

24. Tomilin A.N. On the issue of ship personnel fatigue as one of the essential causes of accidents on transport vessels/A.N. Tomilin, A.L. Boran-Keshishyan, S.N. Tomilina, D.O. Yavorskaya // Operation of marine transport. – 2020 - № 3(96). – P. 15-23.
25. Tomilin A.N. On the question of understanding the essence of the human factor by members of the ship's crews and their predisposition to create an emergency situation / A.N. Tomilin, S.I. Pankina, S.N. Tomilina, A.M. Dorofeev, E.M. Dorofeev // Operation of sea transport. – 2022 - № 2(96). – Pp. 15-23.
26. Sailors' fatigue – where next? [Electronic resource]// <https://znachenie-slova.ru/особенность> (accessed: 09/15/2022).

УДК 629.5.017.2

DOI: 10.34046/aumsuomt105/8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА НА СУДА РАЗЛИЧНОГО ТОННАЖА

А.Н. Аносов, аспирант

В статье рассматривается влияние разнонаправленного и усиливающегося ветра на суда различного тоннажа. При выполнении маневра на судно действуют различные силы, одной из которых является ветер. В том случае, если судно имеет большую парусность, то сила ветра критична при маневрировании на ограниченной акватории. Влияние аэродинамических сил можно рассчитать математически или использовать навигационные тренажеры. В исследовательской работе задействовано оборудование новейшего Дальневосточного морского тренажерного центра на базе университета МГУ им. адм. Г.И. Невельского, симуляции, проводимые на данном оборудовании, практически невозможно отличить от реальных условий, что позволяет проводить исследования различных аспектов управления и маневрирования судном.

Ключевые слова: Судно, математическая модель, влияние ветра, маневренные характеристики.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECT OF INCREASING WIND ON VESSELS OF VARIOUS TONNAGE

A.N. Anosov

The article considers the influence of multidirectional and increasing wind on vessels of different tonnage, when performing a maneuver, various forces act on the vessel, one of which is the wind if the vessel has a large sail, the value of wind forces is critical when maneuvering in a small water area, the influence of aerodynamic forces can be calculated mathematically or use navigation simulators the latest equipment is involved in the research work Far Eastern Marine Training Center on the basis of the University of Maritime State University named after G.I. Nevelskoy simulations carried out on this equipment are almost impossible to distinguish from real conditions, which makes it possible to conduct such research and develop the safety of navigation.

Key words: Ship, mathematical model, wind, aerodynamic forces, maneuverable characteristics.

Введение. Данная работа направлена на решение задачи, имеющей практическое значение: влияние аэродинамики на морские суда. Аэродинамика – это сила, действующая на объект в газовой среде, в которую погружено тело. Она обусловлена взаимодействием относительного движением между объектом и телом [1]. Существуют две основные причины возникновения аэродинамической силы: нормальная сила, обусловленная давлением на поверхность тела, и сила сдвига, обусловленная вязкостью газовой смеси или же поверхностным трением. Аэродинамические силы, подобно гидродинамическим, находятся с помощью коэффициентов по осям x , y и их моментов, при этом основными определяющими значениями аэродинамических коэффициентов будут курсовые углы кажущегося ветра, а также курс и скорость судна, что в даль-

нейшем будет расписано в виде таблиц и рисунков, скорость и курсовой угол кажущегося ветра можно представить в виде формул [2]:

$$v_R = \sqrt{v_\alpha^2 + v^2 + 2v_\alpha v \cos(q_\alpha)}; \quad (1)$$

$$q_\alpha = \arccos \left[\frac{v + v_\alpha \cos(q_\alpha)}{\sqrt{v_\alpha^2 + v^2 + 2v_\alpha v \cos(q_\alpha)}} \right] - \Psi; \quad (2)$$

После нахождения этих данных можно определить усилия ветра действующее на надводную часть корпуса судна

$$\left. \begin{aligned} X_\alpha &= 0.5C_{x\alpha} \rho_\alpha v_R^2 S_m \\ Y_\alpha &= 0.5C_{y\alpha} \rho_\alpha v_R^2 S_{dp} \\ M_\alpha &= 0.5C_{m\alpha} \rho_\alpha v_R^2 S_{dp} L \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Практичные формулы расчета сил ветра, при взаимодействии с судном, на примере Хьюза [5],

$$R_\alpha = \frac{1}{2} \rho_\alpha C_\alpha (A_\alpha \cos^2 \varphi B_\alpha \sin^2 \varphi) v_\alpha^2; \quad (4)$$

где R_a – сила ветра;
 ρ_a – плотность воздуха;
 C_a – коэффициент силы ветра;
 A_a – проекция площади парусности судна на мидель;
 B_a – проекция площади парусности судна на диаметральной плоскости;
 φ – курсовой угол кажущегося ветра;
 V_a – скорость ветра.

