l'_t = 3.0$ ),
- и начальных условиях буксировки:
  - курс буксируемого балкера  $\psi_0 = 0^\circ$ ;
  - угол дрейфа  $\beta_0 = 0^\circ$ ;
  - угловая скорость  $\omega_0 = 0 \text{ c}^{-1}$ ;

- координаты ЦТ балкера  $G_0(0, 0)$ ;
- угол отклонения буксирного троса от ДП балкера  $\theta_0 = 0^\circ$ .

Остальные параметры движения буксируемого балкера находятся в зависимости от указанных выше, например, очевидно, что начальные значения отклонений носовой  $Y_{FN}$  кормовой  $Y_A$  точек балкера будут также нулевыми.

Время продолжительности симуляции процесса буксировки выбрано равным одному часу (3600 с).

Учитывая, что устойчивость движения буксируемого судна в условиях ветровой

нагрузки оценивается по отклонениям параметров его движения от первоначально заданных значений, представим изменение основных параметров по результатам выполненных симуляций движения буксируемого судна в таблице 4:  $Y_A$  – отклонение кормовой точки буксируемого

судна;  $\psi$  – курс буксируемого судна;  $T_t$  – натяжение буксирного троса. Указанные параметры рассчитаны при различных значениях скорости ветра  $v_a$  (в отношениях  $v_a/v_t = 2, 4, 6$ ) и его направления  $q_a = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ , а также при трёх значениях длины буксирного троса  $l_t = 1.0, 2.0, 3.0$  [ $= l/L$ ].

Таблица 4 – Амплитудные значения параметров буксировки при скорости буксировки  $v_t = 2.57$  м/с (5 уз)

$q_a^\circ$	$v_a/v_t$	$l_t = 1.0$			$l_t = 2.0$			$l_t = 3.0$		
		$Y_A, \text{ м}$	$\psi^\circ$	$T_t, \text{ кН}$	$Y_A, \text{ м}$	$\psi^\circ$	$T_t, \text{ кН}$	$Y_A, \text{ м}$	$\psi^\circ$	$T_t, \text{ кН}$
0	2	-0.1	0.01	170.3	-0.09	0.011	170.3	-0.1	0.009	170.3
	4	-0.22	0.04	192.1	-0.3	0.04	192.1	-0.3	0.03	192.1
	6	-0.42	0.09	224.7	-0.5	0.08	224.7	-0.6	0.07	224.7
60	2	-22.1	4.32	188.8	-26.0	3.62	187.6	-33.0	3.37	186.9
	4	-54.2	9.73	232.4	-74.2	8.9	229.4	-97.3	8.9	227.9
	6	-91.2	14.75	282.8	-136.6	14.75	278.3	-181.6	14.74	278.3
90	2	-17.2	3.85	179.3	-19.1	3.38	178.4	-21.7	3.07	177.9
	4	-41.8	9.04	206.9	-52.4	8.52	205.0	-65.2	8.51	204.1
	6	-79.7	15.43	237.2	-111.6	15.43	237.2	-142.7	15.38	237.1
120	2	-7.2	2.27	168.5	-7.3	2.24	168.4	-7.4	2.21	168.3
	4	-18.6	7.27	188.8	-18.8	7.63	189.1	$Y_F=23.0$	7.8	189.2
	6	-33.0	13.04	211.5	-33.1	13.69	212.2	$Y_F=36.1$	13.98	212.5
180	2	0.002	0.001	156.9	0.04	0.006	157.0	$Y_F=0.05$	0.007	157.0
	4	0.02	0.004	147.7	0.31	0.05	147.8	0.4	0.06	147.8
	6	2.9	0.083	129.4	3.14	0.48	130.6	3.7	0.38	130.3

В таблице 4 красным цветом выделены максимальные амплитудные значения рассматриваемых параметров движения буксируемого судна относительно их исходных значений, представленных выше.

Анализируя данные таблицы 4 можно сделать предварительные выводы о поведении буксируемого судна в определённых условиях буксировки. Например, на рисунке 4 представлены зависимости поперечных смещений кормовой точки  $Y_A$  (м) балкера от направления ветра  $q_a$ , которые свидетельствуют о том, что вне зависимости от скорости ветра ( $v_a = 5, 10, 15$  м/с) максимальные смещения кормы буксируемого судна наблюдаются при курсовых углах ветра в районе  $60^\circ$ .

