

## Определение минимально допустимой скорости танкера при выполнении швартовной операции в условиях ветра

Ю.И. Юдин<sup>1</sup>, А.Ю. Юдин<sup>2</sup>, Г.И. Мартюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

<sup>2</sup> ОАО "Мурманское морское пароходство"

**Аннотация.** Потеря управляемости судна в процессе выполнения швартовной операции влечет за собой серьезные последствия, в ряду которых наиболее опасными являются столкновения швартуемого судна с объектом швартовки или навалы на них. Для повышения безопасности швартовной операции судоводитель должен обладать достаточными знаниями о характере поведения судна в различных условиях плавания, в частности, уметь определять минимально допустимую скорость движения судна в условиях ветрового воздействия. Решение данной задачи рассмотрено применительно к условиям выполнения точечной швартовки танкера к монобуй, являющемуся составным элементом устройства подсоединения танкера к нефтепроводу.

**Abstract.** The navigator should possess sufficient knowledge concerning vessel behaviour in different navigation conditions. To determine the minimum allowable speed of the vessel movement under conditions of wind influence is of great importance for safe mooring. The paper considers the solution of this task as applied to the conditions of point mooring of a tanker to a buoy which is an element of the tanker connecting device to the oil-pipe line.

### 1. Введение

Любая швартовная операция выполняется в условиях предельно малых скоростей, что неизбежно увеличивает относительное влияние ветра на управляемость судна.

Ошибка при выборе скорости швартовки может привести к потере управляемости танкера и, как следствие, к сходу его с заданной траектории сближения. При движении танкера к монобуй судоводителю неизбежно придется снижать скорость танкера. При неучете или неправильном учете ветрового воздействия потеря управляемости весьма вероятна, что, в свою очередь, приведет к возникновению аварийной ситуации, выход из которой может быть невозможен. Последствием такого развития событий может стать серьезная авария, а это крайне опасно при работе с нефтепродуктами.

В связи с вышеизложенными обстоятельствами рассмотрим характер поведения танкера при движении с малой скоростью в условиях ветрового воздействия с целью оценки управляемости при выполнении швартовной операции.

### 2. Оценка устойчивости движения танкера при ветровой нагрузке

Так как танкер имеет кормовую надстройку, то положение центра парусности (ЦП) будет смещено от плоскости мидель-шпангоута в сторону кормы, что подтверждается расчетами и результатами натурного эксперимента ( $x_a = -9.73$  м;  $x_b = -6.93$  м – значения абсциссы ЦП в грузу и в балласте, соответственно). Поэтому при прямолинейном движении постоянно действующий на танкер аэродинамический момент стремится развернуть его в сторону ветра, т.е. при ветре справа танкер будет постоянно менять курс в сторону его увеличения и наоборот. Действие на танкер поперечной составляющей аэродинамической силы приведет к дрейфу в сторону, противоположную отклонению от курса. Для того, чтобы добиться устойчивого движения заданным курсом, необходимо постоянно перекладывать руль, тем самым компенсируя действие аэродинамического момента  $M_a$  и не только. При дрейфе на подводную часть корпуса танкера будет действовать гидродинамическая сила, поперечная составляющая которой  $Y_k$  и момент  $M_k$  будут демпфировать движение танкера в направлении действия ветра. В качестве компенсирующей силы выступает поперечная составляющая гидродинамической силы на руле  $Y_r$ , значение которой имеет ограничения, связанные с конструктивными особенностями рулевого устройства. Во-первых, руль имеет ограничение по углу перекладки ( $\alpha_{r \max} = \pm 35^\circ$ ). Во-вторых, угол перекладки руля, при котором поперечная составляющая  $Y_r$  достигает максимума, как правило, находится в диапазоне  $20^\circ < \alpha_r < 30^\circ$ . В-третьих, движение танкера с углом дрейфа приводит к уменьшению угла атаки пера руля, что, в свою очередь, уменьшает величину поперечной составляющей на руле. Указанные обстоятельства существенно ограничивают возможности судоводителя в выборе скорости танкера и направления его движения по отношению к направлению ветра. При прямолинейном движении танкера в условиях реального ветра и волнения необходимо определить допустимое значение угла перекладки руля  $\alpha_{r0}$  и по его значению оценивать возможность устойчивого движения:

$$\alpha_{r\partial} = \alpha_{r\max} - \alpha_{rw} - \alpha_{r\text{т.в}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{rw}$  – угол перекладки, обеспечивающий выравнивание угла рыскания танкера на волнении (по результатам моделирования движения танкера в условиях 3- и 5-балльного волнения его значение 5-9°);  $\alpha_{r\text{т.в}}$  – угол перекладки, необходимый для выравнивания угла рыскания танкера на тихой воде (до 5°).