Моменты, стремящиеся развернуть судно, по его же формуле:

$$R_m = CGY_a = R_a \sin \alpha \left(\frac{1}{2} L_{pp} \rho - \alpha \right); \quad (5)$$

где R_m – момент силы ветра;
 CG – расстояние между центром тяжести судна и центром приложения силы ветра
 L_{pp} – длина между перпендикулярами.

Фактическими углами крена и дифферента можно пренебречь (рисунок 3), тогда как модуль кажущихся скорости и угла ветра определяются следующим уравнениями (см. табл. 1):

$$V_{RW} = \sqrt{V_{RWz}^2 + V_{RWy}^2}; V_{RWx} = -V_{RW} \cos \gamma_{RW}; V_{RWy} = V_{RW} \sin \gamma_{RW} \quad (6)$$

Таблица 1 – Аэродинамический коэффициент

γ°	Cx		
	сухогрузное судно	пассажирское судно	танкеры и балкеры
0	0,75	0,78	0,69
30	1,65	1,66	1,46
60	1,35	1,54	1,19
90	1,20	1,33	1,21

В практических расчетах целесообразно использовать следующие приближенные формулы, учитывающие изменение положения судна [7]:

$$R_B = 0,61 C_X V^2 (S_{ЛОБ} \cos q + S_{БОРТ} \sin q). \quad (7)$$

где R_B – сила действия ветра на судно, Н;
 C_X – коэффициент воздушного сопротивления, зависящий от угла между диаметральной плоскостью (ДП) и направлением ветра (выбирается из таблицы);

V – скорость ветра, м/с;

$S_{Лоб.}$, $S_{Борт.}$ – площадь проекции надводной части корпуса судна соответственно на мидель и ДП, γ – угол между ДП и направлением ветра, град.

Основная часть. В данном исследовании была использована специальная математическая модель ветрового воздействия на суда и сил влияния на корпуса судна. Распределение зон действия ветра зависит от длины судна, а их количество не может быть менее семи. Эта особенность математической модели позволяет учитывать силы и моменты с учетом конфигурации надводного корпуса, укладки груза и палубного оборудования (см. рис. 1).

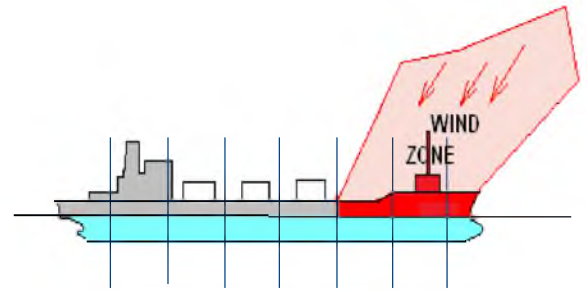


Рисунок 1 – Влияние ветра на математическую модель

При рассмотрении математических моделей и действия ветра на них, проведен сравнительный анализ для судов разного тоннажа с целью выявления эволюции маневренных элементов при воздействии ветра. Выполнение эксперимента начиналось с наименьшего по тоннажу судна, доступного на навигационном тренажере. С 2002 года на каждом судне должен быть маневренный буклет и таблица маневренных элементов. В них показано, по какой траектории данное судно будет двигаться в идеальных условиях на мелководье или на глубокой воде и пути торможения. В представляемом исследовании были получены данные, которые в дальнейшем будут добавлены в них в различных условиях плавания и воздействия внешних факторов, при рассмотрении парусности, как одного из важных параметров, влияющих на маневренность судна при увеличении ветра и отклонении курса судна от заданной линии пути.