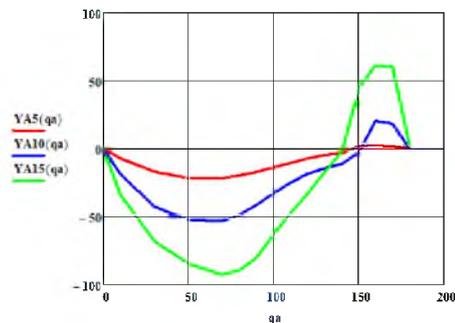


Рисунок 4 – Зависимости поперечного смещения кормовой точки балкера  $Y_A$  (м) от скорости  $v_a$  (5 м/с – красная кривая; 10 м/с – синяя; 15 м/с – зелёная) и курсового угла ветра  $q_a$  (0 -  $180^\circ$ ) при  $l_t = 1.0$

Минимальные смещения теоретически возможны при курсовых углах ветра  $0^\circ$  (носовой ве-

тер) и  $180^\circ$  (кормовой ветер), о чём свидетельствуют данные симуляции, представленные на рисунках 5, 6.

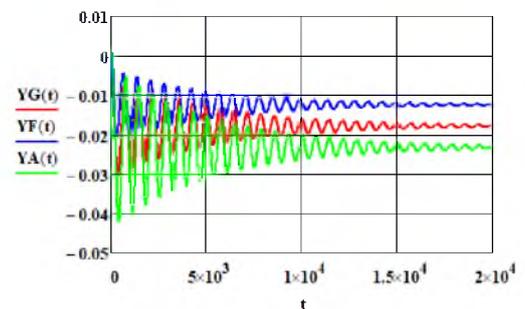


Рисунок 5 – Поперечные смещения заданных точек корпуса балкера при попутном ветре ( $q_a = 0^\circ, \psi = 0^\circ$ )

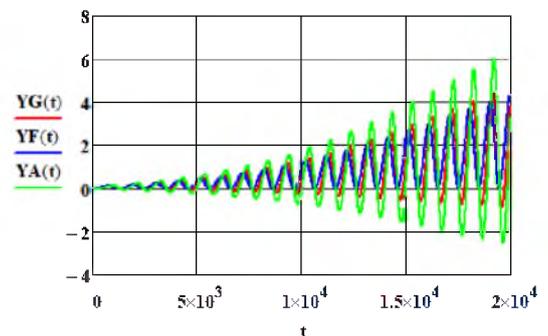


Рисунок 6 – Поперечные смещения заданных точек корпуса балкера при попутном ветре ( $q_a = 180^\circ, \psi = 0^\circ$ )

Однако на практике вероятность абсолютно точного совпадения линий действия ветра и курса буксируемого судна очень низкая, основные характеристики ветрового потока являются переменными и, как следствие, смещения будут

иметь существенно большие значения, чем те, которые представлены на рисунках 5, 6. Даже в представленных условиях смещения постоянно растут при курсовом угле ветра  $q_a = 180^\circ$ . Это происходит сравнительно медленно, что потребовало увеличить время симуляции до 20000 с.

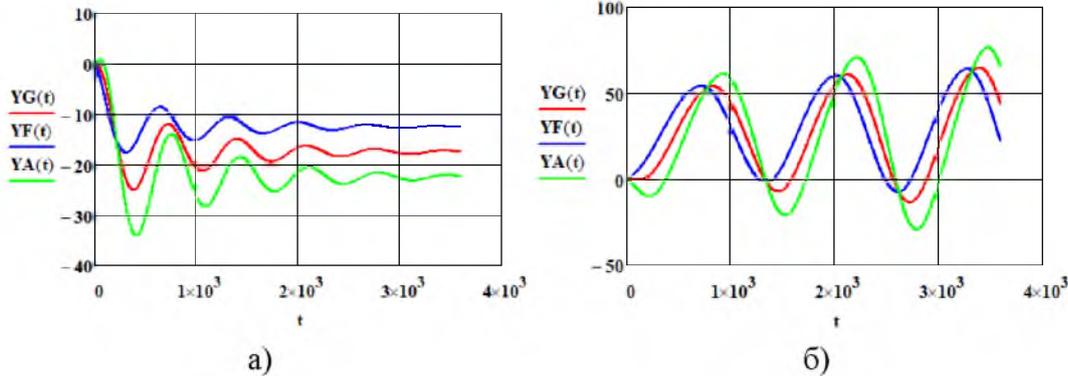


Рисунок 7 - Смещения заданных точек балкера при курсовых углах ветра: а –  $q_a = 10^\circ$ ; б –  $q_a = 170^\circ$  ( $v_t = 5$  уз)