Очевидно, что если при действии ветра заданной силы и наихудшего, с точки зрения потери управляемости, направления по отношению к танкеру последний способен двигаться прямолинейно, то рассматривать случай криволинейного движения не имеет смысла, поскольку любой другой курс и, соответственно, направление ветра будут более благоприятны. Учитывая это, рассмотрим управляемость танкера при движении в условиях ветра на прямом курсе, причем решать задачу будем, исходя из ряда общепринятых условностей, существенно упрощающих методику расчета, но не приводящих к существенным погрешностям. Для оценки достоверности данного утверждения выполним модельный эксперимент без введения каких-либо упрощений и сравним результаты. Для моделирования используем систему уравнений

$$\begin{cases} d\nu/dt = [X/m(1+k_{11})]\cos\beta + [Y/m(1+k_{22})]\sin\beta + B\nu\omega \sin 2\beta; \\ d\beta/dt = -(1/\nu)\{[X/m(1+k_{11})]\sin\beta + [Y/m(1+k_{22})]\cos\beta + (b_1\sin^2\beta + b_2\cos^2\beta)\omega; \\ d\omega/dt = M/I_z(1+k_{66}). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\nu$  – скорость танкера;  $\beta$  – угол дрейфа;  $\omega$  – угловая скорость судна;  $m$  – масса судна;  $k_{11}, k_{22}, k_{66}$  – присоединенные массы и момент инерции присоединенной массы судна;  $I_z$  – момент инерции массы судна;  $X, Y, M$  – суммы продольных и поперечных составляющих сил и суммарный момент, действующие на судно. При условии устойчивого прямолинейного движения танкера

$$\begin{cases} Y_k - Y_r - Y_a = 0; \\ X_k - X_r - X_a = 0; \\ M_k + M_r - M_a = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Общая схема сил, действующих на танкер при его движении в условиях ветрового воздействия, показана на рис. 1. Из него получим выражения для определения значений скорости  $\nu_R$  и направления  $q_R$  кажущегося ветра, а именно:

$$\nu_R = [\nu_a^2 + \nu^2 + 2\nu\nu_a \cos(q_a - \psi + \beta)]^{0,5}, \quad (4)$$

$$q_R = \arccos\{[\nu + \nu_a \cos(q_a - \psi + \beta)]/\nu_R\} - \beta. \quad (5)$$

С учетом выражений для сил и моментов, входящих в уравнения (3), последние запишутся в виде:

$$0,5C_{ky}\rho\nu^2F_{dp} - 0,5C_{ry}\rho\nu^2F_r - 0,5C_{ay}\rho_a\nu_R^2S_{dp} = 0; \quad (6)$$

$$0,5C_{km}\rho\nu^2F_{dp}L + 0,5C_{ry}\rho\nu^2F_rL - 0,5C_{am}\rho_a\nu_R^2S_{dp}L = 0. \quad (7)$$

Значения коэффициентов сил и моментов, входящих в выражения (6) и (7), приняты следующими:

$$C_{ky} = C_{ky}^\beta + C_{ky}^{\beta\beta}\beta^2; \quad (8)$$

$$C_{ry} = 0,027 + 0,021\alpha_r; \quad (9)$$

$$C_{ay} = K_0 \sin q_R + K_1 \sin 2q_R + K_2 \sin 3q_R + K_3 \sin 4q_R + K_4 \sin 5q_R; \quad (10)$$

$$C_{km} = C_{km}^\beta \beta; \quad (11)$$

$$C_{am} = M_0 \sin q_R + M_1 \sin 2q_R + M_2 \sin 3q_R + M_3 \sin 4q_R + M_4 \sin 5q_R. \quad (12)$$

В данном случае уместно представить полученную нами функциональную зависимость  $C_{ax} = f(q_R)$ , в виде

$$C_{ax} = N_0 + N_1 \sin q_R + N_2 \sin 2q_R + N_3 \sin 3q_R + N_4 \sin 4q_R + N_5 \sin 5q_R. \quad (13)$$

Числовые значения коэффициентов  $C_{ky}^\beta, C_{ky}^{\beta\beta}, C_{km}^\beta$  находят с учетом выводов, сделанных в работе (Степанко, 2005), а значения коэффициентов  $K_n, M_n, N_n$  ( $n = 0, 1, \dots, 4, 5$ ) приведены в таблице.