Парусность судна – один из важнейших элементов, влияющих на его управление. Палубный груз в значительной мере формирует парусность судна, особенно это актуально для контейнеровозов и других судов, перевозящих палубные грузы. Есть несколько вариантов расчета центра парусности судна. Расчет лобового и бортового сопротивления позволяет понять, что ветер, действующий на судно, будет уводить его с курса. Первоначально следует рассмотреть влияние аэродинамических сил, действующих на судно в штилевую погоду. Следует отметить, что ветер, действующий на судно, имеющее движение вперед, будет стремиться развернуть его в сторону ветра, и сместить его под некоторым углом, как показано на рис. 2.

Рассмотреть влияние ветра и его центр можно также в горизонтальной и фронтальной проекции, благодаря этому можно рассчитать центр парусности судна (см. рис. 2). Площадь парусности судна определяется по макету общего расположения как сумма проекций всех сплошных надводных поверхностей элементов судна, сумма остальных поверхностей обычно рассчитывается как 10 процентов от общей парусности.

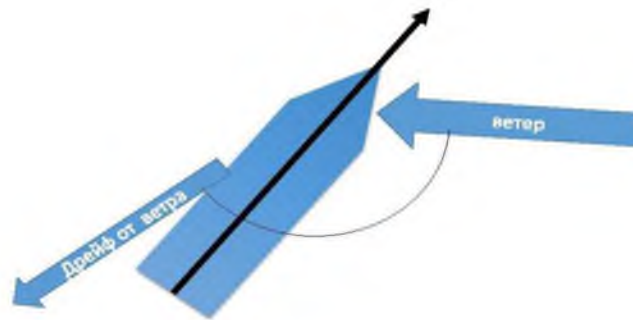


Рисунок 2 – Влияние ветра на судно при движении вперед

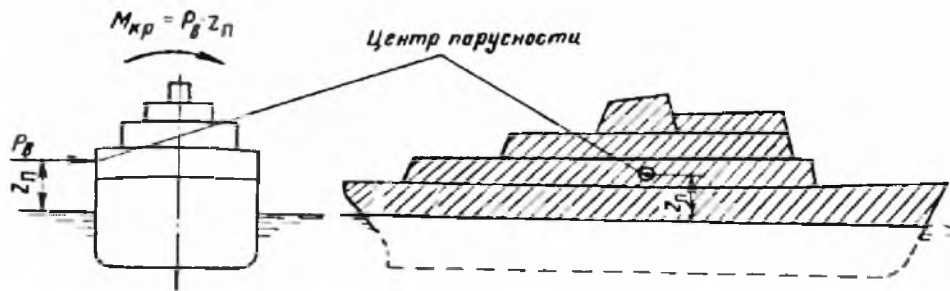


Рисунок 3 – Центр плавучести судна

При проведении данных исследований выполнялось математическое моделирование маневрирования при влиянии ветра на суда различного тоннажа водоизмещением от 2000 тонн до 360 тысяч тонн.

Для самого маленького судна при начальной скорости 12 узлов и водоизмещением 2812 тонн получены следующие результаты: тактический диаметр циркуляции равен 134 метра, финальная угловая скорость 91 градусов/минуту, финальная линейная скорость 3,5 узла, время маневра 4 минуты 12 секунд, пройденный путь при движении на циркуляции 631,3 метров.

При воздействии ветра с курсовым углом 0° на 10 м/с радиус циркуляции увеличивается на метр, финальная угловая скорость и финальная линейная скорость остаются такими же, время циркуляции увеличилось на 3 секунды, пройденный путь на 4,9 метров и при повторной циркуляции центр циркуляции сместился на 6 метров. После увеличения силы ветра до 20м/с тактический диаметр циркуляции стал равен 138 метрам, что увеличило его на 4 метра, финальная линейная

скорость упала на 0,1 узла, и заняло еще на 3 секунды больше, пройденный путь судна увеличился еще на 5,8 метра, а смещение увеличилось до 13 метров. Таким образом, при воздействии ветра на судно происходит изменение предполагаемой траектории движения. При рассмотрении малых судов эти значения могут показаться малыми и незначительными, но переходя к большим суда каждая секунда и метр превратится в 10 минут и 150 метров, особенно под воздействием определенных ветровых усилий с различных курсовых углов. Для наглядности, вывод данных в дальнейшем будет представлен в виде таблиц.

