

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-567-578

MODELING THE INFLUENCE OF WIND ON SHIP CIRCULATION ELEMENTS

A. N. Anosov, A. A. Lentarev

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

When solving a number of practical problems of navigation and ship maneuvering, it is necessary to take into account the effect of wind on the parameters of the ship motion, including curvilinear motion, in particular, on circulation. There is very little information on this problem, especially in terms of quantitative estimates of the wind impact on circulation elements. Based on this, the purpose of this work is to study the effect of wind on the circulation elements based on mathematical modeling and to determine quantitative estimates of this effect when changing such factors as wind speed and heading angle, ship length and rudder angle. The simulation is carried out on a certified navigation simulator Transas NT Pro-5000. The mathematical model of vessel movement and wind effect used in this simulator is presented in the paper. A description of three simulated container ships with similar aerodynamic characteristics is given for the various heading angle and velocity of the wind before the start of the turn. In some experiments, the rudder angle is changed. The results of the simulation are presented in tabular and graphical forms. Quantitative estimates of the displacement of the turning points on the circulation by 90°, 180°, 270° and 360° at wind influence from the corresponding points of circulation in the absence of wind. The graphical dependences of these displacements on the heading angle of the wind and their analytical approximations are presented. The ranges of the wind heading angles at which the maximum effect of the wind on the circulation elements is observed are established. Quantitative estimates of the inversely proportional dependence of the circulation elements on the ship length are calculated. The hypotheses of the other authors about the direction of displacement of the circulation curve under wind action are tested. To verify the validity and reliability of the results obtained, it is necessary to perform similar studies using other mathematical models and natural experiments.

Keywords: vessel, circulation, modeling, wind action, mathematical model, simulator.

For citation:

Anosov, Alexey A., and Alexander A. Lentarev. "Modeling the influence of wind on ship circulation elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 567–578. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-567-578.

УДК 656.61.052.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА НА ЭЛЕМЕНТЫ ЦИРКУЛЯЦИИ СУДНА

А. Н. Аносов, А. А. Лентарёв

МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является учет в ходе решения практических задач влияния ветра на параметры движения судна, в том числе при криволинейном движении, в частности, на циркуляции. Отмечается, что объем информации по этой проблеме крайне мал, особенно в части количественных оценок ветрового воздействия на элементы циркуляции. Исходя из этого цель данной работы заключалась в исследовании воздействия ветра на элементы циркуляции на основе математического моделирования и определении количественных оценок этого воздействия при изменении таких факторов, как скорость и курсовой угол ветра, длина судна, угол перекладки руля. Моделирование выполнялось на сертифицированном навигационном тренажере Transas NT Pro-5000. В работе приведена используемая в этом тренажере математическая модель движения судна и учета ветрового воздействия. Дано описание трех моделируемых судов-контейнеровозов с похожими аэродинамическими характеристиками. Выполнено моделирование движения судов на циркуляции при различных значениях курсового угла ветра перед началом поворота и при двух значениях скорости ветра. В отдельных экспериментах изменялся угол перекладки руля. Результаты моделирования представлены в табличном и графическом виде. Определены количественные оценки смещения точек поворота на циркуляции на 90°, 180°, 270° и 360° при ветровом воздействии от соответствующих точек циркуляции при отсутствии

ветра. Представлены графические зависимости этих смещений от курсового угла ветра и их аналитические аппроксимации. Установлены диапазоны курсовых углов ветра, при которых наблюдалось максимальное влияние ветра на элементы циркуляции. Рассчитаны количественные оценки обратно пропорциональной зависимости элементов циркуляции от длины судна. Проверены гипотезы других авторов исследований о направлении смещения кривой циркуляции при ветровом воздействии. Отмечается, что для проверки обоснованности и достоверности полученных результатов необходимо выполнение подобных исследований с использованием других математических моделей и натурных экспериментов.

Ключевые слова: судно, циркуляция, моделирование, ветровое воздействие, математическая модель, тренажер.

Для цитирования:

Аносов А. Н. Моделирование влияния ветра на элементы циркуляции судна / А. Н. Аносов, А. А. Лентарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 567–578. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-567-578.

Введение (Introduction)

Воздух, так же, как и вода, обладает свойством фрикционного и вихревого сопротивления движению судна. Воздействие ветра на судно проявляется в том, что к его надводной части прилагаются аэродинамические силы, величина которых зависит от формы надстроек, силы и направления (курсвого угла) ветра относительно судна. Составляющие аэродинамических сил, действующих в плоскости ватерлинии, в той или иной степени влияют на элементы горизонтального движения судна. Методика расчета аэродинамических сил и моментов представлена в классических работах по теории корабля (см., например, [1]). Для приближенной оценки ветрового сопротивления можно воспользоваться рекомендацией, приведенной в работе [2], где утверждается, что при отсутствии ветра сопротивление воздуха составляет 2–4 % от сопротивления воды. В случае, если судно идет против ветра, имеющего такую же скорость, как и судно, то скорость кажущегося ветра возрастает в два раза, а его сопротивление движению судна — в 4 раза, т. е. достигает 8–16 % от величины сопротивления воды.

