

судна от количества термов её лингвистических переменных, а также от характера изменения величин, согласно которым формируется входной сигнал. Дальнейших исследований требуют вопросы выбора вида функций принадлежности для термов и их количества, алгоритма формирования базы правил и типа самой нечёткой системы, ответы на которые позволят подойти к решению задачи синтеза нечёткой системы, обладающей заданным уровнем точности. Наиболее перспективными в этом отношении являются гибридные нейронечёткие системы, параметры которых настраиваются в соответствии с особенностями моделируемой динамики объекта.

### Список литературы

1. *Дерябин В. В.* Модель движения судна в горизонтальной плоскости / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 60–67.
2. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH: науч. изд. / А. В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.
3. *Грязнов И. Е.* Особенности построения нечеткого регулятора / И. Е. Грязнов, И. Р. Кравченко // Известия ВОЛГГТУ. — 2008. — № 4. — С. 63–66.
4. *Игнатъев В. В.* Применение нечетких регуляторов, в которых в качестве эталонных используются системы управления с промышленными регуляторами / В. В. Игнатъев, И. С. Коберси // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 2 (139). — С. 123–127.
5. *Кудинов Ю. И.* Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пашенко // Проблемы управления. — 2004. — № 3. — С. 2–14.
6. *Усков А. А.* Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография / А. А. Усков — Смоленск: Изд-во Смоленского филиала Российского ун-та кооперации, 2013. — 153 с.
7. *Riid A.* Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control: PhD Thesis / A. Riid. — Tallinn Technical University: Department of Computer Control. Tallinn (Estonia). — 2002. — 227 p.
8. *Mamdani E. H.* An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller / E. H. Mamdani // Int. J. Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7. — P. 1–13.
9. *Дерябин В. В.* Прогнозирование скорости дрейфа судна на основе нейронной сети / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 5. — С. 3–7.
10. *Fossen T. I.* Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / Thor I. Fossen. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. — 575 p.
11. *Hana S.* Design of a Heading Autopilot for an Oil Tanker / S. Hana, S. Lansing // ECE147C/ME106 Project. — 2007. — № 2. — P. 1–10.

**УДК 656.61.052, 551.465.553**

**Н. Д. Крюков,**  
асп.;

**В. А. Шматков,**  
д-р техн. наук, проф.

## УЧЁТ ТЕЧЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВЕТРОМ, ПРИ ПЛАВАНИИ СУДОВ

### ACCOUNT OF WIND CURRENTS IN NAVIGATION

*Рассмотрены вопросы учёта течений при плавании судов в открытом море, в том числе учёт течений, генерируемых ветром. Описана классическая теория Экмана. Показано, что в течение последнего*

времени были достигнуты успехи в вопросе определения влияния ветра на поверхность океана, в частности, получены результаты специальных исследований теории Экмана. На основании представленных экспериментов и исследований разработана уточнённая формула для учёта экмановского течения. Показано, что при учёте течений генерируемых ветром необходимо рассчитывать не только экмановское течение, но также течение, вызванное волновым переносом масс. Предложена новая методика расчёта навигационных характеристик ветровых течений в открытом море, как в поверхностном слое океана, так и на его различных горизонтах, что даёт возможность более точно определить их влияние на объекты, находящиеся как на поверхности, так и в толще воды.

*Questions of current registration are observed during vessels sailing in the high sea, in particular registration of wind currents. Classical Ekman theory is described, it is shown that in following time definite success was arrived in questions of wind influence on the ocean surface. Special results of Ekman theory are shown. Based on described experiments and exploring the new formula is suggested for Ekman current registration. It is shown that during wind currents registration it is necessary to calculate not only Ekman current but also currents generated by wave water mass transition. The new method of calculation of navigation characteristic of wind currents on the high sea is proposed as in surface layer like in it different horizons witch give an opportunity to evaluate their influence on objects situated on water surface and also in water depth.*