Далее в графическом виде представлены траектории движения двух различных судов: суперконтейнеровоза (400 метров длиной) и супертанкера (250 метров). При этом, что более важно - количество груза, перевозимое этими судами: танкер водоизмещением 364031 тонн и контейнеровоз 171371 тонн. (Синей линией выделено поведение судна без воздействия ветра, оранжевой – с воздействием ветра скоростью 10 м/с и красной линией – ветер скоростью 20 м/с.

Таблица 2 маневренные характеристики судна на циркуляции при ветре 0м/с

Тоннаж	Диаметр циркуляции, м	Финальная линейная скорость, узла	Путь, пройденный на циркуляции, м	Выдвиг	Смещение
2812т	134	3,5	631,3	275	199
5291т	124	4,9	749,8	348	234
12989т	212	2,5	1240	491	420
24080т.	470	5,4	1576,6	529	532
49221т	638	4,9	2538,4	742	840
92046т.	640	5,0	2068	693	686
148000	966	10,8	3985,9	1259	1263
171371т	1742	10,0	6358,9	1895	1985
364073т	1458	2,5	3420	1527	1410

Таблица 3 – маневренные характеристики судна на циркуляции при ветре 10м/с

Тоннаж	Диаметр циркуляции, м	Финальная скорость, узла	линейная	Путь, пройденный на циркуляции, м	Выдвиг	Смещение
2812т	136	3,5		632,9	255	197
5291т	122	4,8		726	333	230
12989т	340	2,2		1259	489	417
24080т.	472	5,1		1589,1	520	526
49221т	796	4,8		2554,9	855	855
92046т.	700	4,8		2071,8	682	718
148000	982	10,6		3986,4	1235	1232
171371т	1684	9,6		6355,5	1871	1989
364073т	1500	2,4		3416	1521	1410

Таблица 4 – маневренные характеристики судна на циркуляции при ветре 20м/с

Тоннаж	Диаметр циркуляции, м	Финальная скорость, узла	линейная	Путь, пройденный на циркуляции, м	Выдвиг	Смещение
2812т	138	3,5		642	243	191
5291т	118	4,6		697	308	220
12989т	452	1,6		1359	483	492
24080т.	479	4,5		1594,8	520	493
49221т	432	4,4		2636,8	808	921
92046т.	708	4,2		2107,6	660	755
148000т	1142	9,9		4053,9	1193	1266
171371т	1910	8,9		6407,9	1830	2063
364073т	1884	2,3		3416	1517	1401

Сравнительный анализ графиков показал: действие ветра на судно становится значительным, когда силы ветра действуют на большую площадь поверхности судна, то есть на его надводную часть,

и его палубный груз. Ветер будет больше влиять на поворотливость судна, и траекторию его движения, чем на дистанцию пройденного пути судна, его скорость, время маневра.

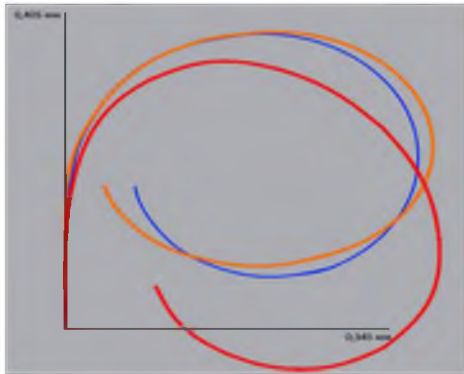


Рисунок 4 – Циркуляция контейнеровоза при ветре с направления 0 градусов и скорости ветра

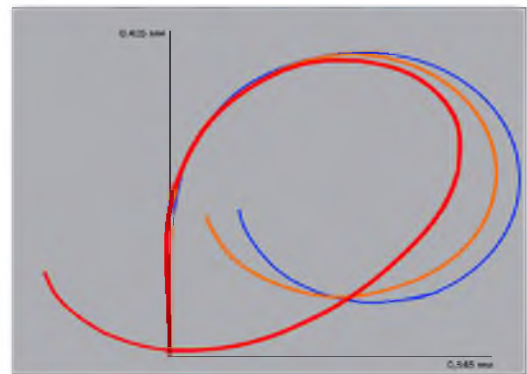


Рисунок 5 – Циркуляция контейнеровоза при ветре с направления 90 градусов и скорости ветра 0, 10, 20 м/с



Рисунок 6 –Циркуляция контейнеровоза при ветре с направления 270 градусов и скорости ветра 0, 10, 20 м/с