В практических задачах по навигации и управлению судном (например, при учете угла ветрового дрейфа при счислении и расчете ветроволновых потерь скорости) учитывается главным образом ветровое воздействие на прямолинейное движение судна. В то же время в практической навигации существует ряд задач (например, планирование и выполнение поворота или расчет точки невозврата в условиях ветра), когда необходимо учитывать влияние ветра на движение судна по криволинейной траектории, в частности, на циркуляции. К сожалению, имеющаяся информация о влиянии ветра на циркуляцию судна недостаточна и отчасти противоречива. Так, качественные оценки этого явления в теории корабля сводятся к тому, что кривая циркуляции при воздействии ветра смещается в направлении ветра [1]. В то же время в работе [3] утверждается, что кривая циркуляции на ветре смещается от линии ветра в сторону, противоположную стороне перекладки руля под некоторым углом. В работе [4] на основе математического моделирования показано, что траектория циркуляции, которая смещается строго в направлении ветра и определенная Р. Я. Перщицем как типичная, имеет место лишь при определенных соотношениях скорости ветра и угла перекладки руля. В общем случае смещение траектории происходит и в перпендикулярном ветру направлении. В работе [5] представлены результаты математического моделирования движения судна на циркуляции в условиях постоянного ветра и регулярного волнения. В этом случае кривые циркуляции смещаются примерно под углом 45° от линии ветра в сторону поворота судна. Таким образом, исходя из выводов, представленных в работах [1]–[5], качественные оценки смещения циркуляции под действием ветра находятся в диапазоне от «строго по ветру» до «в перпендикулярном ветру направлении».

Что касается количественных оценок влияния ветра на параметры циркуляции судна, то информации об этом крайне мало. Результаты поиска в интернете по ключевым словам показали, что среди немногочисленных работ о влиянии ветра на циркуляцию лишь в нескольких из них в той или иной мере рассматривается проблема количественных изменений параметров циркуляции под действием ветра. Группа хорватских ученых из университетов Риеки и Задара в работе [6]

представили результаты двух натурных экспериментов, в которых пассажирский паром типа ро-ро длиной 126 м, имеющий большую парусность, совершал циркуляцию на правый и левый борт без ветра и при боковом ветре скоростью 20 уз и максимальном угле перекладки руля 35°. Анализ результатов экспериментов показал, что в условиях ветрового воздействия тактический радиус циркуляции при левом повороте увеличился на 37,1 %, при правом повороте — на 21,5 %, а увеличение выдвиг составило, соответственно, 67,9 % и 43,1 %. В диссертационном исследовании Ней Зо Аунга [7] на основе математического моделирования показано, что при попутном ветре скоростью 12 м/с тактический радиус циркуляции накатного судна увеличился на 6 м. Как видно, для формирования системного подхода к рассматриваемой проблеме релевантной информации недостаточно.

С учетом выполненного библиографического анализа целью данной работы являлось исследование воздействия ветра на элементы циркуляции на основе математического моделирования и определение количественных оценок этого воздействия при изменении таких факторов, как скорость и курсовой угол ветра, длина судна, угол перекладки руля.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Моделирование выполнялось на сертифицированном навигационном тренажере Transas NT Pro 5.40. Используемая в этом тренажере математическая модель движения судна несколько отличается от традиционных классических моделей, представленных в работах как отечественных, так и зарубежных ученых (см., например, [1], [8], [9]). В математической модели тренажера для формализации движения судна используются три декартовых системы координат [10]:

- наземная система $X_0Y_0Z_0$ с началом координат в некоторой точке O_0 , неподвижной относительно земной поверхности (ось X_0 направлена на север, ось Y_0 — на восток, ось Z_0 — вниз по направлению силы тяжести);
- подвижная система XYZ , начальная точка которой совпадает с центром тяжести судна (ось X направлена по диаметральной плоскости, ось Y — перпендикулярно вправо от оси X , ось Z — по направлению силы тяжести);
- местная подвижная система $X_1Y_1Z_1$, которая образуется, если систему координат перенести в центр тяжести судна, направления осей при этом сохраняются.

Следует отметить, что в классических моделях оси Z_0 , Z и Z_1 направлены вверх [8]. В начальный момент моделирования системы координат $X_0Y_0Z_0$ и $X_1Y_1Z_1$ совпадают. Проекции вектора скорости бортовой качки, килевой качки и рыскания (соответственно p , q и r) относительно осей подвижной системы XYZ определяются с помощью следующих кинематических уравнений Эйлера:

$$\begin{aligned} p &= \dot{\varphi} - \dot{\psi} \sin \theta; \\ q &= \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \varphi; \\ r &= -\dot{\theta} \sin \varphi + \dot{\psi} \cos \theta \cos \varphi. \end{aligned}$$

При использовании этих уравнений в общей модели движения судна они решаются относительно $\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$, которые являются, соответственно, углами бортовой качки, килевой качки и рыскания.

