

- V.M.Zass, L.I.Yankovskij. – Kiev: AN USSR, 1956. – 163 s.
19. Suhomel, G.I Issledovanie dvizheniya sudov po kanalim i melkovod'yu [Tekst]. – Kiev: Naukova dumka, 1966. – 77 s.
  20. CHurin, M.YU. Utochnenie sposoba opredeleniya dinamicheskoy prosadki sudov v usloviyah melkovod'ya na techenii [Tekst]/ Vestnik VGAVT. – 2017. – Вып. 52. – S.205 – 210.
  21. Barras, B.C. Ship design and performance for master and mates [Text]. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2004. – 252 p.
  22. Beaulieu C. Modélisation du surenfoncement des navires marchands qui transitent par le fleuve Saint-Laurent [Text]/ C.Beaulieu,Taha B.M.J.Ouarda, O.Seidou// Rapport de recherche №R-974.– Québec: Génie hydraulique. – 2008. – 76 p.
  23. Briggs, M. J. Ankudinov ship squat predictions – Part I: Theory, parameters and FORTRAN programs [Text]/ Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-19.– Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2009. – 16 p. <http://chl.erdc.usace.army.mil/chetn/>
  24. Briggs M.J. Ankudinov ship squat predictions – Part II: Laboratory and field comparisons and validations [Text]/ M.J.Briggs, L.Daggett// Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-20.– Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. – 2009. – 20 p. <http://chl.erdc.usace.army.mil/chetn/>
  25. Debaillon P. Modelisation numerique du surenfoncement des bateaux numerical modelling of ship squat [Text]/ P.Debaillon, P.Sergent, E.Lefrancois, G.Dhatt// 10 èmes Journées de L'hydrodynamique 7 – 9 mars 2005. – Nantes. – 13 p.
  26. Kazerooni M.F. Experimental evaluation of ship squat in shallow waters [Text]/ M.F.Kazerooni, M.S.Seif// J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. – 2014. – P.559 – 569.
  27. Kimmon P.M. Required underkeel clearance in ports [Text]/ Transport Systems and their operators in times of change. – Rotterdam, 1982. – P. 113 – 195.
  28. Kurgan G.J. Vessels clearance criteria for great lakes channels [Text]/ Water Forum 81. Proc. Spec. Conf., San Francisco, Calif, 10 – 14 aug. – 1981. – P. 449 – 455.
  29. Millward A. A comparison of the theoretical and empirical prediction of Squat in shallow water [Text]/ Int. Shipbuild. Prog. –1992. – 39. – №417. – p.69 – 78.
  30. Sabit. A. S. Fundamentals of Hydrodynamic Problems Associated With Ships Operating in Shallow Waterways [Text]/ J of Arab Institute of Navigation. – 2008. – P.11 – 22.
  31. Sommet J. Maneuvering in shallow waters. The problem of squat and sinkage [Text]/ The 1-st Int. Symp. on ships approach and berthing maneuvers. –Grenobl, 1977. – P.19 – 23.
  32. Vermer Jr.H. The behavior a ship in Restricted waters [Text]/ Int. ship build. progr., 1977. – V.24. – №280. – P. 323 – 336.

УДК 656.618.1 [629.5.018.712:517.958]

DOI: 10.34046/aumsuomt97/6

## СИМУЛЯЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БУКСИРУЕМОГО СУДНА РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАТЯЖЕНИЯ БУКСИРНОГО ТРОСА

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

При разработке систем автоматического управления процессом выполнения буксирной операции следует прежде всего выбрать управляемую координату и регулируемый параметр, посредством которой эта координата будет управляться. Не все координаты могут быть управляемы, более того, не все параметры, от которых зависит управляемость буксирной системы могут быть регулируемы в процессе выполнения буксирной операции. Тем не менее, представляется возможным регулировать такой известный параметр, как натяжение буксирного троса. Это, конечно, сопряжено с определёнными сложностями, прежде всего исходя из технических возможностей отдельных элементов буксирной системы. Например, такими как тяговая мощность буксирной лебёдки, разрывное усилие буксирного троса. За управляемую координату можно принять любой кинематический параметр движения, но при этом необходимо учитывать возможность измерения этого параметра в процессе буксирной операции. в настоящей статье предложено использовать в качестве управляемой координаты поперечное смещение крайней кормовой точки буксируемого судна. Результаты симуляции процесса движения буксируемого судна с регулируемым натяжением буксирного троса, убедительно подтверждают правомочность сделанного выбора управляемой координаты.

**Ключевые слова:** буксировка, буксируемое судно, управляемость, буксирный трос, натяжение, симуляция, управление.

## SIMULATION OF THE TOWED VESSEL MOVEMENT CONTROL BY ADJUSTING THE TOW ROPE TENSION

*Yu. I. Yudin*

When developing systems for automatic control of the process of performing a towing operation, one should first of all choose a controlled coordinate and an adjustable parameter by means of which this coordinate will be controlled. Not all coordinates can be controlled, moreover, not all parameters, on which the controllability of the towing system depends, can be adjusted during the towing operation. Nevertheless, it seems possible to regulate such a known parameter as the tension of the towing cable. This, of course, is fraught with certain

difficulties, primarily based on the technical capabilities of individual elements of the towing system. For example, such as the pulling power of the towing winch, the breaking force of the towing cable. Any kinematic motion parameter can be taken as a controlled coordinate, but it is necessary to take into account the possibility of measuring this parameter during the towing operation. In this article it is proposed to use the transverse displacement of the extreme aft point of the towed vessel as a controlled coordinate. The results of the simulation of the process of movement of the towed vessel with an adjustable tension of the towing cable convincingly confirm the validity of the choice of the controlled coordinate.

**Key words:** towing, towed vessel, handling, tow rope, tension, simulation, control.

**Введение.**

Безопасность выполнения буксирной операции во многом определяется управляемостью буксирной системы (буксирующее судно, буксирный трос, буксируемое судно). Возможности обеспечения управляемости буксирной системы рассмотрены в ряде известных работ отечественных [1], [3], [4], [6], [7], [9] и зарубежных исследователей [10], [11], [12], [15], [16], [17] и др. Как правило, в перечисленных работах управляемость буксирующего и буксируемого судна рассматривается отдельно без учёта их взаимного влияния. Возможно, такой подход имеет определённый смысл, но только не в том случае, когда параметры буксирной системы меняются в процессе буксировки. Так, например, в процессе выполнения буксирной операции из-за ряда причин, влияющих на характер поведения одного из судов, входящих в состав буксирной системы, требуется изменить один из её значимых параметров (скорость буксировки, длину буксирного троса, натяжение буксирного троса). Невыполнение этого условия может привести к непредсказуемому поведению буксирной системы или одного из её элементов и, как следствие, к потере управляемости буксирной системой. В стеснённых условиях плавания такое развитие событий неизбежно приведёт к развитию аварийной ситуации с участием не только судов, входящих в состав буксирной системы, но и других судов, находящихся в непосредственной близости от маршрута буксировки.