*Ключевые слова: теория Экмана, волновое течение, ветровое течение, тангенциальное напряжение, глубина экмановского слоя.*

*Key words: The Ekman theory, wave current, wind current, tangential stress, depth of Ekman level.*

**В** МОРСКОЙ навигации при ведении счисления и прокладке курса необходимо учитывать внешние факторы, вызывающие снос судна, такие как ветровой дрейф и снос течениями. Как правило, именно течения оказывают наибольшее влияние на расхождение между истинным курсом и путевым углом, а также на разницу между значением скорости, полученным с помощью лага, и фактическим значением скорости судна. При плавании в условиях отсутствия ветра и волнения для определения истинной скорости судна и угла сноса, направление и скорость течения могут быть определены с использованием различных климатических и навигационных пособий [1] – [3] и др., на всем маршруте перехода. Для этого последний делится на зоны в соответствии с изменчивостью течения, и для каждой зоны, в которой скорость и направление течения имеют равные параметры, вносятся коррективы в расчёты скорости и курса судна.

Так как над поверхностью Мирового океана практически постоянно и повсеместно дует ветер, для навигации крайне важно учитывать временные течения, вызванные ветром. Во всех навигационных пособиях ([4] и др.) скорость ветровых течений предлагается рассчитывать по формуле

$$V_0 = \frac{0,0127}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10} \varphi \geq 10^\circ, \quad (1)$$

где  $U_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря в м/с;  $\varphi$  – географическая широта в градусах.

При этом угол отклонения ветрового течения от направления ветра принято считать от 18 до 40° вправо в северном полушарии и влево в южном в зависимости от скорости ветра и широты места [3], [4]. Авторство данной формулы неизвестно, но некоторые исследователи отмечают, что данная формула была получена в результате наблюдения за сносом судов. Однако дальнейшие наблюдения показали, что значения, полученные по данной формуле, не отвечают реальным данным, и формула требует уточнения.

Современные исследования вопроса учёта ветрового течения в основном сводятся к математическому моделированию течений в узкостях, мелководьях и замкнутых акваториях [5] – [9], а также описанию различных экспериментов и наблюдений влияния ветра на поверхность океана [7], [8], не предоставляя конечному пользователю конкретного решения для учёта течений, генерируемых ветром.

**Течение Экмана.** Теоретическое решение для определения скорости течений, генерируемых ветром, было выполнено В. Экманом в начале XX в. [10]. Ученый использовал уравнения движения вязкой жидкости (уравнения Навье – Стокса), решая их при следующих допущениях:

$\rho = \text{const}$  – вода несжимаема, море однородно по плотности;

$v_x \neq 0; v_y \neq 0; v_z = 0$  – рассматривается только движение в горизонтальной плоскости;

$\frac{dv}{dt} = 0$  – течение установившееся;

$U = \text{const}$  – ветер имеет постоянную скорость и направление;

$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = 0$  – море безбрежно, поверхность горизонтальна.

Величина тангенциального напряжения постоянна:

$$\left. \begin{aligned} T_{xz} &= \rho A \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ T_{yz} &= \rho A \frac{\partial v_y}{\partial z} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $T_{xz}$  и  $T_{yz}$  – тангенциальное напряжение в направлениях  $x$  и  $y$ ;  $\rho$  – плотность морской воды;  $A$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $v_x, v_y$  – проекции скорости течения на оси  $OX$  и  $OY$ .

Решение Экмана имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= V_0 \exp(-az) \cos\left(\frac{\pi}{4} - az\right); \\ v_y &= V_0 \exp(-az) \sin\left(\frac{\pi}{4} - az\right). \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

При условии, что ветер дует в северном направлении,  $T = T_{yz}$ . Входящие в это решение константы равны:

$$V_0 = \frac{T}{\sqrt{\rho^2 f A}}; \quad (4)$$

$$a = \sqrt{\frac{f}{2A}}, \quad (5)$$

где  $f = 2\omega \sin \varphi$  — параметр Кориолиса;  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  – географическая широта;  $V_0$  – абсолютная величина скорости течения на морской поверхности.