Уравнения движения судна при шести степенях свободы в системе координат XYZ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} m(\dot{u}_0 - v_0 r + \omega_0 q) &= X; \\ m(\dot{v}_0 + u_0 r - \omega_0 p) &= Y; \\ m(\dot{\omega}_0 - u_0 q + v_0 p) &= Z; \\ I_{x_c} p + (I_{z_c} - I_{y_c}) q r &= K; \end{aligned}$$

$$I_{y_c} q + (I_{x_c} - I_{z_c}) rp = M;$$

$$I_{x_c} pr + (I_{y_c} - I_{z_c}) pq = N,$$

где X, Y, Z — суммарные силы, действующие на судно по осям системы координат XYZ ;

K, M, N — суммарные моменты относительно осей системы координат XYZ соответственно.

Интегрированием первых трех уравнений движения обеспечивается определение составляющих скорости судна u, v, ω , соответственно, по осям XYZ , а интегрированием трех последних уравнений — определение векторов скорости бортовой качки, килевой качки и рыскания (p, q и r) относительно осей XYZ . Суммарные силы X, Y, Z и моменты K, M, N учитывают инерцию, гидродинамическое, аэродинамическое и волновое воздействия, влияние работы винта, руля и подруливающих устройств, взаимодействие с другими судами, силы натяжения якорной цепи и швартовых концов. В частности, для учета влияния ветра используются аэродинамические силы X_A и Y_A и моменты N_A и M_A , рассчитываемые следующим образом:

$$X_A = -C_{XA}(\gamma_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_T;$$

$$Y_A = C_{YA}(\gamma_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_L;$$

$$N_A = C_{NA}(\gamma_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_L L;$$

$$M_A = \bar{A} \bar{G}_z Y_A,$$

где V_{RW} и γ_R — соответственно скорость и курсовой угол кажущегося ветра;

A_T и A_L — соответственно площади поперечной и продольной проекций надводной части судна.

Безразмерные коэффициенты C_{XA}, C_{YA} и C_{NA} рассчитываются с учетом курсового угла ветра γ_R и конфигурации надводной части судна. Обоснованность формул для определения этих коэффициентов подтверждена сравнением расчетов с натурными испытаниями в аэродинамической трубе.

Математическая модель ветрового воздействия на судно включает две составляющие: постоянный ветер на высоте 6 м над уровнем моря; случайный порывистый ветер, параметры которого рассчитываются на основе спектральных характеристик турбулентной и волновой составляющих. Кроме того, в математической модели движения судна учитывается также ветровое волнение, рассчитываемое с использованием стандартного волнового спектра Пирсона – Московича [10].

Эксперименты по моделированию движения на циркуляции в условиях ветрового воздействия выполнялись с использованием трех судов-контейнеровозов, основные характеристики которых представлены, соответственно, в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики моделируемых судов

Моделируемые судна	Водо-измещение, т	Длина, м	Ширина, м	Осадка, м	Высота надводной части борта, м	Мощность главного двигателя, кВт	Максимальная скорость, уз
Судно 1	5530	90	14,5	6,3	25,4	3263	16,0
Судно 2	32910	190	30,0	11,1	47,5	17316	20,1
Судно 3	135651	324	42,8	14,6	47,0	68640	23,2

Далее при анализе результатов моделирования контейнеровозы представлены как «судно 1», «судно 2» и «судно 3» соответственно. Во многом совпадающие профили этих судов (вид сбоку) приведены на рис. 1. Отношение площадей надводной и подводной частей для всех трех судов составило примерно 2/1.

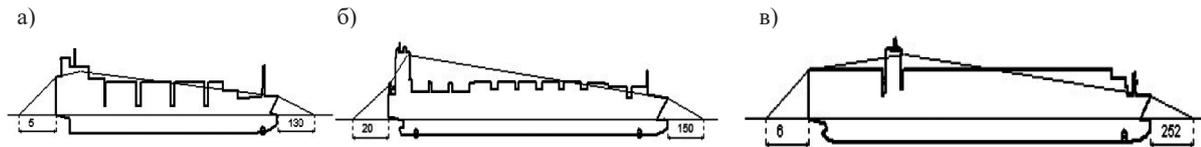


Рис. 1. Профили моделируемых судов 1–3:
 а — судно 1; б — судно 2; в — судно 3

Моделирование выполнялось при максимальной скорости судов и максимальном угле перекадки руля 30° , за исключением отдельных экспериментов, когда значения этих параметров оговаривались отдельно. Для контроля положения изменения кривой циркуляции были выбраны четыре точки поворота: на 90° , 180° , 270° и 360° . Модификация кривой циркуляции в результате влияния ветра определялась отклонением этих точек поворота от их положения при отсутствии ветра.

В ходе работы было установлено, что при повторном выполнении эксперимента при аналогичных условиях количественные оценки параметров циркуляции (выдвиг, прямое смещение, тактический радиус) различались в среднем на 3–6 %. Очевидно, это объясняется случайным характером порывистой составляющей ветра и ветрового волнения в математической модели движения судна. Поэтому в экспериментах, которые повторялись три раза, в качестве итоговых оценок параметров циркуляции использовались осредненные данные.