Уменьшение скорости буксировки приводит к существенному возрастанию амплитудных значений поперечных смещений заданных точек буксируемого судна, в нашем случае балкера. Для

Результаты симуляции движения буксируемого балкера при незначительном отклонении линии ветра от линии курса ( $q_a = 10^\circ$ ,  $q_a = 170^\circ$ ,  $\psi = 0^\circ$ ), свидетельствуют о резком увеличении амплитудных значений смещений заданных точек балкера (рисунок 7).

убедительности этих утверждений приведём результаты симуляции при скорости буксировки равной  $v_t = 4$  уз (2.056 м/с), сохраняя значения других параметров прежними (рисунок 8).

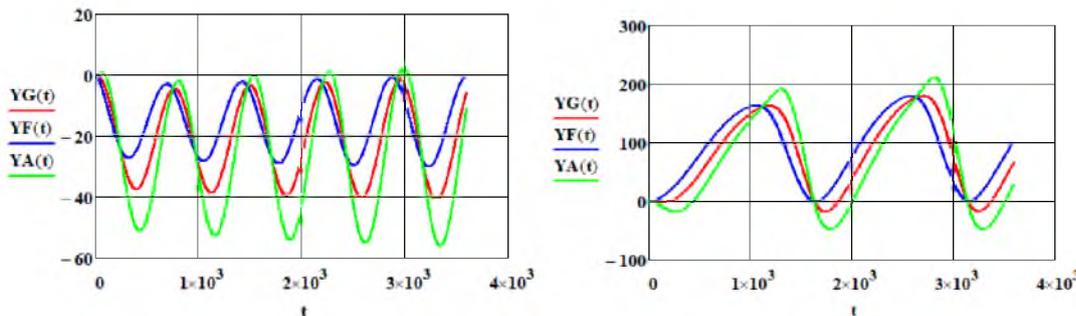


Рисунок 8 - Смещения заданных точек балкера при курсовых углах ветра: а –  $q_a = 10^\circ$ ; б –  $q_a = 170^\circ$  ( $v_t = 4$  уз)

С учётом представленной информации, можно сделать дополнительный важный вывод о том, что в устойчивости движения буксирной системы в целом и, буксируемого судна в частности, важную роль играет скорость буксировки. Это особенно заметно при буксировке в условиях ветровой нагрузки. Чувствительность буксирной системы к изменению параметров буксировки возрастает при увеличении соотношения скорости ветра и скорости буксировки  $v_a/v_t$ . В частности, это ведёт к повышению вероятности разрыва буксирного троса из-за сильных рывков при изменении его натяжения при буксировке в представленных выше условиях. Для примера приведём график изменения натяжения буксирного троса во временном измерении для двух значений скорости буксировки  $v_t = 5$  уз и  $v_t = 4$  уз (рисунок 9).

ных колебательных движений, но при этом существенно увеличивается ширина полосы движения за счёт значительных поперечных смещений, как показано на рисунке 10.

Устойчивость движения буксируемого балкера возрастает при увеличении курсовых углов ветра  $q_a$ , т.е. боковой ветер не вызывает замет-

Но в этих условиях существенно возрастает нагрузка на буксирный трос, это происходит, прежде всего, из-за относительно больших значений угла дрейфа  $\beta$ , например, при курсовом угле ветра  $q_a = 120^\circ$  его максимальное значение в градусной мере составляет  $13^\circ$ , при  $q_a = 60^\circ$   $-\beta = 19^\circ$ , соответственно усилие в буксирном тросе и в том и другом случае возрастает примерно на 40% относительно исходного значения. В стационарном режиме движения буксирной системы в данных условиях, усилие в буксирном тросе может не превышать его предельных значений, однако в реальных условиях кроме ветровой нагрузки вероятно присутствие и других внешних воздействий, которые могут привести к увеличению натяжения буксирного троса и, как следствие, к его разрыву.