Следовательно, для расчёта скорости поверхностного ветрового течения необходимо иметь значения параметров  $T$  и  $A$  (тангенциальное напряжение и коэффициент турбулентной вязкости соответственно).

Тангенциальное напряжение, вызываемое силой трения ветра о поверхность воды, достаточно хорошо изучено, имеет широкое применение в волновых моделях, которые, в свою очередь, имеют высокий уровень корреляции с реальными наблюдаемыми данными, и может быть описано общеизвестной формулой:

$$T = \rho_a U_*^2, \quad (6)$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $U_*$  – скорость трения (скорость на уровне поверхности воды).

Значение  $U_*$  может быть найдено по формуле

$$U_* = U_{10} \sqrt{C_D}, \quad (7)$$

где  $C_D$  – коэффициент трения.

Многочисленные экспериментальные исследования коэффициента трения [11], [12] показали, что его зависимость от скорости ветра, измеренной на высоте 10 м, имеет простой вид:

$$C_D = (a + bU_{10})10^{-3}. \quad (8)$$

В модели WAVEWATCH, разработанной в Центре океанического моделирования США в апреле 1999 г., для связи скорости трения со скоростью ветра на высоте 10 м применяется коэффициент трения [11], [13]:

$$C_D = (0,8 + 0,065U_{10})10^{-3}. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции между высотой наблюдаемого волнения и высотой волн рассчитанной по модели WAVEWATCH с использованием формулы (9) составляет более 0,9.

Поскольку скорость течения Экмана убывает с глубиной по экспоненте, то глубина, на которую распространяется течение, может быть выбрана произвольно. Экман предложил считать нижней границей глубину  $D_E$ , на которой вектор скорости течения направлен противоположно вектору скорости на поверхности. Это происходит на глубине  $D_E = \frac{\pi}{a}$ . Таким образом, толщина слоя Экмана определяется по формуле:

$$D_E = \sqrt{\frac{2\pi^2 A}{f}}. \quad (10)$$

Эмпирический эквивалент этой формулы имеет вид [10]:

$$D_E = \frac{7,6}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}, \quad (11)$$

В конце прошлого века были проведены специальные исследования, направленные на изучение вопроса определения скорости ветрового течения. Наиболее значительный вклад внесли исследования ветровых течений, выполненные Р. Уоллером и А. Пледдманном, они проводились на глубине от 2 до 132 м, с использованием 14 измерителей направления течения, установленных на плавающей инструментальной платформе Flip [14]. Е. Ральф и П. Ниилер в течение почти восьми лет отслеживали в Тихом океане 1503 дрейфующих буя, плавучие якоря которых находились на глубине до 15 м. Данные об изменении скорости ветра поступали каждые шесть часов из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [15].

Согласно вычислениям Е. Ральфа и П. Ниилера, глубина экмановского слоя и скорость ветрового течения имеют следующий вид [14]:

$$V_0 = \frac{0,0068}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}; \quad (12)$$

$$D_E = \frac{7,12}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}. \quad (13)$$

Как видно из сравнения формул (11) и (13), определяемая по ним глубина слоя Экмана имеет незначительные отличия, в то время как скорость ветрового течения, определяемая по формулам (1) и (12), отличается практически в два раза. Это дает возможность исключить из расчета скорости поверхностного течения коэффициент  $A$ , выразив его через  $D_E$ , так как значение глубины экмановского слоя определяется просто и достаточно точно из натурных наблюдений.

Решив совместно уравнения (4), (6), (7), (9) и (13), получим аналитическое выражение для расчета поверхностного ветрового течения:

$$V_0 = \frac{\sqrt{2}\pi\rho_a C_D U_{10}^2}{\rho 2\omega \sin \varphi D_E}. \quad (14)$$

Коэффициент корреляции скорости экмановского течения, рассчитанного по формулам (13) и (14), составляет 0,88. Формула (14) даёт возможность вычислять скорость течения при изменении коэффициента трения  $C_D$  в зависимости от скорости ветра. Через глубину  $D_E$  можно вычислять постоянную  $a$  в уравнениях (3), определяя по ним скорость течения на различных глубинах. Это

позволяет более точно определять влияние течения на объект, находящийся как на поверхности, так и в толще воды.