Результаты (Results)

Результаты моделирования с целью оценки влияния ветрового воздействия на параметры циркуляции судна представлены в табличном и графическом виде. Для оценки этого влияния для курсовых углов 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° и 315° ветра скоростью 20 и 40 м/с измерялись продольные и поперечные смещения точек поворота судна при циркуляции на 90° , 180° , 270° и 360° от соответствующих точек при отсутствии ветра. Продольные отклонения отсчитывались по направлению линии курса на момент начала циркуляции, поперечные — поперек линии первоначального курса. Точность измерения составила ± 1 м. Следует отметить, что при этом не учитывался угол дрейфа на циркуляции. Численные значения поперечных и продольных смещений точек поворота судна при циркуляции на 90° , 180° , 270° и 360° приведены в табл. 2 и 3 при скорости ветра 20 и 40 м/с соответственно.

Таблица 2

Поперечные и продольные смещения точек поворота на 90° , 180° , 270° и 360° при скорости ветра 20 м/с

Моделируемые суда	Угол поворота судна на циркуляции	Координаты точки поворота без ветра (XY), М	Поперечные и продольные смещения точек поворота ($\Delta X/\Delta Y$) при курсовом угле ветра, м							
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Судно 1	90°	176	-1	-10	-6	0	2	0	1	2
		293	0	5	9	10	7	9	8	5
	180°	315	0	-8	-9	-3	5	5	9	11
		178	-13	-4	9	7	3	3	1	-6
	270°	191	0	-9	-16	-3	12	14	15	8
		48	-12	-11	1	11	13	5	-2	-9
	360°	72	-2	-12	-21	-13	3	16	19	9
		174	-20	-13	3	14	20	4	-14	-23
Судно 2	90°	263	0	6	-4	9	11	8	2	7
		507	-2	-6	-10	-10	0	19	20	2
	180°	483	1	-6	-8	-5	1	1	8	9
		296	-2	0	1	1	1	2	4	-1
	270°	276	5	-7	-23	-6	8	11	13	12
		83	-17	-15	-5	5	7	7	2	-7
	360°	70	6	-10	-21	-18	-3	11	18	16
		298	-10	-14	-2	14	32	23	4	-10

Окончание табл. 2

Судно 3	90°	776 1089	3 -5	-14 -6	-13 -2	-1 10	13 11	13 12	-10 9	-4 5
	180°	1417 415	6 -3	-8 8	-15 13	-6 26	9 22	12 33	13 43	18 1
	270°	752 -217	2 -22	-11 -24	-25 -7	1 20	5 22	25 10	17 0	37 -8
	360°	148 402	-1 9	-23 -30	-34 19	-24 44	3 46	27 20	31 -9	23 -18

Таблица 3

**Поперечные и продольные смещения точек поворота на 90°, 180°, 270° и 360°
при скорости ветра 40 м/с**

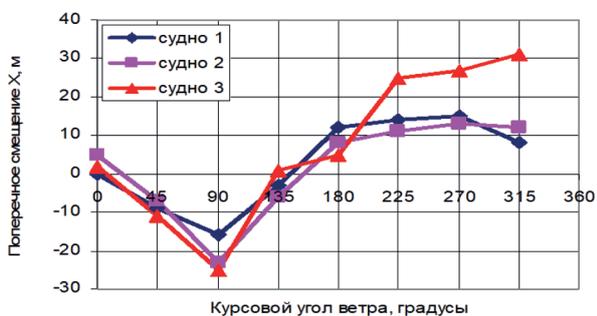
Моделируемые суда	Угол поворота судна на циркуляции	Координаты точки поворота без ветра (X/Y), м	Смещения точек поворота ($\Delta X/\Delta Y$) при курсовом угле ветра, м							
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Судно 1	90°	176 293	-8 17	-17 14	-16 22	-7 17	2 20	8 35	32 37	10 9
	180°	315 178	-12 -42	-20 -24	-23 21	-6 24	1 5	6 21	30 19	17 -15
	270°	191 48	11 -42	-38 -24	-66 21	-26 24	27 5	45 21	51 19	25 -15
	360°	72 174	4 -69	-52 -47	-79 -2	-59 44	-6 57	52 51	74 -14	35 -55
Судно 2	90°	263 507	2 9	7 -5	9 5	2 9	7 8	7 17	37 18	27 2
	180°	483 296	18 -44	-8 -17	-26 -1	-20 5	-12 12	2 22	29 24	37 -12
	270°	276 83	32 -49	36 -45	-73 -37	-65 6	7 36	25 44	47 37	57 -4
	360°	70 298	17 -58	-21 -51	-78 -34	-88 34	-42 90	26 91	70 26	72 -25
Судно 3	90°	776 1089	-30 -20	-46 -26	-35 -11	-45 1	-26 5	-25 7	-12 21	-10 -2
	180°	1417 415	30 -53	-29 1	-51 21	-23 62	7 57	30 39	48 40	55 37
	270°	752 -217	9 -74	-52 -84	-115 -29	-41 47	31 54	70 51	81 15	52 -24
	360°	148 402	13 -83	-75 -31	-120 14	-90 75	-8 119	78 87	116 -8	88 -42

Для обеспечения возможности визуальной оценки некоторые результаты моделирования представлены в графическом виде. Так, на рис. 2 показаны экспериментальные зависимости продольного и поперечного смещения точек поворота на 270° в зависимости от курсового угла ветра скоростью 20 м/с. Влияние скорости ветра (20 и 40 м/с) на примере поперечного смещения точки поворота на 270° показано на рис. 3. Еще одна форма представления данных о смещении точек поворота на 360° в зависимости от скорости ветра приведена на рис. 4.