Рисунок 7 –Циркуляция контейнеровоза при ветре с направления 180 градусов и скорости ветра 0, 10, 20 м/с

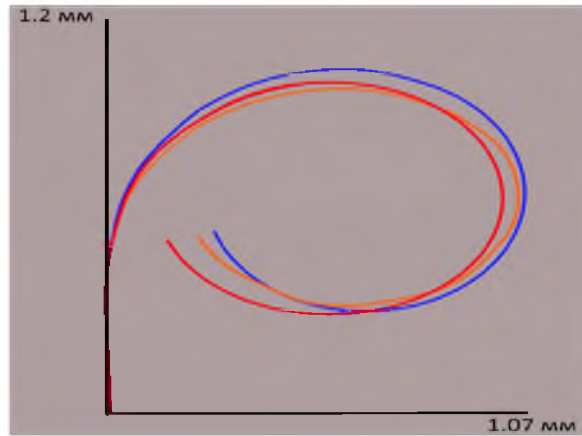


Рисунок 8 – Циркуляция полностью загруженного танкера при ветре с направления КУ от 0 до 360 градусов и скорости ветра 0, 10, 20 м/с

КУ 0°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0	4,8	0,7
20 узлов	3,5	-132,8	1,3
40 узлов	13,5	-396,0	1,5

КУ 315°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	-5,0	-300,1	
20 узлов	-28,3	4711,7	
40 узлов	-108,3	15382,4	

КУ 45°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	-1,5	-301,2	0,3
20 узлов	30,6	4750,3	1,5
40 узлов	108,9	14580	2,8

КУ 270°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	-2,7	-261,4	0,4
20 узлов	-80,5	4122,9	2,1
40 узлов	303,9	9348,6	4,1

КУ 90°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	-1,5	202,3	0,3
20 узлов	-75,0	-4321,4	2,0
40 узлов	287,9	10382,5	4,0

КУ 225°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	-2,0	-227,8	0,2
20 узлов	44,4	-1206,4	1,7
40 узлов	192,2	-7996,4	2,7

КУ 135°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	-1,5	-206,3	0,3
20 узлов	-43,0	1255,6	1,6
40 узлов	-188,1	6958,6	2,7

КУ 180°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	1,7	-213,0	0,9
20 узлов	4,3	-526,0	1,4
40 узлов	-3,6	1819,5	1,0

Рисунок 9 – Силы, действующее на судно при ветре при движении контейнеровоза водоизмещением 171 тысяч тонн

КУ 0°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0,0	2,3	0
20 узлов	4,6	19,9	0,7
40 узлов	15,0	26,3	1,1

КУ 315°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0,6	10,4	0,1
20 узлов	5,3	314,7	0,2
40 узлов	20,7	991,4	0,7

КУ 45°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0	2,3	0,1
20 узлов	9,2	355,1	0,5
40 узлов	36,5	944,2	0,6

КУ 270°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	7,3	7,9	0,2
20 узлов	17,3	181,8	0,4
40 узлов	61,8	840,8	0,8

КУ 90°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0,0	2,8	0,1
20 узлов	13,6	189,7	0,4
40 узлов	56,2	908	0,7

КУ 225°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0	5,6	0,2
20 узлов	12,9	584,1	1,0
40 узлов	51,2	2606,4	2,3

КУ 135°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0	3,6	0,1
20 узлов	4,3	450,5	0,5
40 узлов	20,6	2685,2	1,3

КУ 180°			
Скорость ветра	Силы, т	Моменты, тш	Потери, уз
0 узлов	0	4,8	0,0
20 узлов	3,5	132,8	0,8
40 узлов	13,5	396,0	0,9

Рисунок 10 – Силы, действующие на судно при ветре при движении танкера водоизмещением 360 тысяч тонн

Кроме того, при выполнении данного исследования ставилась задача выяснить скоростные потери судов под воздействием определенного ветра относительно судна, то есть на определенных курсовых углах, были просмотрены суда различных классов и тоннажей. Для наглядности приведем самые большие из них и перейдем еще к следующей проблеме: обеспечение безопасности судна, так как в маневренном буклете не указана большая часть воздействия аэродинамических сил на корпус судна, что могло привести к посадке на мель контейнеровоза 400 метров длиной в Суэцком канале. В данной работе произведен разбор влияния ветра по курсовым углам с этим действием на определенные участки корпуса судна, и изменениями ветровой нагрузке в узлах от 0 до 40 узлов.