Направление ветрового течения определяется как угол между направлением дующего ветра и направлением течения генерируемого им. Исследования данного вопроса проводили Н. Максименко и П. Ниилер[14]. На основании данных о положении дрейфующих буев с плавучими якорями, погруженными на глубину 15 м, показаний спутниковых альтиметров, гравиметрии, а также данных проекта GRACE и карт ветров, согласно обновленному анализу NCAR/NCEP, была определена зависимость направления течения от широты, приведенная на рис. 1 [14].

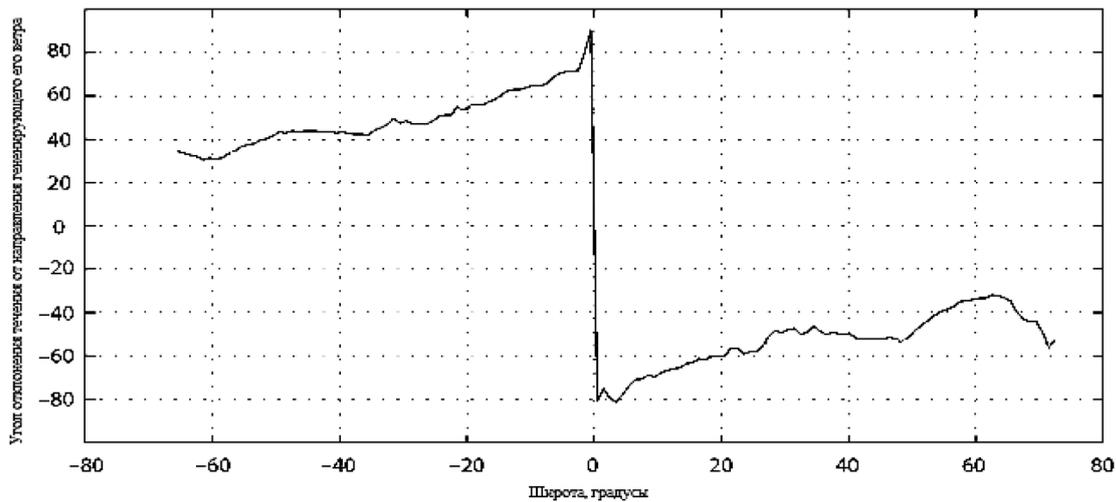


Рис. 1. Угол отклонения направления течения от направления ветра в зависимости от широты ( $\gamma$ )

**Волновое течение.** Ветер генерирует не только ветровое течение, но и волны. Одной из составляющих волнения является волновой перенос массы воды, обусловленный тем, что траектории движения частиц воды являются незамкнутыми окружностями с радиусом, уменьшающимся с глубиной по экспоненциальному закону. В результате часть воды действительно движется вперед в направлении распространения волны. Это движение получило название *волновое течение*. Волновые течения хорошо коррелируются с высотой ветровых волн. Благодаря турбулентной природе ветра и действию внутреннего трения воды, течения со временем углубляются, достигая предельной глубины, зависящей от вертикальной устойчивости вод и силы ветра. Эти течения вообще не рассматриваются ни в одном навигационном пособии.

Для расчёта скорости волнового течения можно применять формулу [16]:

$$V_{\text{волн.теч}} = \left(\frac{h}{2}\right)^2 \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi Z}{\lambda}\right), \quad (15)$$

где  $h$  – высота волны;  $\lambda$  – длина волны;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $Z$  – горизонт от поверхности моря, на котором определяется скорость течения.