Рис. 2. Зависимость поперечного и продольного смещения точки поворота на 270° от курсового угла ветра скоростью 20 м/с

а)



б)



Рис. 3. Зависимость поперечного смещения точки поворота на 270° при силе ветра 20 м/с (а) и 40 м/с (б)

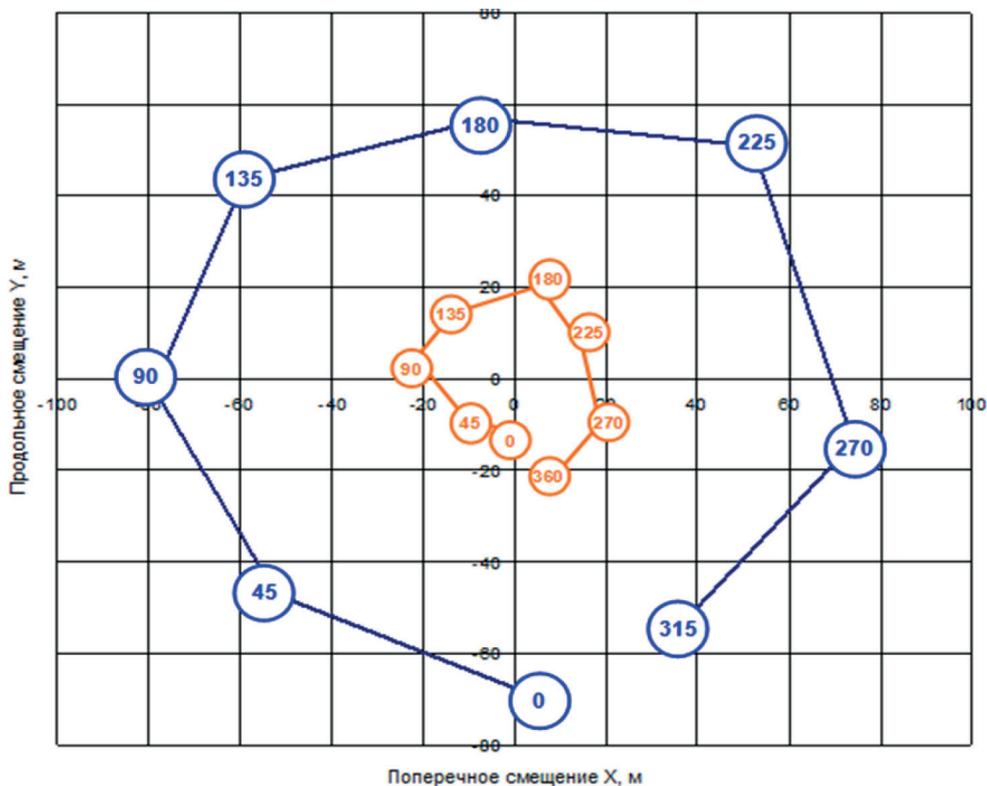


Рис. 4. Смещение точки поворота на 360° судна 1 воздействию ветра (— ветер 20 уз; — ветер 40 уз; цифра в кружке — курсовой угол ветра на начало поворота)

Для проверки гипотез о смещении кривых циркуляции при воздействии ветра, предложенных в работах [1]–[5], выполнено моделирование шести последовательных циркуляций при угле поворота руля 15° и ветре, скорость которого составляет 20 м/с, действующем при курсовых углах 0° , 90° , 180° и 270° . Результаты моделирования приведены на рис. 5, на котором показаны смещения кривой циркуляции при воздействии ветра четырех главных направлений.

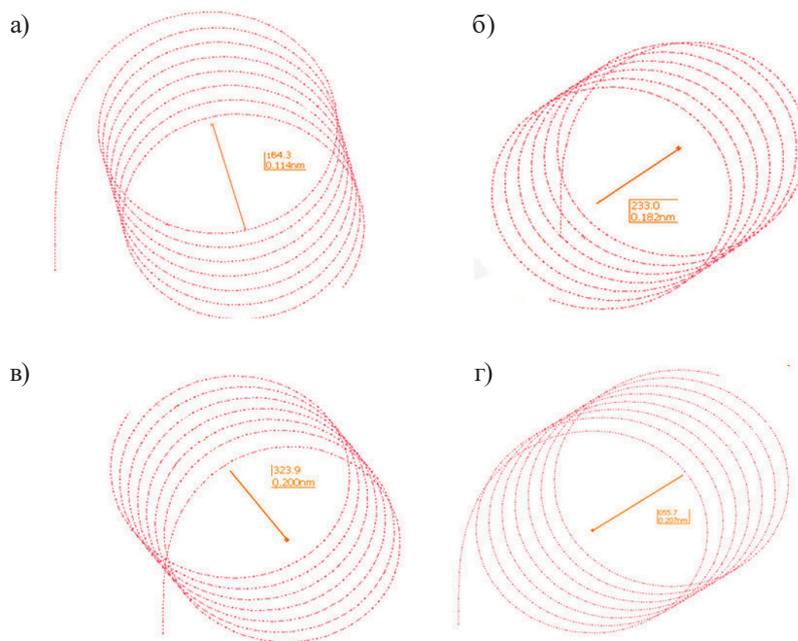


Рис. 5. Смещение циркуляции в зависимости от курсового угла ветра (20 м/с):
а — курсовой угол ветра 0° , угол перекладки руля 30° ; б — курсовой угол ветра 90° ,
угол перекладки руля 15° ; в — курсовой угол ветра 180° , угол перекладки руля 15° ;
г — курсовой угол ветра 270° , угол перекладки руля 15°