Опасное развитие событий в процессе выполнения буксирной операции вряд ли возможно предусмотреть заранее, поэтому менять параметры буксирной системы приходится исходя из сложившейся обстановки. В частности, изменять длину буксирного троса, регулировать скорость буксировки и его натяжение, разумеется, в пределах прочности буксирного троса. Очевидно, что изменение скорости буксировки и натяжения буксирного троса взаимосвязаны, однако натяжение буксирного троса может осуществляться в определённом интервале времени с использованием буксирной лебёдки буксируемого судна с учётом её технических возможностей. Операция по изменению натяжения буксирного троса с использованием буксирной лебёдки актуальна в случае импульсного характера воздействия внешних факторов на буксируемое судно.

Полный анализ управляемости буксирной системы с использованием её математической модели является комплексной задачей, требующей поэтапного исследования управляемости её составных частей. В связи с этим, в данной работе представлены результаты модельных экспериментов по оценке устойчивости движения буксирного судна с учётом регулировки скорости буксировки и, как следствие, натяжения буксирного троса, а также длины буксирного троса. При этом буксирующее судно рассматривается как точечный объект, движущийся в заданном направлении (заданный курс буксировки  $\psi_t$ ) с заданной скоростью (заданная скорость буксировки  $v_t$ ).

**Управляемое движение буксируемого судна**

С целью упрощения аналитической оценки устойчивости движения буксируемого судна и влияния на неё различных факторов, в исследованиях, результаты которых представлены в настоящей статье, курс буксировки принят равным нулю ( $\psi_t = 0$ ), т.е. движение буксирующего судна, представленного точечным объектом, осуществляется вдоль оси  $X$  координатной системы  $XOY$ , а его скорость имеет постоянное значение ( $v_t = v$ ), задаваемое с учётом конкретной решаемой задачи. Схема движения буксируемого судна и координатные системы представлены на рисунке 1.

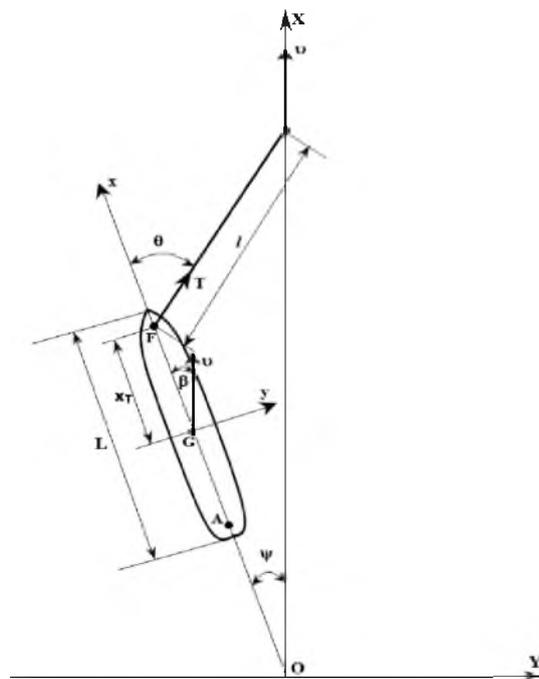


Рисунок 1 – Координатные системы, параметры движения буксируемого судна

На рисунке 1:  $XOY$  – неподвижная координатная система;  $xGu$  – подвижная координатная система, связанная с судном;  $v$  – скорость буксировки;  $l$  – длина буксирного троса;  $L$  – длина буксирного судна (принята длина между перпендикулярами  $L_{pp}$ );  $T$  – натяжение буксирного троса;  $x_T$  – абсцисса точки крепления буксирного троса;  $\theta$  – угол отклонения буксирного троса от диаметральной плоскости (ДП) буксирного судна (на рисунке показано направление положительного отсчёта);  $\beta$  – угол дрейфа (на рисунке показан отрицательный отсчёт);  $\psi$  – курс буксирного судна (на рисунке показан отрицательный отсчёт);  $G$  – центр тяжести (ЦТ) буксирного судна;  $F, A$  – условные точки носовой и кормовой оконечностей судна (расположены на носовом и кормовом перпендикулярах, соответственно).

В качестве модели буксирного судна в исследовании 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 моделирования будут справедливы и при других возможных вариантах загрузки. Основные параметры балкера приведены в таблице 1.

$$\begin{aligned}
 & -m_x \frac{dv}{dt} + m_x v \beta \frac{d\beta}{dt} - m_y v \omega \beta - C_{x0} 0.5 \rho v^2 F_{dp} \\
 & - C_{xr} 0.5 \rho v^2 F_{rr} + T_e = 0 \\
 & m_y \beta \frac{dv}{dt} + m_y v \frac{d\beta}{dt} - m_x v \omega + (C_{y\beta}^\beta \beta + c_2 \beta |\beta|) 0.5 \rho v^2 F_{dp} \\
 & - \mu \left[ \alpha_r - \kappa_E \left( \beta + \bar{l}_r \frac{L}{v} \omega \right) \right] 0.5 \rho v^2 F_{rr} = 0 \\
 & - I_{zz} \frac{d\omega}{dt} + C_{m\beta}^\beta 0.5 \rho v^2 \beta F_{dp} L - C_{m\omega}^\omega 0.5 \rho v \omega F_{dp} L^2 + C_{yr}^\alpha l_r \left[ \alpha_r - \kappa_E \left( \beta + \bar{l}_r \frac{L}{v} \omega \right) \right] 0.5 \rho v^2 F_{rr} = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь для упрощения записи введены следующие обозначения:  $m_x [ = m + \lambda_{11} ]$  – масса судна с учётом присоединённой массы при движении в направлении оси  $x$  (рисунок 1);  $m_y [ = m + \lambda_{22} ]$  – масса судна с учётом присоединённой массы при движении в направлении оси  $y$ ;  $I_{zz} [ = I_z + \lambda_{66} ]$  – присоединённый момент инерции массы судна относительно вертикальной оси  $z$  с учётом присоединённого момента инерции;  $\rho$  – массовая плотность воды,  $F_{dp}$  – приведённая площадь диаметрального батокса [3];  $F_{rr}$  – приведённая площадь пера руля;  $\omega$  – угловая скорость;  $l_r$  – абсцисса центра давления пера руля  $\bar{l}_r = l_r/L$ ;  $\kappa_E$  – коэффициент влияния корпуса и гребного винта на работу руля;  $T_e$  – тяга гребного винта;  $C_{x0}$ ,  $C_{xr}$ ,  $C_{y\beta}^\beta$ ,  $c_2$ ,