Первый к разбору будет привлечен супертанкер, судно тоннажем 360 тыс. тон. Казалось бы, что судно большое и ветер обязан на него действовать очень сильно, но это судно – гружёный танкер – флегматично отнеслось к влиянию на него ветра (это мы можем увидеть на рис. 8). Следует заметить, что судно двигалось по определенной траектории и самые большие воздействия были зафиксированы на курсовых углах 225° и 135°, что не сильно сказывается на траектории движения на примере циркуляции судна, показанного на рис. 10. Далее рассмотрим судно меньшего тоннажа, несущее контейнера, а значит имеющее большую парусность. Ниже приведены таблицы, объединённые в одну, для упрощения вывода информации в ней рассматривается судно водоизмещением 200 тыс. тонн, несущее 11400 контейнеров, площадь бортовой стороны равна 19456 м², а фронтальной 2444 м², а вот траектория контейнеровоза довольно сильно изменялась, что можно проследить на рис. 4, 5, 6, 7. Из этого следует, что парусность сильно влияет на подобные суда и можно вычислить потери скорости под действием данного ветра на определенных курсовых углах, что показано на рис. 9.

Заключение. При рассмотрении суда различного тоннажа, была выявлена следующая зависимость: при возрастании воздействия ветра на судно с сохранением того же времени улучшается поворотливость судна, но радиус циркуляции увеличивается.

Соответственно, при увеличении ветровой нагрузки до 40 узлов увеличатся и силы, действующие на корпус судна, при воздействии усиливающегося ветра можно сделать вывод, что максимальное воздействие для танкера идет со стороны

кормовых углов, а для контейнеровоза воздействие происходит на миделе и эти данные должны быть в каждом маневренном буклете для каждого судна, или добавлены как математическая модель в электронной картографии или другом судовом навигационном оборудовании для возможности просчета маневра в изменяющейся морской среде

Литература

1. Карман, Т. Аэродинамика: Избранные темы в их историческом развитии / Т. Карман. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 208 с. – ISBN 5-93972-094-3. – EDN RXGTVX.
2. Юдин, Ю.И. Расчёт аэродинамических усилий / Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 4-3(46). – С. 24-31. – EDN KFWMSL.
3. Аносов, А.Н. Влияние ветра на маневренные элементы судов / А.Н. Аносов, Д.Г. Клийман // Молодежь. Наука. Инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 26-37. – EDN PTSDEE.
4. Балса Йепес Алдрин Сегундо. Расчет поля ветра над океаном: специальность 11.00.09 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / Балса Йепес Алдрин Сегундо. – Санкт-Петербург, 2000. – 15 с. – EDN NFUFJH.
5. Каргин, Н. И. Вычислительные модели для расчета векторных характеристик поля скорости ветра в атмосфере / Н. И. Каргин, Р. А. Рыскаленко // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2007. – Т. 14. – № 4. – С. 715. – EDN IBQPOZ.

References

1. Karman, T. Aerodinamika : Izbrannye temy v ih istoricheskom razvitii / T. Karman. – Izhevsk: Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika, 2001. – 208 s. – ISBN 5-93972-094-3. – EDN RXGTVX.
2. YUdin, YU. I. Raschyot aerodinamicheskikh usilij / YU. I. YUdin, G. YU. Ishcheykin // Morskije intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – № 4-3(46). – S. 24-31. – EDN KFWMSL.
3. Anosov, A. N. Vliyanie vetra na manevrennyye elementy sudov / A. N. Anosov, D. G. Klijman // Molodezh'. Nauka. Innovacii. – 2022. – T. 1. – S. 26-37. – EDN PTSDEE.
4. Balsa Jepes Aldrin Segundo. Raschet polya vetra nad okeanom: special'nost' 11.00.09: av-toreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk / Balsa Jepes Aldrin Segundo. – Sankt-Peterburg, 2000. – 15 s. – EDN NFUFJH.
5. Kargin, N. I. Vychislitel'nye modeli dlya rascheta vektornykh harakteristik polya skorosti vetra v atmosfere / N. I. Kargin, R. A. Ryskalenko // Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matema-tiki. – 2007. – T. 14. – № 4. – S. 715. – EDN IBQPOZ.