Видно, что при любом курсовом угле ветра кривая циркуляции смещается в направлении ветра под некоторым углом, противоположным углу перекладки руля. Причем величина угла смещения кривой циркуляции зависит от угла перекладки руля. В данном случае при угле перекладки руля 30° вправо кривая циркуляции смещается по направлению ветра влево на угол 15° , а при угле перекладки руля 15° она смещается на угол 35° при любом курсовом угле ветра. Эти результаты в определенной мере совпадают с выводами, сделанными в работах [1], [3] и [5], уточняя и дополняя их.

Обсуждение (Discussion)

В ходе моделирования в условиях ветрового воздействия для точек поворота на циркуляции на 90° , 180° , 270° и 360° были определены их поперечные и продольные смещения от соответствующих точек циркуляции, выполненной при отсутствии ветра. Зависимость поперечных и продольных смещений от курсового угла ветра, общий вид которой показан на рис. 2, может быть аппроксимирована полиномом четвертой степени при коэффициенте достоверности аппроксимации, превышающем $0,9$. Для примера на рис. 6 показаны кривые полиномиальной аппроксимации и их уравнения, полученные с использованием обычного пакета статистического анализа программы Excel. Очевидно, что они могут быть представлены также в виде синусоидальной кривой, тем более что координата X изменяется в пределах от 0 до 360° .

Из восьми полученных координат (по две на каждую из четырех точек) при анализе результатов моделирования особый интерес с точки зрения практического применения представляют координаты, связанные с традиционными основными элементами циркуляции, а именно:

- продольное расстояние точки поворота судна на 90° , которое определяет выдвиг;
- поперечное расстояние точки поворота судна на 90° , соответствующее прямому смещению;

- поперечное расстояние точки поворота 180°, соответствующее максимальному прямому смещению (тактическому диаметру циркуляции);
- поперечное расстояние между точками поворота на 180° и 360°, которое равно диаметру установившейся циркуляции.

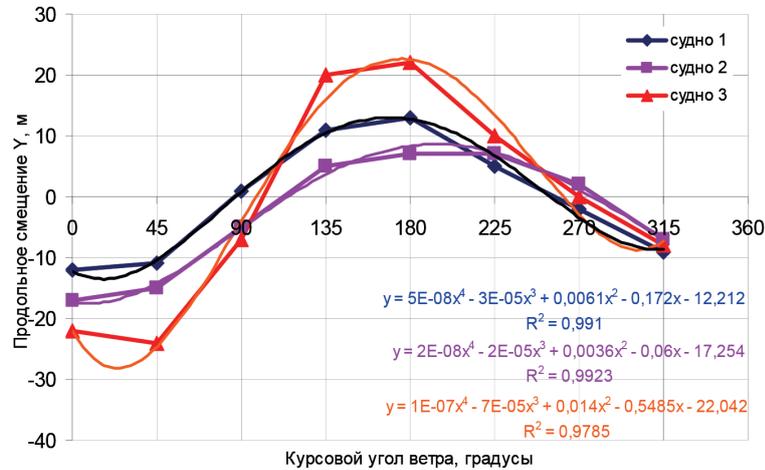


Рис. 6. Зависимость поперечного и продольного смещения точки поворота на 270° от курсового угла ветра скоростью 20 м/с

Численные значения основных элементов циркуляции для трех моделируемых судов при отсутствии ветра приведены в табл. 4.

Таблица 4

Элементы циркуляции моделируемых судов при отсутствии ветра

Моделируемые суда	Выдвиг, м	Прямое смещение, м	Тактический диаметр циркуляции, м	Диаметр установившейся циркуляции, м
Судно 1	293	176	315	243
Судно 2	507	263	483	413
Судно 3	1089	776	1417	1269

В результате анализа результатов моделирования в условиях ветрового воздействия были определены максимальные изменения основных элементов циркуляции, которые приведены в табл. 5, откуда видно, что при скорости ветра 20 м/с максимальные изменения элементов циркуляции судна 1 находятся в пределах от 3,4 до 5,7 %, судна 2 — от 1,7 до 4,2 %, судна 3 — от 1,1 до 1,8 %.