Таблица 1 – Основные параметры балкера в балласте

Наименование параметра	Значение параметра
Длина между перпендикулярами $L_{pp}$ , 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
Диаметр винта $D$ , м	5.2

Такие параметры как скорость буксировки  $v$ , длина буксирного троса  $l$ , натяжение буксирного троса  $T$  подлежат вариации при симуляции процесса буксировки, что позволит производить последующий анализ интересующих нас результатов этой симуляции с использованием математической модели судна, представленной в виде системы дифференциальных уравнений, описанных в работе Р.Я. Першица [3].

$C_{m\beta}^\beta$ ,  $C_{m\omega}^\omega$ ,  $C_{yr}^\alpha$  – гидродинамические коэффициенты сил и момента на корпусе и руле. Процедура формульного расчёта указанных выше параметров подробно представлена в работе [6]. Высокий уровень адекватности математической модели балкера можно оценить, сравнив основные параметры циркуляции, полученные при проведении натурного и модельного экспериментов. На рисунке 2 показаны результаты симуляции циркуляции балкера с использованием его математической модели.

В таблице 2 представлены значения тактического диаметра циркуляции ( $D_T$ ) и выдвиг ( $A_D$ ), полученные при проведении ходовых испытаний балкера и при симуляции с использованием его математической модели, а также их расхождение в %.

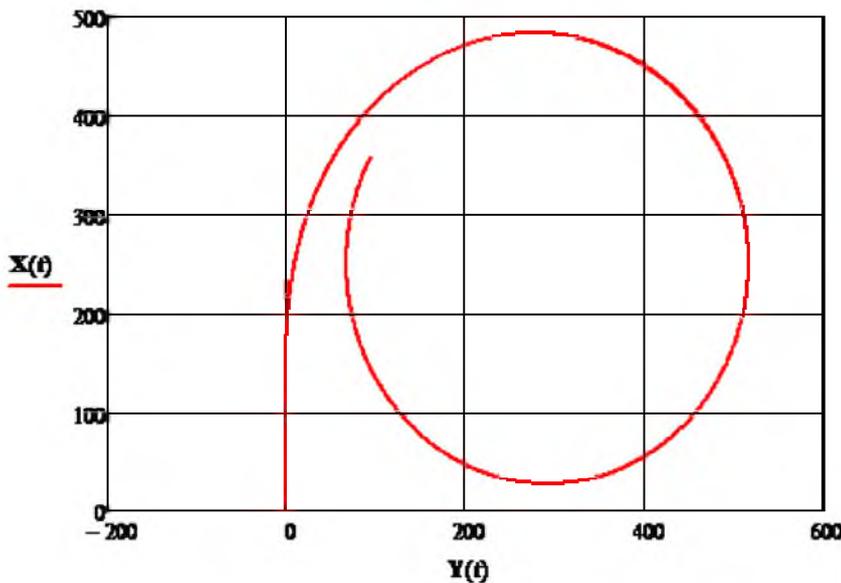


Рисунок 2 – Циркуляция балкера (судно в балласте  $d = 6.1$  м, полный ход  $v = 14.6$  уз, угол перекладки руля  $\alpha_r = 35^\circ$ )

Таблица 2 – Основные параметры циркуляции балкера в балласте

Основные параметры циркуляции балкера	Значения основных параметров циркуляции балкера		Расхождение, %
	ходовые испытания	моделирование	
$D_T$ , м	552	516	6.5
$A_D$ , м	502	483	3.8

В дальнейшем будем считать, что буксируемое судно неуправляемо, в связи с этим в представленной системе уравнений (1) вносятся следующие очевидные изменения, а именно:  $F_{rr} = F_r$  (площадь пера руля), тяга винта  $T_e = 0$ ,  $\kappa_E = \kappa_H = 1.0$  (коэффициент влияния корпуса), значение которого учитывает конструктивные особенности кормовой части балкера, рассматриваемого в качестве буксируемого объекта [3], угол перекладки руля  $\alpha_r = 0$ .

В соответствии с введёнными ранее условиями, курс и скорость буксирующего судна имеют постоянные значения  $\psi_t = 0$ ,  $v_t = v$  и, как следствие, скорость буксируемого судна будет

$$m_y v \frac{d\beta}{dt} - m_x v \omega + (C_{y\beta}^\beta \beta + c_2 \beta |\beta|) \mu_H + C_{yr}^\alpha \mu_R \beta + C_{yr}^\alpha \mu_R \frac{l_r}{v} \omega + T \sin \theta = 0 \tag{2}$$

$$I_{zz} \frac{d\omega}{dt} + C_{m\beta}^\beta \mu_H L \beta - C_{m\omega}^\omega \mu_H \omega L^2 - C_{yr}^\alpha l_r \mu_R \beta - C_{yr}^\alpha \mu_R \frac{l_r^2}{v} \omega + T x_r \sin \theta = 0$$

В целях дальнейшего использования дифференциальных уравнений (2) для симуляции движения буксируемого судна, приведём их к каноническому виду. При этом дополнительно введём в систему уравнений пять дифференциальных уравнений, описывающих изменение курса буксируемого судна ( $\psi$ ), угла отклонения буксирного троса ( $\theta$ ) от ДП буксируемого судна (рисунок 1) и поперечных смещений: ЦТ буксируемого судна ( $Y_G$ ), его носовой точки ( $Y_F$ ) и кормовой точки ( $Y_A$ ), а именно:

также иметь постоянное значение равное скорости буксирующего судна  $v$ , следовательно, ускорение будет иметь нулевое значение  $dv/dt = 0$ , что позволяет упростить систему дифференциальных уравнений (1), исключив из неё первое уравнение и первое слагаемое во втором уравнении.