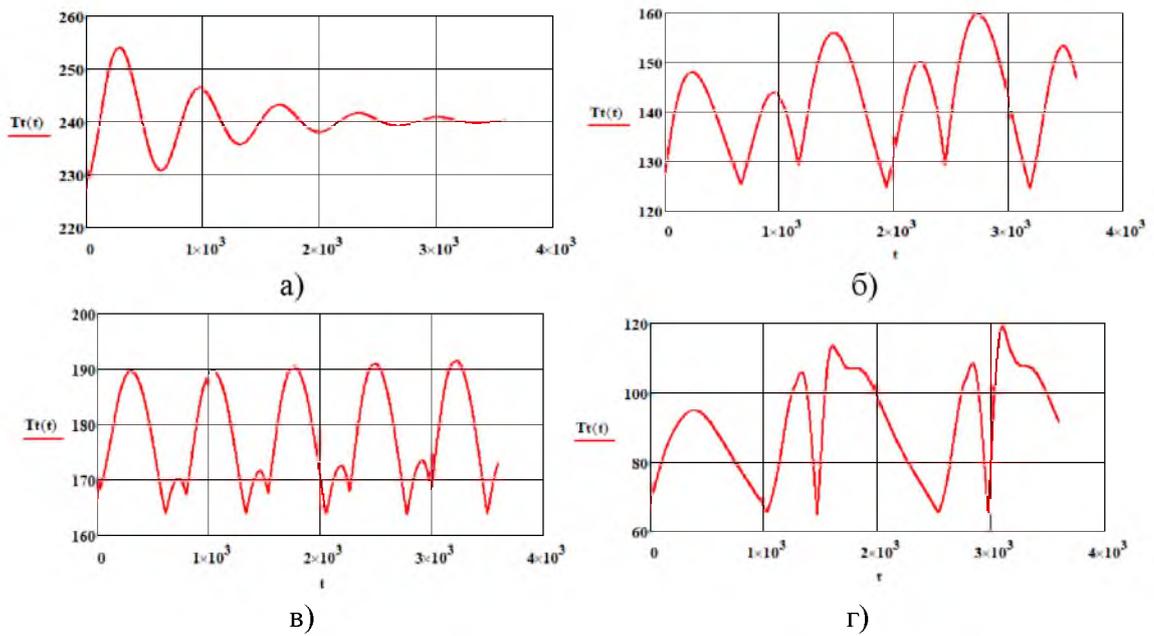
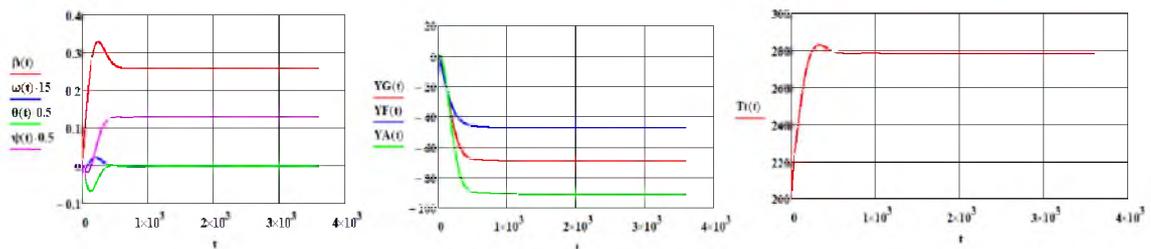


Рисунок 9 - Изменение натяжения буксирного троса при скорости буксировки  $v_t$  и курсовом угле ветра  $q_a$ : а -  $v_t = 5$  уз,  $q_a = 10^\circ$ , б -  $v_t = 5$  уз,  $q_a = 170^\circ$ ; в -  $v_t = 4$  уз,  $q_a = 10^\circ$ ; г -  $v_t = 4$  уз,  $q_a = 170^\circ$

курсовой угол  $q_a = 60^\circ$ :



курсовой угол  $q_a = 120^\circ$ :