Таблица 5

Максимальные изменения основных элементов циркуляции

Моделируемые суда	Изменение элементов циркуляции при скорости ветра 20 и 40 м/с							
	Выдвиг, м		Прямое смещение, м		Тактический диаметр циркуляции, м		Диаметр установившейся циркуляции, м	
	20 м/с	40 м/с	20 м/с	40 м/с	20 м/с	40 м/с	20 м/с	40 м/с
Судно 1	10 (135°) 3,4 %	37 (270°) 12,6 %	-10 (45°) 5,7 %	32 (270°) 18,2 %	11 (315°) 3,5 %	30 (270°) 9,5 %	12 (90°) 4,9 %	56 (90°) 23,0 %
Судно 2	20 (270°) 3,9 %	18 (270°) 3,6 %	11 (180°) 4,2 %	37 (270°) 14,1 %	9 (315°) 1,7 %	37 (315°) 7,7 %	13 (90°) 3,1 %	68 (135°) 16,5 %
Судно 3	12 (225°) 1,1 %	-26 (45°) 2,4 %	-14 (45°) 1,8 %	-46 (45°) 5,9 %	18 (315°) 1,3 %	55 (315°) 3,9 %	19 (90°) 1,5 %	69 (90°) 5,4 %

Примечание. В табл. 5 в скобках показано значение курсового угла ветра, при котором наблюдалось максимальное изменение соответствующего элемента циркуляции.

Указанные процентные оценки существенно меньше данных, приведенных в работе [6]. Однако абсолютные значения таких изменений примерно соответствуют выводам, сделанным в работе [7]. Так, приведенные данные для ветра скоростью 40 м/с имеют, скорее, теоретическое значение, поскольку на практике при таком ветре суда, как правило, отстаиваются в портах на якоре. Максимальные изменения тактического диаметра циркуляции наблюдаются при курсовом угле ветра 315°, диаметра установившейся циркуляции — при курсовом угле ветра 90°. Оба этих элемента относятся к установившемуся периоду циркуляции. Для выдвиг и прямого смещения, относящихся к эволюционному периоду циркуляции, явной общей закономерности их максимальных изменений для всех трех судов в зависимости от курсового угла ветра не наблюдается. Обнаружено, что максимальные изменения прямого смещения тактического диаметра и диаметра установившейся циркуляции находятся в обратной пропорциональной зависимости от длины судна, как показано на рис. 7, где коэффициент достоверности аппроксимации линейных зависимостей находится в пределах 0,82–0,99. Этой закономерности не отмечается в отношении выдвиг, несмотря на то, что общая тенденция уменьшения влияния ветра при увеличении длины судна наблюдается.

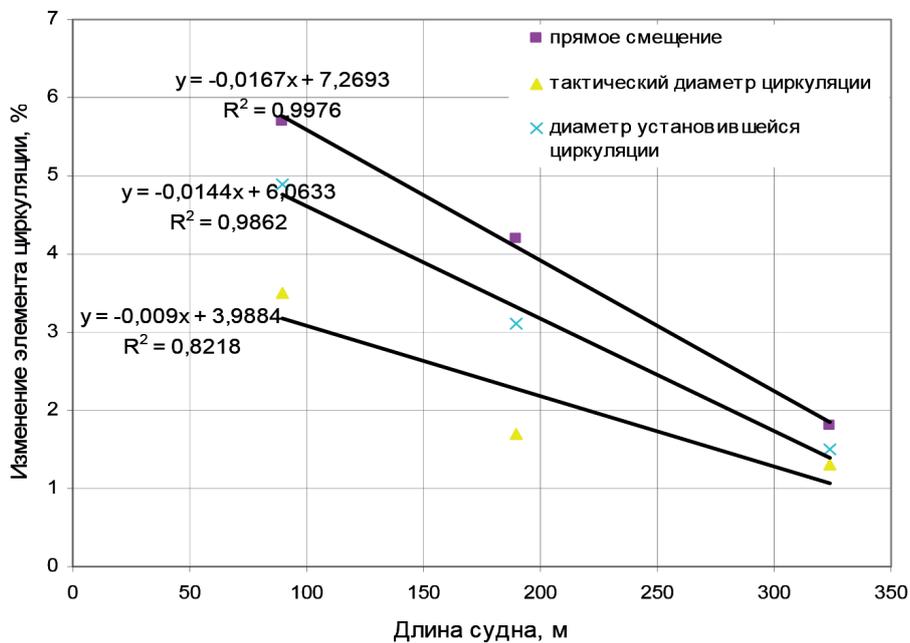


Рис. 7. Зависимость максимального изменения элементов циркуляции от длины судна

Следует особо отметить, что полученные результаты не могут быть использованы в целях каких-либо теоретических обобщений, поскольку получены с использованием только одной конкретной математической модели для трех конкретных моделей судов и, соответственно, отражают характеристики только данной математической модели и особенности этих судов. Для разработки возможных теоретических выводов и практических рекомендаций необходимо выполнение подобных исследований с использованием других сертифицированных математических моделей и проведение натурных экспериментов с реальными судами.

Заключение (Conclusion)

Сертифицированный навигационный тренажер Transas NT Pro 5.40 обеспечивает широкие возможности исследования особенностей движения судна в различных условиях плавания. Математическая модель, используемая в нем, учитывает инерцию судна, гидродинамическое, аэродинамическое и волновое воздействие, влияние работы винта, руля и подруливающих устройств, взаимодействие с другими судами, силы натяжения якорной цепи и швартовных концов, а также наличие ледовых условий.