В оставшиеся уравнения системы (1) добавим силовую нагрузку на буксируемое судно со стороны буксирного троса с учётом угла его отклонения  $\theta$  от ДП буксируемого судна (рисунок 1). Кроме того, с целью сокращения записи введём два новых обозначения:  $\mu_H = 0.5 \rho v^2 F_{dp}$ ,  $\mu_R = 0.5 \rho v^2 F_r$ . С учётом выполненных преобразований, система дифференциальных уравнений (1) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(1 + \frac{\bar{x}_T}{l}\right) \omega - \frac{\beta}{l} + \frac{\psi}{l}$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega$$

$$\frac{dY_G}{dt} = \psi - \beta$$

$$\frac{dY_F}{dt} = Y_G + \left(\frac{L}{2}\right) \sin(\psi)$$

$$\frac{dY_A}{dt} = Y_G - \left(\frac{L}{2}\right) \sin(\psi)$$

Выполнив несложные преобразования получим систему дифференциальных уравнений для исследований динамики движения буксируемого судна:

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dt} &= -q_1\beta + q_2\omega - q_3\beta|\beta| - q_4 \sin \theta \\ \frac{d\omega}{dt} &= r_1\beta - r_2\omega - r_3 \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= -s_1\beta + s_2\omega + s_3\psi \\ \frac{d\psi}{dt} &= \omega \\ \frac{dY_G}{dt} &= \psi - \beta \\ \frac{dY_F}{dt} &= Y_G + \left(\frac{L}{2}\right) \sin(\psi) \\ \frac{dY_A}{dt} &= Y_G - \left(\frac{L}{2}\right) \sin(\psi) \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (4) обозначено:

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{C_{y\beta}^\beta \mu_H + C_{yr}^\alpha \mu_R}{m_y \nu}; & q_2 &= \frac{m_x - C_{yr}^\alpha \mu_R \bar{l}_r \frac{L}{\nu^2}}{m_y}; \\ q_3 &= \frac{c_2 \mu_H}{m_y \nu}; & q_4 &= \frac{T}{m_y \nu}; \\ r_1 &= \frac{(C_{m\beta}^\beta \mu_H - C_{yr}^\alpha \bar{l}_r \mu_R) L}{I_{zz}}; \\ r_2 &= \frac{(C_{m\omega}^\omega \mu_H + C_{yr}^\alpha \mu_R \bar{l}_r^2) L^2}{I_{zz} \nu}; & r_3 &= \frac{T \bar{x}_T L}{I_{zz}}; \\ s_1 = s_3 &= \frac{1}{l}; & s_2 &= \left(1 + \frac{\bar{x}_T}{l}\right) \end{aligned}$$

### Оценка способов регулирования натяжения буксирного троса в процессе буксировки

Перед тем как приступить к моделированию динамики движения буксируемого судна с использованием регулирования натяжения буксирного троса в процессе буксировки, сделаем ряд замечаний, определяющих объём и содержание представленного в данной статье материала.

Во-первых, целью исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, является оценка возможности регулирования основных кинематических параметров движения буксируемого судна *в процессе выполнения буксирной операции*. В этой связи мы не рассматриваем регулирование такого параметра как абсцисса точки крепления буксирного троса  $x_T$  на буксируемом судне. При этом нам известно, что

этот параметр оказывает заметное влияние на характер движения буксируемого судна, о чём свидетельствуют многочисленные исследования известных авторов [4], [7], [10], [15] и др., а также многочисленные выводы, сделанные на основании практического опыта, участников и исполнителей буксирных операций.

Во-вторых, изменение натяжения буксирного троса в процессе буксировки представляется нам наиболее целесообразным действием, выполнение которого не создаёт каких-либо серьёзных проблем, как в техническом, так и в организационном плане. Натяжение буксирного троса может меняться изменением скорости буксировки, т.е. скорости буксирующего судна, её увеличение неизбежно ведёт к увеличению сопротивления движению буксируемого судна и, как следствие, натяжение буксирного троса возрастает. Это положительно сказывается на характере поведения буксируемого судна, т.е. амплитуда его колебательных движений существенно уменьшается, уменьшается и ширина полосы движения буксирной системы. Кроме того, натяжение буксирного троса может меняться за счёт работы буксирной лебёдки на буксирующем судне.

В-третьих, выполнение указанных выше манипуляций сопряжено с определёнными ограничениями, о которых необходимо помнить, приступая к увеличению скорости буксировки (скорости буксирующего судна) и используя буксирную лебёдку буксирующего судна. В первом случае, как, впрочем, и во втором, натяжение буксирного троса не должно превышать величину разрывного усилия троса, используемого в качестве буксирного, более того, должен оставаться определённый запас прочности в силу непредвиденных обстоятельств (увеличение силовой нагрузки на буксируемое судно, в основном, из-за влияния внешних факторов, присутствующих в районе выполнения буксирной операции). Не менее существенным фактором, определяющим возможность использования буксирной лебёдки для регулирования натяжения буксирного троса, является её максимальное тяговое усилие. Несмотря на то, что регулирование натяжения буксирного троса работой буксирной лебёдки предпочтительнее, так как это можно сделать в импульсном режиме за относительно короткий промежуток времени одновременно меняя длину буксирного троса, необходимо иметь ввиду, что большинство современных буксиров имеют тяговое усилие в пределах 400 – 600 кН. Этот фактор создаёт определённые ограничения при использовании буксирной лебёдки для регулирования натяжения и длины буксирного троса в процессе буксировки. Это было принято во внимание при симуляции движения буксируемого судна с применением регули-

рования натяжения буксирного троса, т.е. вводилось ограничение для значения натяжения буксирного троса при его регулировании в пределах тягового усилия буксирной лебёдки (600 кН).

**Результаты симуляции динамики движения буксируемого судна без регулирования натяжения буксирного троса.**

Прежде чем оценивать возможность регулирования натяжения буксирного троса в процессе буксирной операции, необходимо выполнить симуляцию неустойчивого движения буксируемого судна с целью оценки характера изменения его основных кинематических параметров. В качестве начального возмущающего фактора выбрано возмущение по угловой скорости буксируемого судна. Начальное возмущение угловой скорости выбрано равным значению установившейся угловой скорости балкера на циркуляции  $\omega = 0.02 \text{ с}^{-1}$ .