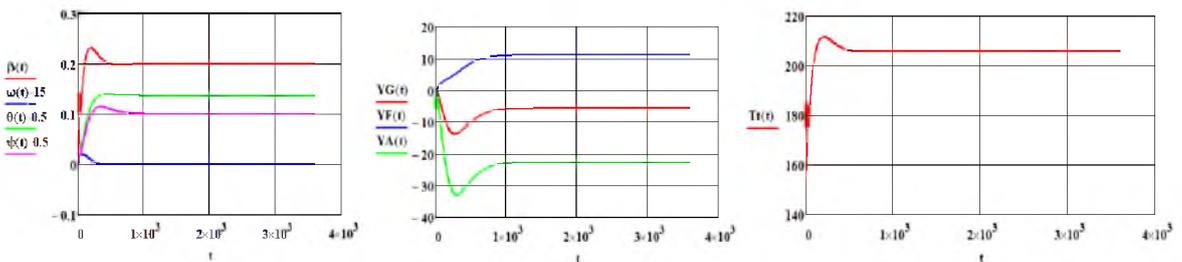


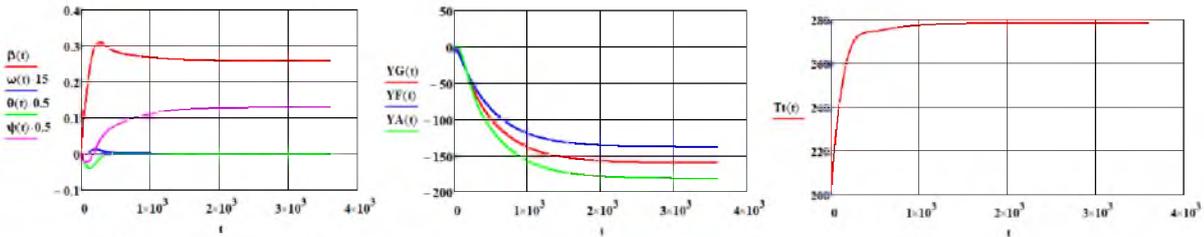
Рисунок 10 - Параметры движения буксируемого балкера и усилие в буксирном тросе при различных курсовых углах бокового ветра

Наконец, увеличение длины буксирного троса  $l_t$  неизбежно приводит к росту амплитуды поперечных смещений буксируемого балкера и нагрузке в буксирном тросе. Тем не менее, увеличение длины буксирного троса весьма несущественно влияет на кинематические параметры движения буксируемого балкера ( $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\psi$ ). Это заметно по данным, представленным в таблице 4, кроме того это подтверждается результатами симуляции движения балкера в критических зонах

ветрового воздействия ( $q_a = 60^\circ, q_a = 170^\circ$ ) которые представлены на рисунке 11.

Учитывая формат научной статьи, мы не можем привести все данные выполненных симуляций, но, на наш взгляд, представленные в статье материалы дают основания для определения безопасных режимов буксировки в условиях ветровой нагрузки.

курсовой угол  $q_a = 60^\circ$ :



курсовой угол  $q_a = 170^\circ$ :

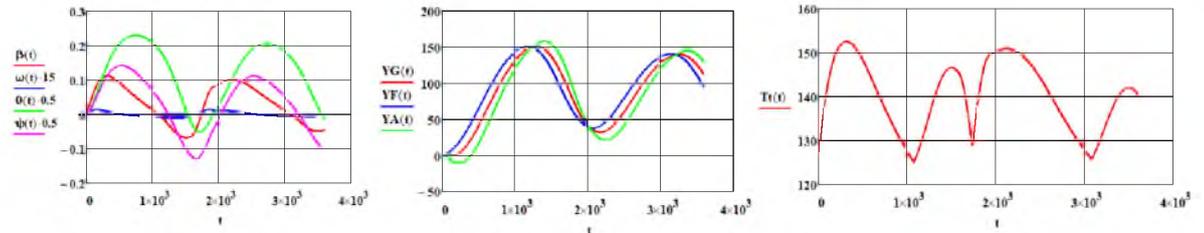


Рисунок 11 - Параметры движения буксируемого балкера и усилие в буксирном тросе при его относительной длине  $l_t = 3$

**Заключение.**

Выполняя буксирную операцию в условиях ветровой нагрузки, необходимо учитывать ряд факторов, которые влияют на безопасность её выполнения. Если нет существенных ограничений в выборе курса буксировки, следует выбирать курс буксировки с нулевым курсовым углом к ветру. При этом амплитуда колебательных движений буксируемого судна будет минимальной, т.е. полоса движения буксирной системы будет иметь минимальную ширину, что является одним из основных факторов, определяющих безопасность буксирной операции. Но при этом следует учитывать высокую вероятность изменения параметров ветра в процессе буксировки, и прежде всего его направления, что приводит к потере устойчивости движения буксирной системы, т.е. к увеличению амплитудных значений кинематических параметров движения буксируемого судна. Следствием этого могут быть большие динамические нагрузки в буксирном тросе и ухудшение управляемости буксирной системы в целом и буксирующего судна в частности.