Подставив выражения для коэффициентов в уравнения (6-7) и разрешив их относительно угла дрейфа  $\beta$ , получим следующую расчетную зависимость:

$$\beta = -f_1 + (f_1^2 + f_2)^{0,5}. \quad (14)$$

Значение угла перекладки руля определим по формуле:

$$\alpha_r = (f_3 - f_4\beta)/f_5. \quad (15)$$

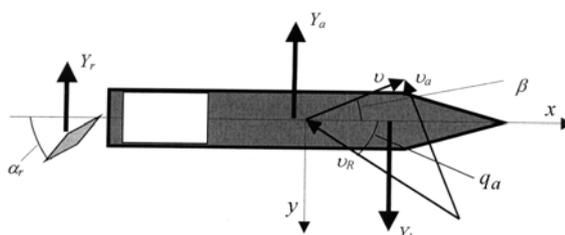


Рис. 1. Силы, действующие на танкер, и план скоростей

Таблица

Состояние загрузки танкера	Значения коэффициентов $K_n, M_n, N_n$					
	$K_0$ $M_0$ $N_0$	$K_1$ $M_1$ $N_1$	$K_2$ $M_2$ $N_2$	$K_3$ $M_3$ $N_3$	$K_4$ $M_4$ $N_4$	$N_5$
В балласте	0,8517	0,0182	0,0274	-0,01	-0,0115	-0,085
	-0,0088	0,0836	-0,0052	0,0071	0,0014	
	0,068	0,712	0,003506	0,03	-0,018	
В грузу	0,7984	0,0005	0,0126	-0,0087	-0,0076	-0,107
	-0,015	0,07	-0,006	0,009	0,001	
	0,1	0,852	$3,133 \cdot 10^{-4}$	-0,008231	-0,037	

В уравнения (14-15) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= (C_{ky}^\beta l_r + C_{my}^\beta) / 2C_{ky}^\beta l_r; \\
 f_2 &= (\rho_a S_{dp} v^2 R / \rho F_{dp} C_{ky}^\beta v^2) (C_{ay} + C_{am} / l_r); \\
 f_3 &= C_{am} (\rho_a / \rho) (v_R / v)^2 S_{dp} / F_{dp} l_r - 0,027 F_r / F_{dp}; \\
 f_4 &= 0,021 F_r / F_{dp}; \\
 f_5 &= C_{km}^\beta - 0,00525 F_r / F_{dp}.
 \end{aligned} \quad (16)$$

С использованием полученных зависимостей рассчитаны значения угла дрейфа  $\beta$  и угла перекладки руля  $\alpha_r$  при различных начальных условиях, характеризующихся такими параметрами, как состояние загрузки танкера, скорость танкера  $v$ , скорость ветра  $v_a$ , направление ветра  $q_a$ , курс танкера  $\Psi$ . Для примера на рис. 2 приведены результаты расчетов при следующих начальных условиях: танкер в балласте; скорость танкера 2 уз; скорость ветра 9,3 м/с; курс танкера 0-180°; направление ветра 0°.

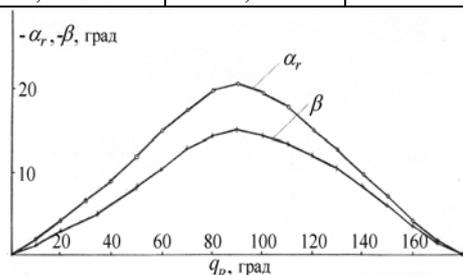


Рис. 2. Зависимость угла перекладки руля  $\alpha_r$  и угла дрейфа  $\beta$  от курсового угла кажущегося ветра  $q_R$