Кроме того, в качестве начальных условий выбраны следующие значения основных кинематических параметров движения буксируемого судна  $v = 4 \text{ уз (2.056 м/с)}$ ;  $\beta_0 = 0$ ;  $\psi_0 = 0$ ,  $Y_{G0} = Y_{F0} = Y_{A0} = 0$ , а также параметров буксирного троса  $l = 3 \times L = 515 \text{ (м)}$ ,  $\theta_0 = 0$ . Натяжение буксирного троса зависит от выбранной скорости буксировки  $v$ , поэтому отдельно не задаётся, при скорости буксировки  $v = 4 \text{ уз}$ ,  $T = 101 \text{ кН}$ .

Для оценки влияния натяжения буксирного троса на динамику движения буксируемого судна в графической форме представлены результаты симуляции на рисунке 2.

Из рисунка 3 следует, что натяжение буксирного троса существенно влияет на амплитуду и период колебательных движений буксируемого судна, вызванных начальным возмущением. Если

затухание колебательного процесса при  $T = 100 \text{ кН}$  наступает в районе 30 минут после его начала, то при  $T = 400 \text{ кН}$  – время затухания укорачивается в двое.

Аналогичная картина наблюдается и с поперечными смещениями заданных точек буксируемого судна. Для подтверждения сделанных выводов в таблице 3 представлен «срез» значений всех интересующих нас параметров на 10-ой минуте с момента начала колебательного процесса при различных значениях длины буксирного троса/и скорости буксировки  $v$ . Ссылаясь на данные, представленные в таблице 3, можно сделать дополнительные выводы о зависимости значений кинематических параметров буксируемого судна от длины буксирного троса и скорости буксировки. В частности, уменьшение длины буксирного троса ведёт к уменьшению поперечных смещений буксируемого судна с заданного курса буксировки, особенно это заметно при малой скорости буксировки. А увеличение скорости буксировки существенно снижает значения основных кинематических параметров в процессе колебательных движений буксируемого судна.

Как видим из результатов симуляции колебательного движения буксируемого судна при наличии возмущения, к угасанию этих колебаний приводит увеличение скорости буксировки, уменьшение длины буксирного троса. И в том, и в другом случае, неизбежно растёт натяжение буксирного троса, на которое реагируют практически все параметры, характеризующие динамику движения буксируемого судна. Выберем один из этих параметров в качестве управляемого натяжением буксирного троса.

Таблица 3 – Значения кинематических параметров движения буксируемого судна в момент времени  $t = 600 \text{ с}$ .

<b><math>v = 4 \text{ уз (2.056 м/с)}</math>, <math>T = 101.2 \text{ кН}</math></b>						
$l, \text{ м}$	100	200	300	400	500	600
$\beta^{\circ}$	3.8	-1.9	-3.3	-3.9	-4.03	-4.1
$\varphi^{\circ}$	-17.4	-10.8	-7.1	-5.2	-4.4	-3.7
$\psi^{\circ}$	-8.5	-13.7	-12.9	-11.6	-10.5	-9.5
$\omega, \text{ с}^{-1}$	0.001	0.0004	0.0001	-0.00004	-0.0001	-0.0002
$Y_G, \text{ м}$	-1.0	35	55	66	74	79
$Y_F, \text{ м}$	-14	15	36	49	58	65
$Y_A, \text{ м}$	12	55	74	83	90	93
<b><math>v = 8 \text{ уз (4.112 м/с)}</math>, <math>T = 404.8 \text{ кН}</math></b>						
$\beta^{\circ}$	0.34	1.1	0.9	0.8	0.7	0.7
$\varphi^{\circ}$	1.2	0.6	0.2	0.1	0	-0.1
$\psi^{\circ}$	1.0	0.5	-0.3	-0.6	-0.8	-0.9
$\omega, \text{ с}^{-1}$	-0.00009	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	-0.0001
$Y_G, \text{ м}$	-2	0	3	5	8	10
$Y_F, \text{ м}$	-1	0	3	4	7	8
$Y_A, \text{ м}$	-3	0	3	6	9	11

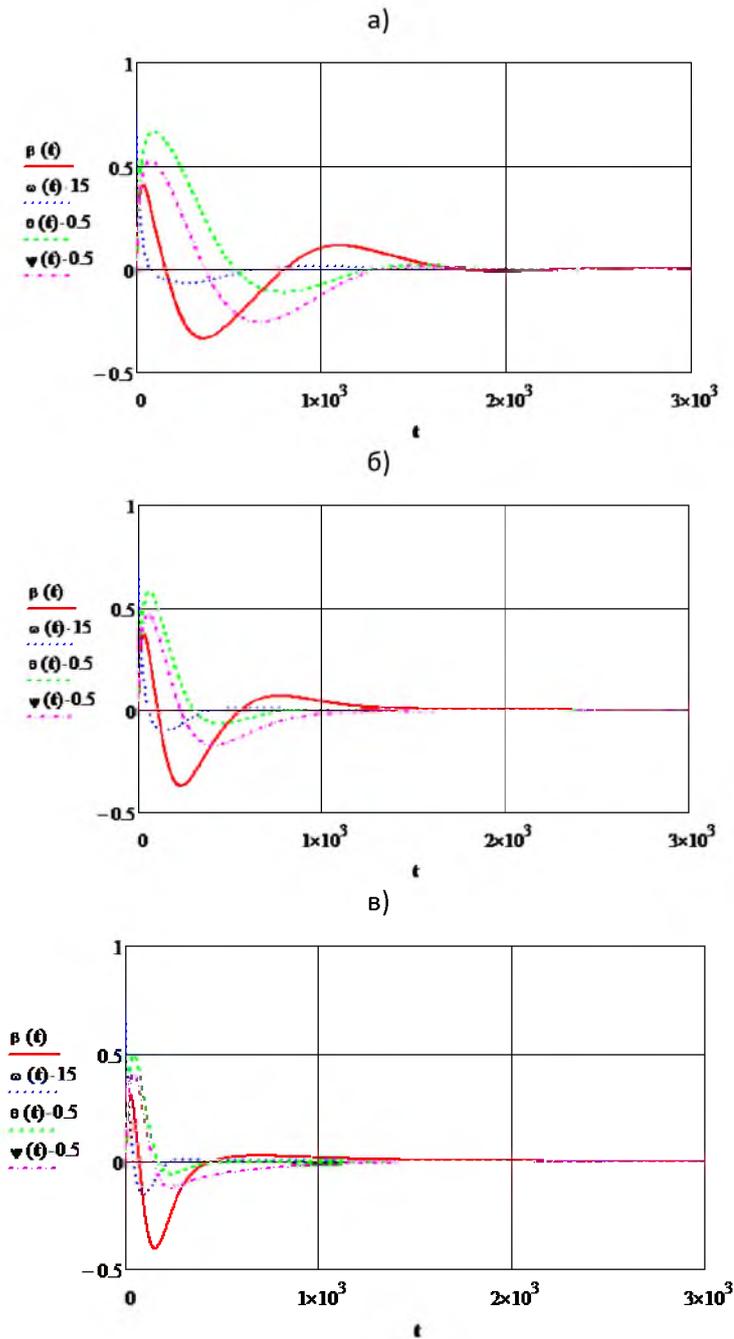


Рисунок 3 – Изменение кинематических параметров движения буксируемого судна при различном натяжении буксирного троса: а –  $T = 100$  кН; б –  $T = 200$  кН; в –  $T = 400$  кН.