В работе представлены результаты моделирования влияния ветра на элементы циркуляции трех судов-контейнеровозов. Определены зависимости изменений элементов циркуляции (выдвиг, прямое смещение, тактический диаметр циркуляции и диаметр установившейся циркуляции) от курсового угла ветра перед началом поворота. Поскольку такие зависимости получены впервые, в соответствии с принципом воспроизводимости научных результатов их целесообразно проверить с использованием других математических моделей или с помощью проведения натуральных экспериментов. Кроме того, целесообразно продолжить работы по моделированию в этом направлении с учетом влияния других параметров (например, скорости судна, угла перекладки руля, мелководья).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войткунский Я. И.* Справочник по теории корабля / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 1: Судовые движители и управляемость. — 768 с.
2. *Rawson K. J.* Basic Ship Theory / K. J. Rawson, E. C. Tupper. — Fifth edition. — Oxford: Reed Educational and Professional Publishing LTD, 2001. — Vol. 2. — 731 p.
3. *Снопков В. И.* Управление судном: учебник для вузов / В. И. Снопков. — М.: Транспорт, 1991. — 359 с.
4. *Фейгин М. И.* Математическое моделирование траектории установившейся циркуляции судна при ветре / М. И. Фейгин, А. А. Попов // Вестник ВГАВТ. — 2004. — № 8. — С. 171–174.
5. *Paroka D.* Prediction of ship turning maneuvers in constant wind and regular waves / D. Paroka, A. H. Muhammad, S. Asri // International Journal of Technology. — 2017. — Is. 3. — Pp. 388–398. DOI: 10.14716/ijtech.v8i3.3704.
6. *Novaselic M.* Wind Influence on Ship Manoeuvrability — a Turning Circle Analysis / M. Novaselic, R. Mohovic, M. Baric, L. Grbić // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2021. — Vol. 15. — No. 1. — Pp. 47–51. DOI: 10.12716/1001.15.01.03.
7. *Ней Зо Аунг.* Расчетное исследование управляемости и элементов мореходности судов в условиях воздействия течения, ветра и волнения: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика» / Зо Аунг Ней. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический ун-т, 2011. — 220 с.
8. *Васильев А. В.* Управляемость судов / А. В. Васильев. — Л.: Судостроение, 1989. — 328 с.
9. *Хойер Г. Х.* Управление крупнотоннажными судами при маневрировании / Г. Х. Хойер. — М.: Транспорт, 2002. — 109 с.
10. Description of Transas mathematical model. — SPb.: Transas LTD, 2011. — 86 p.

REFERENCES

1. Voitekunskii, Ya. I., R. Ya. Pershits, and I. A. Titov. *Spravochnik po teorii korablya*. Vol. 1. L.: Sudostroenie, 1985.
2. Rawson, K. J., and E. C. Tupper. *Basic Ship Theory*. Fifth edition. Volume 2. Oxford: Reed Educational and Professional Publishing LTD, 2021
3. Snopkov, V. I. *Upravlenie sudnom*. M.: "Transport", 1991.
4. Feigin, M. I., and A. A. Popov. "Matematicheskoe modelirovanie traektorii ustanovivshetsya cirkulyacii sudna pri vetre." *Vestnik VGAVT* 8 (2004): 171–174.
5. Paroka, Daeng, Andi Haris Muhammad, and Syamsul Asri. "Prediction of ship turning maneuvers in constant wind and regular waves." *International Journal of Technology* 3 (2017): 388–398. DOI: 10.14716/ijtech.v8i3.3704
6. Novaselic, M., R. Mohovic, M. Baric, and L. Grbić. "Wind Influence on Ship Manoeuvrability — a Turning Circle Analysis." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 15.1 (2021): 47–51. DOI: 10.12716/1001.15.01.03
7. Ney Zo Aung. *Raschetnoe Issledovanie upravlyaemosti i elementov morechodnosti sudov v usloviyach vozdeystviya techeniya vetra i vilneniya*. PhD diss. SPb.: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyi morskoyi tehnikeskii universitet, 2011.
8. Vasiljev, A. S. *Upravlyatmocht sudov*. L.: Sudostroenie, 1983.
9. Hoyer, H. H. *Upravlenie krupnotonnazhnymi sudami pri manevrirovanii*. M.: Transport, 2002.
10. *Description of Transas mathematical model*. SPb.: Transas LTD, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аносов Алексей Николаевич — аспирант

Научный руководитель:

Лентарёв Александр Андреевич

МГУ им. адм. Г. И. Невельского

690003, Российская Федерация,

Владивосток,

ул. Верхнепортовая, 50а

e-mail: anosovan@msun.ru

Лентарёв Александр Андреевич —

доктор технических наук, доцент,

старший научный сотрудник

МГУ им. адм. Г. И. Невельского

690003, Российская Федерация,

Владивосток,

ул. Верхнепортовая, 50а

e-mail: lentarev@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anosov, Alexey A. — Postgraduate

Supervisor:

Lentarev, Alexander A.

Maritime State University named after

Admiral G. I. Nevelskoy

50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,

Russian Federation

e-mail: anosovan@msun.ru

Lentarev, Alexander A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor,

senior researcher

Maritime State University named

after Admiral G. I. Nevelskoy

50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,

Russian Federation

e-mail: lentarev@msun.ru

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2023 г.

Received: April 3, 2023.