Направление кажущегося ветра, при котором угол перекладки руля  $\alpha_r$  достигает максимального значения, не совпадает с направлением, соответствующим максимальному значению угла дрейфа  $\beta$  танкера. При этом расхождение в значениях указанных направлений увеличивается до 60°, если танкер в грузу, и незначительно уменьшается при уменьшении скорости ветра  $v_a$ . Если танкер в балласте, то расхождение в значениях рассматриваемых в данном случае направлений незначительно и, как правило, не превышает 10-20°. Это объясняется, прежде всего, наличием дифферента на корму и, как следствие, смещением центра гидродинамического давления в сторону мидель-шпангоута. Уменьшение расстояния между точками приложения аэродинамической и гидродинамической сил существенно снижает момент указанной пары сил, при этом снижается и устойчивость танкера на курсе, что требует увеличения угла перекладки руля для сохранения заданного направления движения танкера. Расстояние между рассматриваемыми здесь точками будет минимальным при курсовом угле кажущегося ветра  $q_R = 90 \pm 10^\circ$ , следовательно, и максимальный угол перекладки руля будет при том же значении курсового угла  $q_R$ .

Практический расчет условий потери танкером управляемости под действием ветра был выполнен с использованием математической модели танкера на базе системы уравнений (2). Так как значение угла дрейфа при минимальных скоростях движения танкера достигает существенных значений, для расчета коэффициентов составляющих гидродинамической силы на корпусе  $X_k, Y_k$  и корпусного момента  $M_k$  были использованы зависимости, полученные Н.И. Анисимовой (1968) и А.П. Тумашиком (1978). При этом коэффициент продольной составляющей:

$$C_{kx} = F_0 + (0,075 - |F_0| \sin^3[\pi(1 - \cos F_1)]), \quad (17)$$

где значения коэффициентов  $F_0$  и  $F_1$  определяются по формулам, представленным в работе (Тумашик, 1978). Несложный анализ выражения (17) с учетом указанных формул и основных геометрических параметров корпуса танкера позволяет применить и вторую формулу, предложенную А.П. Тумашиком:

$$C_{kx} = 0,5[C_{kxz} - C_{kx0} - (C_{kx0} - C_{kxz})\cos\beta] + F_2 \sin^2\beta + F_3 \sin^3\beta \sin^2\beta, \quad (18)$$

где  $F_2, F_3$  – коэффициенты, зависящие от геометрических особенностей корпуса танкера и состояния его загрузки, например, для танкера в грузу  $F_2 = 1,346 \cdot 10^{-3}, F_3 = 8,58 \cdot 10^{-2}$ ;

$C_{kx0}$  – коэффициент сопротивления корпуса при движении танкера передним ходом без дрейфа  $\beta = 0$ ;  
 $C_{kxz}$  – коэффициент сопротивления корпуса танкера при движении задним ходом без дрейфа, определяемый по формуле Н.И. Анисимовой:

$$C_{kxz} = -0,075 \sin\{\pi - \arcsin(C_{kx0}/0,075)\} \cdot (1 - 180/\beta_0). \quad (19)$$

Здесь  $\beta_0$  – угол дрейфа, при котором  $C_{kx} = 0$ . Его значение может быть определено по формуле, полученной авторами с использованием материалов из (Справочник, 1985):

$$\beta_0 = 90 + (25,665 - 38,9986 + 13,332\sigma^2)/|\sigma - 0,899|. \quad (20)$$

По результатам многочисленных испытаний установлено, что влияние вращения на силу сопротивления и боковую силу на корпусе невелико. Поэтому в наших расчетах этим влиянием мы пренебрегли со ссылкой на выводы, сделанные А.П. Тумашиком (Справочник, 1985). Он утверждает, что коэффициенты составляющих гидродинамической силы на корпусе зависят только от угла дрейфа и при вращении судна остаются такими же, как и при прямолинейном движении. С учетом сказанного значение поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе танкера определялось зависимостью, полученной Н.И. Анисимовой (1968):

$$C_{ky} = 0,5 C_{ky}^\beta \sin(2\beta) \cos\beta + C_{ky}^{\beta\beta} \sin^2\beta + C_{ky}' \sin^4(2\beta), \quad (21)$$

где значение коэффициента  $C_{ky}'$  может быть определено как графически, так и аналитически по данным, представленным в работах (Анисимова, 1968; Першци, 1983; Справочник, 1985).