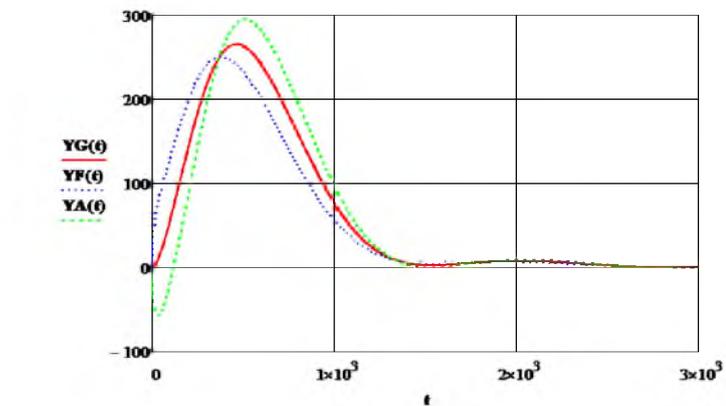


Рисунок 3 – Поперечные смещения заданных точек буксируемого судна в процессе колебательного движения ( $v = 4$  уз,  $T = 101$  кН,  $l = 515$  м)

В данном случае, представляется наиболее значимым из них – величина поперечного смещения кормовой точки буксируемого судна  $Y_A$ . Для убедительности сделанного нами выбора, приведём в графической форме результаты симуляции поперечных смещений трёх разнесённых по длине заданных точек буксируемого судна. Результаты симуляции представлены на рисунке 3. Как видим из рисунка 3, ширина полосы движения на маршруте буксирной операции определяется, прежде всего, значением поперечного смещения кормовой точки буксируемого судна  $Y_A$ . В нашем случае оно достигает максимального значения  $Y_{Amax} = 294$  м на 500-ой секунде после начала колебательного процесса, тогда как  $Y_{Gmax} = 264$  м (483 с) и  $Y_{Fmax} = 249$  м (371 с). И это очевидно.

**Результаты симуляции движения буксируемого судна с изменением натяжения буксирного троса.**

Для решения поставленной задачи введём дополнительно в систему уравнений (4) три уравнения, определяющие изменение натяжения буксирного троса по закону

$$T(t) = T_0 + k_y |Y_A(t)| \tag{5}$$

и, как следствие, двух коэффициентов

$$q_4(t) = \frac{T(t)}{m_y v} \tag{6}$$

$$r_3 = \frac{T(t)x_T}{I_{zz}} \tag{7}$$

На рисунках 2а, 3 представлены изменения во времени кинематических параметров буксируемого судна при отсутствии регулирования натяжения буксирного троса, а на рисунках 4, 5 – при регулировании натяжения буксирного троса.

На рисунке 6 представлен характер изменения натяжения буксирного троса при его регулировании по закону (5), коэффициент усиления  $k_y = 8$ .

Для наглядности в таблице 4 представлены результаты симуляции с различными значениями скорости буксировки и длины буксирного троса.

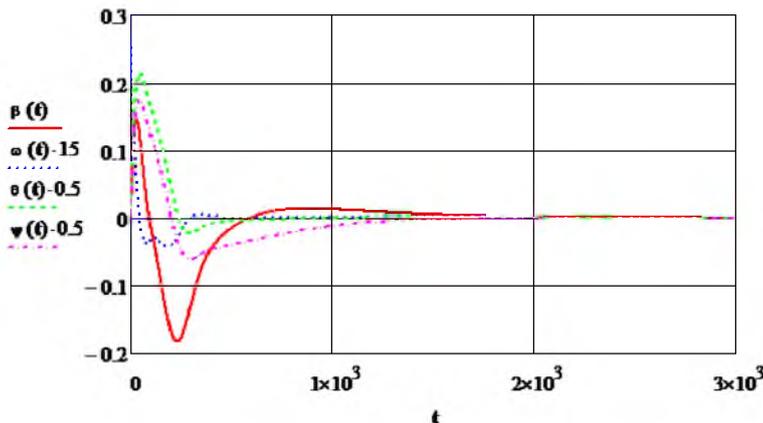


Рисунок 4 – Изменения кинематических параметров буксируемого судна при регулировании натяжения буксирного троса ( $v = 4$  уз,  $l = 515$  м)

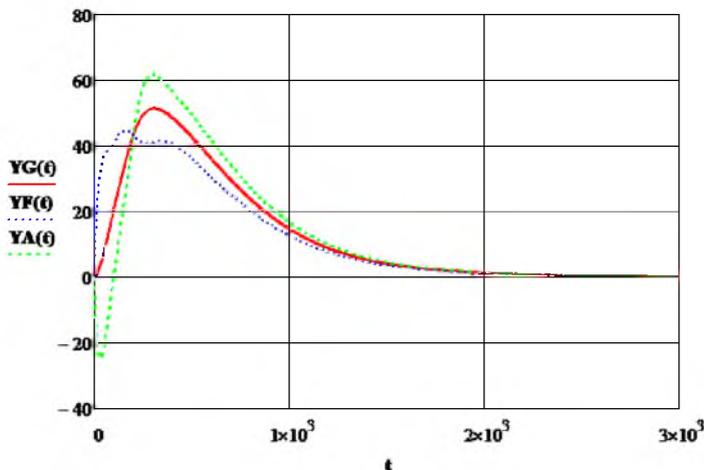


Рисунок 5 – Изменение поперечных смещений заданных точек буксируемого судна при регулировании натяжения буксирного троса судна ( $v = 4$  уз,  $l = 515$  м)