Стационарный режим движения буксируемого судна и всей буксирной системы достигается при увеличении курсового угла ветра, но в этом случае увеличивается поперечное смещение буксируемого судна и ширина маршрута движения буксирной системы, они достигают максимума при курсовом угле ветра в районе  $60^\circ$ . В этом случае натяжение буксирного троса достигает максимума, что может привести к его обрыву в случае превышения предельной нагрузки.

Наконец движение буксирной системы по ветру приводит к существенному снижению натяжения буксирного троса, вследствие чего

движение буксируемого судна переходит в автоколебательный режим с растущими амплитудными значениями основных параметров движения. Нестационарный режим движения буксируемого судна может привести к потере управляемости всей буксирной системы, что недопустимо по соображениям безопасности выполнения буксирной операции.

**Литература**

1. Богданов, Б. В. О рыскливости морских барж / Б. В. Богданов. – Л.: Водтрансиздат, 1953. – 60 с.
2. Справочник по теории корабля: В 3 т. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / [А. Ш. Афремов и др.]; под ред. Я. И. Войткунского. – Л: Судостроение, 1985. – 542 с.
3. Тумапик, А. П. Математическая модель бурового судна, удерживаемого в заданной точке моря / А. П. Тумапик // ЦНИИ «Румб». Вопросы судостроения: науч.-техн. сб. – 1980. Вып. 24. – С. 44–56. – (Сер. «Проектирование судов»).
4. Юдин Е.Б., Маковский А. Г. Анализ самопроизвольного рысканья буксируемых судов // Судостроение.– 1975.– № 4.– С. 15-17.
5. Юдин, Е.Б. К расчёту управляемости океанских буксиров / Е.Б. Юдин // Судостроение. – 1984. – № 7.– С. 7-9.
6. Юдин, Ю.И. Выбор модели для исследования управляемости буксирной системы/Ю.И. Юдин, А.В. Бачице, Г.Ю. Ищейкин, Д.Д. Стрельников. Marine Intellectual Technologies № 1 (43) т. 2, ГМТУ, С.Петербург – 2019, с. 11-22.
7. Юдин, Ю. И., Оценка безопасности буксирной операции методами математического моделирования/ Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев. – М.: Моркнига, 2015.– 144 с.
8. Юдин, Ю.И. Расчёт усилий, действующих на объекты буксировки со стороны буксирной