Учитывая, что влияние вращения танкера на гидродинамический корпусной момент существенно и им нельзя пренебрегать, коэффициент момента рассчитывался по формуле:

$$C_{km} = C_{km}^\beta - 0,059 C_{ky}^{\beta\beta} (L/v)^2 \omega |\omega| - 0,318 (C_{km}^\omega + C_{km}') [1 + (L/v)^2 \omega^2] \sin\{\pi\omega[(v/L)^2 + \omega^2]^{0,5}\}, \quad (22)$$

в которой

$$C_{km}' = C_{km}^\omega + F_4 |\sin\beta| + F_5 \{1 - \cos[(2\pi - 4|\beta|)\cos\beta + 0,1|\sin\beta] \}. \quad (23)$$

Здесь значения функций  $F_4, F_5$  зависят от состояния загрузки танкера, в частности:

- для танкера в балласте  $F_4 = 0,0985 - C_{km}^\omega, \quad F_5 = 0,05;$
- для танкера в грузу  $F_4 = 0,0601 - C_{km}^\omega, \quad F_5 = 0,0622.$

Разработанная таким образом математическая модель была использована для нахождения условий потери танкером управляемости под действием ветра. Расчет сводился к определению отношения скорости ветра к скорости танкера, при котором средний угол перекладки руля  $\alpha_r$ , необходимый для прямолинейного движения танкера, равен допустимому углу перекладки руля  $\alpha_{r0}$ . В итоге была получена диаграмма для определения допустимой минимальной скорости швартовки при различных скорости ветра и состоянии загрузки танкера (рис. 3).

Попадание в верхнюю часть диаграммы, относительно кривой, соответствующей состоянию загрузки танкера, является недопустимым с точки зрения безопасности швартовочной операции.

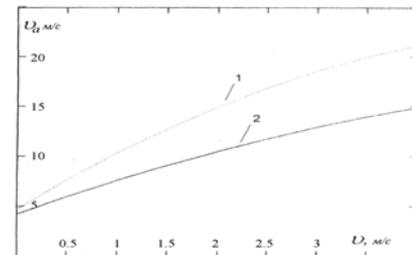


Рис. 3. Диаграмма для определения минимальной скорости швартовки: 1 – танкер в грузу; 2 – танкер в балласте

## 2. Оценка результатов использования носового подруливающего устройства (НПУ)

Использование НПУ в определенной степени уменьшает отрицательные последствия воздействия ветра на управляемость танкера (угол перекладки руля, необходимый для удержания танкера на заданной траектории движения, уменьшается), о чем свидетельствуют результаты моделирования движения танкера при одновременном использовании руля и НПУ для удержания танкера на прямом курсе (рис. 4). Однако ширина диапазона возможных значений скорости ветра, при котором возможно устойчивое движение танкера, существенно не увеличивается из-за применения НПУ. Более того, при определенном сочетании начальных условий движения танкера, уменьшение угла перекладки руля за счет использования НПУ сочетается с существенным ростом угла дрейфа, что также неприемлемо при движении по заданной траектории, так как существенно осложняет управление судном.

Обычно считается, что предельно допустимый угол дрейфа судна составляет  $30^\circ$ , и если в условиях заданного ветра судно не может двигаться с меньшим углом дрейфа, оно признается неуправляемым (Справочник, 1985).

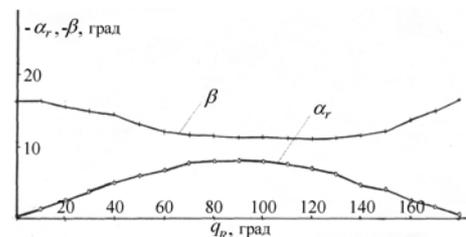


Рис. 4. Зависимость угла перекладки руля  $\alpha_r$  и угла дрейфа  $\beta$  от курсового угла кажущегося ветра  $q_R$  при совместной работе руля и НПУ ( $v = 1,5$  м/с,  $v_a = 9,2$  м/с, НПУ работает в режиме 100%-й нагрузки, танкер в балласте)

Оценка устойчивости прямолинейного движения танкера в условиях ветрового воздействия позволяет сделать вывод о невозможности удержания танкера на заданном курсе при совместной работе рулевого и подруливающего устройств. При выборе указанной схемы управления движением танкера устойчивость не наблюдается даже при отсутствии ветра. Теоретически возможно подобрать определенное соотношение угла перекадки руля и режима работы НПУ, при которых танкер может двигаться поступательно в заданном направлении; более того, теоретически поступательное движение в заданном направлении можно осуществить при использовании в качестве средства управления только НПУ. Результаты моделирования такого движения показаны на рис. 5.