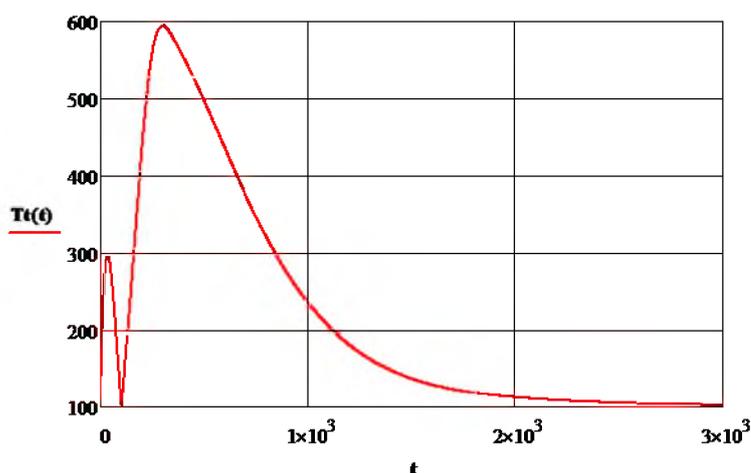


Рисунок 6 – Изменение натяжения буксирного троса

Таблица 4 – Значения амплитудных значений кинематических параметров буксируемого судна при изменении натяжения буксирного троса

Скорость буксировки, уз (м/с)	Длина буксирного троса $l$ , м	Амплитудные значения кинематических параметров буксируемого судна в процессе буксировки (время в с)							Максимальное натяжение буксирного троса $T_{max}$ , кН	
		$\beta^\circ$ (с)	$\omega$ , с <sup>-1</sup> (с)	$\theta^\circ$ (с)	$\psi^\circ$ (с)	$Y_G$ , м (с)	$Y_F$ , м (с)	$Y_A$ , м (с)		
<i>без регулирования натяжения буксирного троса в процессе буксировки</i>										
4 (2.056)	600	9.9 (39)	-0.002 (250)	28.9 (85)	24.0 (68)	98 (439)	89 (368)	111 (515)	-	
	200	9.6 (40)	-0.002 (223)	37.0 (96)	22.7 (77)	74 (370)	64 (264)	93 (411)	-	
	<i>с регулированием натяжения буксирного троса в процессе буксировки</i>									
	600	8.4 (31)	-0.003 (202)	24.0 (55)	20.0 (40)	53 (315)	46 (170)	62 (302)	598	
	200	7.9 (27)	-0.003 (169)	30.0 (30)	19.0 (48)	42 (257)	37 (139)	58 (252)	563	
<i>без регулирования натяжения буксирного троса в процессе буксировки</i>										
6 (3.084)	600	6.6 (34)	-0.002 (136)	19.0 (56)	16.0 (59)	45 (357)	41 (256)	53 (376)	-	
	200	6.2 (34)	-0.002 (130)	24.0 (56)	15.0 (51)	35 (267)	32 (137)	46 (294)	-	
	<i>с регулированием натяжения буксирного троса в процессе буксировки</i>									
	600	6.1 (30)	-0.002 (158)	17.0 (49)	15.0 (41)	34 (299)	31 (158)	41 (302)	556	
	200	6.0 (26)	-0.002 (68)	22.0 (41)	14.0 (40)	27 (241)	25 (83)	37 (245)	524	

Натяжение буксирного троса изменяется за счёт увеличения скорости буксировки с 4 уз до 6 уз. Из данных таблице видно, что увеличение скорости буксировки, а, следовательно, и натяжения буксирного троса приводит к существенному изменению амплитудных значений кинематических параметров движения буксируемого судна, особенно это заметно при сочетании изменения скорости буксировки и изменении длины буксирного троса. Так, например, при увеличении скорости буксировки на 2 уз и длины буксирного троса на 200 метров, величина поперечного смещения кормовой точки буксируемого судна уменьшается в три раза. При этом следует отметить, что характер изменения остальных параметров не имеет такого

не так заметен. Это требует отдельного изучения, тем не менее мы достигли желаемого результата.

#### Заключение.

Материалы статьи убедительно доказывают возможность управлять движением буксируемого судна, регулируя натяжение буксирного троса. Причём натяжение буксирного троса может регулироваться в процессе буксировки изменением скорости буксировки, длины буксирного троса в автоматическом режиме при заданном законе регулирования. В качестве управляемой координаты может использоваться любой кинематический параметр движения буксируемого судна, в этом случае предпочтительнее использовать поперечное отклонение крайней кормовой точки буксируемого судна.

**Литература**

1. Богданов, Б.В. О рывкливости морских барж / Б.В. Богданов. –Л.: Водтрансиздат, 1953. – 60 с.
2. Мастушкин Ю. М. Управляемость промысловых судов.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981 – С. 232
3. Першиц, Р.Я. Управляемость и управление судном / Р.Я. Першиц. – Л.: Судостроение, 1983. –. 272 с.: ил.
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. Оценка безопасности буксирной операции методами математического моделирования/ Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев. – М.: Моркнига, 2015.– 144 с.
7. 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.
8. Юдин, Ю.И. Учёт удлинения буксирного троса при моделировании процесса буксировки/Ю.И. Юдин, Г.Ю. Иштейкин//Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – №3 (88). – С. 60-71.
9. 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.
10. Bemitsas M. M; Kekridis, N. S. (1985), Simulation and Stability of Ship Towing, International Shipbuilding Progress, Vol. 32, No. 369, pp.112-123.
11. Bemitsas, M.; Kekridis, N. S. (1986), Nonlinear Stability Analysis of Ship Towing by Elastic Rope, Journal of Ship Research, Vol. 30, No. 2, pp.136-146.
12. Franz S. Hover, and al. Calculation of Dynamic Motions and Tensions in Towed Underwater Cables/JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 19, 3, July 1994. P. 449 – 457.
13. Jiang, T.; Henn, R.; Sharma, S. D. (1998), Dynamic Behavior of a Tow System under an Autopilot on the Tug, International Symposium and Workshop on Forces Acting on a Manoeuvring Vessel (MAN'98), Val de Reuil.
14. Kijima, K.; Varyani, K. (1985), Wind Effect on Course Stability of Two Towed Vessels, Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 158, pp.137-148.
15. Lee, M. L. (1989), Dynamic Stability of Nonlinear Barge-Towing System, Appl. Math. Modeling, Vol. 13, pp.693-701.
16. Shigehiro, R., Ueda, K., Nakayama, H. (1998), 'Experimental Studies For Stopping and Hard Turning Maneuver of Tow And Towed Vessels'

(in Japanese), Journal Kansai Society. Naval Architects, Japan, No. 230, pp.165-175.