- связи/Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев, В.В. Каян//Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. – 2013. – Е. 16. №1.– С. 193-196.
9. Юдин, Ю.И. Симуляция управления движением буксируемого судна регулированием натяжения буксирного троса /Ю.И. Юдин //Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – №4 (97). – С. 31-41.
  10. Юдин, Ю.И. Учёт удлинения буксирного троса при моделировании процесса буксировки/Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ипцейкин//Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – №3 (88). – С. 60-71.
  11. Юдин, Ю.И. Численное моделирование автоколебаний буксируемого судна/Ю.И. Юдин, В.В. Каян//Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. – 2013. – Е. 16. №1.– С. 197-201.
  12. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2011. Course stability of a ship towing system. J. Ship Technol. Res. 58, 4-24.
  13. Isherwood, R.M., 1972. Wind resistance of merchant ships. RINA Trans. 115, 327-338.
  14. Kijima, K., Wada, Y., 1983. Course stability of towed vessel with wind effect. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 153, 117-126. (Japanese).
  15. Kijima, K.; Varyani, K. (1986), Wind Effect on Course Stability of Two Towed Vessels, Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 158, pp.137-148.
  16. Yasukawa, H., Hirata, N., Nakamura, N., Matsumoto, Y., 2006. Simulations of slewing motion of a towed ship. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 4, 137-146. (Japanese).
  17. Yasukawa, H., Hirata, N., Tanaka, K., Hashizume, Y., Yamada, R., 2007b. Circulation water tunnel tests on slewing motion of a towed ship in wind. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 6, 323-329. (Japanese).
  18. Yasukawa, H., Hirono, T., Nakayama, Y. and Koh, K.K., 2012. Course Stability and Yaw Motion of a Ship in Steady Wind, J. Marine Science and Technology. Vol.17, No.3, 291-304.
  19. Yasukawa, H., Nakamura, N., 2007a. Analysis of course stability of a towed ship in wind. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 6, 313-322. (Japanese).
- References**
1. Bogdanov, B. V. O risklivosti morskikh barzh / B. V. Bogdanov. – L.: Vodtransizdat, 1953. – 60 s.
  2. Spravochnik po teorii korablya: V 3 t. T. 3. Upravly-aemost' vodoizmeshchayushchih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / [A. SH. Afremov i dr.]; pod red. YA. I. Vojtkunskogo. – L: Sudostroenie, 1985. – 542 s.
  3. Tumashik, A. P. Matematicheskaya model' burovogo sudna, uderzhivaemogo v zadannoj tochke morya / A. P. Tumashik // CNII «Rumb». Voprosy sudostroeniya: nauch.-tekhn. sb. – 1980. Vyp. 24. – S. 44–56. – (Ser. «Proektirovanie sudov»).
  4. YUdin E. B., Makovskij A. G. Analiz samopro-izvol'nogo tyskan'ya buksiruemyh sudov // Sudostroenie. 1975. № 4. S. 15–17.
  5. YUdin, E. B. K raschyotu upravlyaemosti okeanskih buksirov / E. B. YUdin // Sudostroenie. – 1984. – № 7. S. 7–9.
  6. YUdin, YU.I. Vybora modeli dlya issledovaniya upravlyaemosti buksirnoj sistemy/YU.I. YUdin, A.V. Bachishche, G.YU. Ishchejkin, D.D. Strel'nikov. Marine Intellectual Technologies № 1 (43) t. 2, GMTU, S.Peterburg – 2019, s. 11-22.
  7. YUdin, YU. I., Ocenka bezopasnosti buksirnoj operacii metodami matematicheskogo modelirovaniya/ YU. I. YUdin, S. V. Pashencev. - M.: Morkniga, 2015. 144 s.
  8. YUdin, YU.I. Raschyot usilij, dejstvuyushchih na ob"ekty buksirovki so storony buksirnoj svyazi/YU.I. YUdin, S.V. Pashencev, V.V. Kayan//Vestnik MGTU: tr. Murman. gos. tekhn. un-ta. – 2013. – E. 16. №1. S. 193 -196.
  9. YUdin, YU.I. Simulyaciya upravleniya dvizheniem buksiruемого судна regulirovaniem natyazheniya buksirного троса /YU.I. YUdin //Ekspluataciya morskogo transporta. – 2020. - №4 (97). – S. 31 – 41.
  10. YUdin, YU.I. Uchyot udlineniya buksirного троса pri modelirovanii processa buksirovki/YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin//Ekspluataciya morskogo transporta. – 2018. - №3 (88). – S. 60 – 71.
  11. YUdin, YU.I. CHislennoe modelirovanie avtokolebaniy buksiruемого судна/YU.I. YUdin, V.V. Kayan//Vestnik MGTU: tr. Murman. gos. tekhn. un-ta. – 2013. – E. 16. №1. S. 197-201.
  12. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2011. Course stability of a ship towing system. J. Ship Technol. Res. 58, 4-24.
  13. Isherwood, R.M., 1972. Wind resistance of merchant ships. RINA Trans. 115, 327-338.
  14. Kijima, K., Wada, Y., 1983. Course stability of towed vessel with wind effect. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 153, 117-126. (Japanese).
  15. Kijima, K.; Varyani, K. (1986), Wind Effect on Course Stability of Two Towed Vessels, Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 158, pp.137-148.
  16. Yasukawa, H., Hirata, N., Nakamura, N., Matsumoto, Y., 2006. Simulations of slewing motion of a towed ship. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 4, 137-146. (Japanese).
  17. Yasukawa, H., Hirata, N., Tanaka, K., Hashizume, Y., Yamada, R., 2007b. Circulation water tunnel tests on slewing motion of a towed ship in wind. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 6, 323-329. (Japanese).
  18. Yasukawa, H., Hirono, T., Nakayama, Y. and Koh, K.K., 2012. Course Stability and Yaw Motion of a Ship in Steady Wind, J. Marine Science and Technology. Vol.17, No.3, 291-304.
  19. Yasukawa, H., Nakamura, N., 2007a. Analysis of course stability of a towed ship in wind. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 6, 313-322. (Japanese).