В процессе моделирования было установлено, что применение НПУ в качестве средства управления для удержания ДП танкера в заданном направлении может привести к неожиданной потере управляемости при непрогнозируемом перераспределении точек приложения главных сил (резкий удар волны, порыв ветра, сочетающийся со сменой его направления, и т.п.). НПУ может быть использовано только для кратковременного (до 30 с) удержания ДП танкера в заданном направлении или изменения направления ДП работой НПУ в импульсном режиме.

Используя НПУ совместно с рулем в условиях ветрового воздействия, судоводитель может выбирать вариант возможного движения танкера с учетом текущей цели маневрирования. Если требуется развернуть ДП танкера, имея минимальное продольное смещение, направление тяги НПУ должно быть противоположно направлению поперечной составляющей гидродинамической силы на руле (при перекадке руля на правый борт выброс струи НПУ должен происходить в сторону левого борта). Смещение центра парусности в сторону кормы от плоскости мидель-шпангоута будет способствовать созданию положительного аэродинамического момента ( $M_a > 0$ ), направление которого будет совпадать с направлением действия момента рулевой силы и момента, создаваемого тягой НПУ, что приведет к ускоренному развороту танкера. Если требуется обеспечить плоскопараллельное перемещение танкера, направление тяги НПУ должно совпадать с направлением поперечной составляющей гидродинамической силы на руле (при перекадке руля на пр/б выброс струи НПУ должен происходить в сторону пр/б).

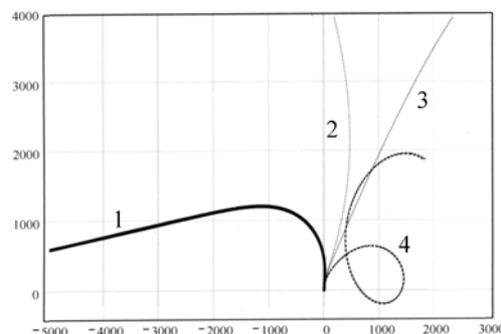


Рис. 5. Траектория движения танкера при удержании на курсе с помощью НПУ: 1 – без НПУ; 2 – НПУ 50 % тяги; 3 – НПУ 60 % тяги (удержание на прямом курсе); 4 – НПУ 100 % тяги  
( $v = 2$  м/с,  $v_a = 12$  м/с,  $q_R = 80^\circ$  пр/б)

### 3. Заключение

При выполнении сложных маневров в условиях ветрового воздействия судоводитель обязан учитывать характер этого воздействия на управляемость судна, т.к. при определенных соотношениях скорости судна и скорости ветра возможна потеря управляемости. Результаты исследований, представленные в статье, наглядно иллюстрируют этот факт. Избежать потери управляемости можно регулированием скорости судна и направления его движения относительно направления ветра. Диаграмма для оценки управляемости судна, предложенная в статье, имеет практический смысл только для танкеров типа "Астрахань". Для любого другого типа судна подобную диаграмму можно построить, проведя серию модельных экспериментов на базе математической модели, разработанной для данного типа судна.

### Литература

- Анисимова Н.И.** Позиционные гидродинамические характеристики судов при произвольных углах дрейфа. *Судостроение*, № 5, с.5-11, 1968.
- Першиц Р.Я.** Управляемость и управление судном. *Л., Судостроение*, 272 с., 1983.
- Справочник по теории корабля. В 3 т. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. Под ред. Я.И. Войткунского. *Л., Судостроение*, т.3, 544 с., 1985.
- Степачно Р.Г.** Разработка способов идентификации математической модели судна с целью решения практических задач судовождения. *Мурманск, автореф. дис. канд. техн. наук*, 21 с., 2005.
- Тумашик А.П.** Расчет гидродинамических характеристик судна при маневрировании. *Судостроение*, № 5, с.10-15, 1978.