17. Strandhagen, A. G.; Schoenherr, K.; Kobayashi, F.M; (1950), The Stability on Course of Towed Ships, Trans. SNAME, Vol. 58, pp.32-46.
18. Клоев В.В. Оценка рисков и управление рисками в практике судовождения [Текст] / В.В. Клоев, С.И. Кондратьев, В.И. Гульчинский // Эксплуатация морского транспорта.– 2016.– № 3 (80).
19. Кондратьев, С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения [Текст] / С.И. Кондратьев: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.–Новороссийск: Новороссийская государственная морская академия, 2004.

**REFERENCES**

1. Bogdanov, B. V. O rysklyivosti morskikh barzh / B. V. Bogdanov. – L.: Vodtransizdat, 1953. – 60 s.
2. Mastushkin YU. M. Upravlyaemost' promyslovykh sudov. M., Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981 – S.232
3. Pershic, R. YA. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom / R. YA. Pershic. – L.: Sudostroenie, 1983. –. 272 s.: il.
4. YUdin E. B., Makovskij A. G. Analiz samoproduzvol'nogo ryskan'ya buksiruemykh 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., Ocenka bezopasnosti buksirnoj operacii metodami matematicheskogo modelirovaniya/ YU. I. YUdin, S. V. Pashencev. – M.: Morkniga, 2015.– 144 s.
7. YUdin, YU.I. Raschyot usilij, deystvuyushchih 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.
8. YUdin, YU.I. Uchyot udlineniya buksirnogo trosa pri modelirovanii processa buksirovki/YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin//Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2018. - №3 (88). – S. 60 – 71.
9. YUdin, YU.I. CHislennoe modelirovanie avtokolebanij buksiruемого sudna/YU.I. YUdin, V.V. Kayan//Vestnik MGTU: tr. Murman. gos. tekhn. un-ta. – 2013. – E. 16. №1. S. 197 -201.
10. Bemitsas M. M; Kekridis, N. S. (1985), Simulation and Stability of Ship Towing, International Shipbuilding Progress, Vol. 32, No. 369, pp.112-123.
11. Bemitsas, M.; Kekridis, N. S. (1986), Nonlinear Stability Analysis of Ship Towing by Elastic Rope, Journal of Ship Research, Vol. 30, No. 2, pp.136-146.

12. Franz S. Hover, and al. Calculation of Dynamic Motions and Tensions in Towed Underwater Cables/JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 19, 3, July 1994. P. 449 – 457.
13. Jiang, T.; Henn, R.; Sharma, S. D. (1998), Dynamic Behavior of a Tow System under an Autopilot on the Tug, International Symposium and Workshop on Forces Acting on a Manoeuvring Vessel (MAN'98), Val de Reuil.
14. Kijima, K.; Varyani, K. (1985), Wind Effect on Course Stability of Two Towed Vessels, Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 158, pp.137-148.
15. Lee, M. L. (1989), Dynamic Stability of Nonlinear Barge-Towing System, Appl. Math. Modelling, Vol. 13, pp.693-701.
16. Shigehiro, R., Ueda, K., Nakayama, H. (1998), 'Experimental Studies For Stopping and Hard Turning Maneuver of Tow And Towed Vessels' (in Japanese), Journal Kansai Society. Naval Architects, Japan, No. 230, pp.165-175.
17. Strandhagen, A. G.; Schoenherr, K.; Kobayashi, F.M; (1950), The Stability on Course of Towed Ships, Trans. SNAME, Vol. 58, pp.32-46.
18. Klyuev V.V. Ocenka riskov i upravlenie riskami v praktike sudovozhdeniya [Tekst] / V.V. Klyuev, S.I. Kondrat'ev, V.I. Tul'chinskij // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3 (80).
19. Kondrat'ev, S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya [Tekst] / S.I. Kondrat'ev avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossiyskaya gosudarstvennaya morskaya akademiya. Novorossiysk, 2004

УДК 656.61

DOI: 10.34046/aumsuomt97/7

## ПРИМЕР ВЫБОРА МАРШРУТА СУДНА В ОБХОД ЗОНЫ ШТОРМА С ПОМОЩЬЮ BONVOYAGESYSTEM (BVS 8)

*Л.Б. Астреина, кандидат географических наук,*

*Л.А.Першина, старший преподаватель*

*Н.А. Штырхунова, кандидат филологических наук*

В статье приводятся сведения о BonVoyageSystem (BVS 8) StormGeo, рассматривается вариант снижения воздействия погодных факторов на безопасность и протяженность рейса за счет оптимального, заранее просчитанного маршрута в обход зоны урагана Салли, формулируются выводы.

**Ключевые слова:** BonVoyageSystem (BVS 8), ураган Салли, ветер, шторм.

## EXAMPLE OF SHIP'S ROUTE OPTION TO AVOID A STORM AREA BY USING BONVOYAGESYSTEM (BVS 8)

*Astraina L. B., L. A. Pershina, Shtyrhunova N. A.*

The article contains information on Bon Voyage System (BVS 8) StormGeo. It is considered a variant of reducing the impact of weather factors on the safety and length of the passage due to the optimal Avoiding an area of haricate Sally, pre-calculated route avoiding an area of Sally hurricane.

**Keywords:** Bon Voyage System (BVS 8), haricate Sally, wind, storm.

### Введение.

Ураганы и штормы являются угрозой безопасного мореплавания. Так, в северной части Атлантики сезон ураганов наблюдается с июня по ноябрь, поэтому следует уделять более пристальное внимание вопросу уклонения судов от сильных штормов. На помощь морякам приходят современные системы передачи данных о погоде. Судоводители могут получать текущую и практическую информацию о погоде несколько раз в сутки.

Центры прогноза погоды по всему миру ежедневно публикуют огромный объем данных об условиях погоды, в зонах тропических циклонов морского ураганного центра США (НЧС) и

др. Коммерческие фирмы, занимающиеся маршрутизацией, транслируют необходимые сведения через специальные системы, такие, как BonVoyageSystem (BVS 8) StormGeo. «Советы с берега» о наиболее оптимальном маршруте добавляют уверенность и обеспечивают дополнительную безопасность мореплавания.

### Методы и материалы.

Система BonVoyageSystem (BVS 8) была разработана норвежской компанией StormGeo в соответствии с требованиями безопасности мореплавания, которые регламентируются целым рядом международных инструментов, среди которых Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), Международный