На основе данных наблюдений за связью между высотой волны и скоростью волнового течения была составлена эмпирическая формула

$$V_{\text{волн.теч}} = 0,115h^{0,656}, \quad (16)$$

которая является более удобной при штурманском учёте волнового течения, так как исключает параметр длины волны, который не всегда может быть достоверно получен в условиях судна.

Объединив формулы (14) – (16) и рис. 1, получим результирующие формулы для расчёта скорости и направления течений, генерируемых ветром:

$$V_{\text{вет.теч}} = \sqrt{V_{\text{волн.теч}}^2 + V_0^2 + 2V_{\text{волн.теч}} V_0 \cos \gamma}; \quad (17)$$

$$\theta_{\text{вет.теч.}} = \sin^{-1} \frac{V_0 \sin \gamma}{V_{\text{вол.теч.}}} \quad (18)$$

В качестве иллюстрации влияния суммарного ветрового течения на судно, в табл. 1 и 2 приведены скорость и отклонение вектора течения от направления ветра для судна с осадкой 8 м при следовании им по рекомендованному пути перехода Гибралтар – о. Анегада (Антильские острова) [1].

Таблица 1

**Скорость суммарного ветрового течения, уз**

Широта	Скорость ветра, м/с			
	10	15	20	25
25	0,23	0,42	0,80	1,33
30	0,22	0,39	0,78	1,32
35	0,20	0,37	0,75	1,28

Таблица 2

**Угол отклонения суммарного течения от направления ветра, град.**

Широта	Скорость ветра, м/с			
	10	15	20	25
25	54	55	43	36
30	44	45	34	29
35	41	42	31	26

Таблица 3

**Ошибка неучтенного ветрового течения при переходе Гибралтар – о. Анегада, ч**

Ошибка неучтенного суммарного ветрового течения, ч	Скорость ветра, м/с			
	10	15	20	25
	3,0	5,4	10,5	17,0

В табл. 3 приведены значения ошибок в расчёте времени перехода для рекомендованного пути Гибралтар – о. Анегада, длина которого составляет 3174 морских миль. При средней скорости перехода в 15 уз ошибка неучтенного суммарного ветрового течения будет иметь значение от 3 ч и более при средней скорости ветра 10 м/с.

### Вывод

На основе современных исследований влияния ветра на поверхность океана, таких как образование экмановского течения, генерация волн и волнового течения, можно сделать вывод о том, что на судно или другой объект, находящийся на поверхности или в толще океана, будет оказывать влияние суммарное ветровое течение, которое складывается из векторной суммы волнового и экмановского течений. Для расчёта навигационных характеристик суммарного течения генерируемого ветром можно применять формулы (17) и (18). Расчёт скорости и направления суммарного ветрового течения по этим формулам не представляет сложности и может проводиться штурманом при ведении навигации в открытом море. Также данные формулы могут применяться в специализированном программном обеспечении, направленном на определение положения буксируемого забортного оборудования в зависимости от внешних факторов.

### Список литературы

1. Atlas of pilot chart North Atlantic Ocean// National Imagery and Mapping Agency US. — 2002. — NV PUB. 106. — P. 38.
2. *Cornell. J.* Ocean Atlas Pilot Chart for all Ocean of the World / J. Cornell, I. Cornell. — Midpoint Trade Books Incorporated, 2011. — P. 120.
3. Океанские пути мира. — Л.: ГУНИО, 1980. — 200 с.
4. Руководство по расчёту наивыгоднейших путей плавания судов на морях и океанах. — Л.: Гидрометеоздат, 1976. — 160 с.
5. *Лукьянов П. В.* Динамика компактного вихря шельфовой зоны под воздействием неоднородного нестационарного ветра в районе северо-восточного побережья Чёрного моря / П. В. Лукьянов // Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества. — 2013. — № 4. — С. 90–97.
6. *Чикин А. Л.* Расчет ветровых течений в Керченском проливе с помощью двухслойной математической модели/ А. Л. Чикин, П. А. Бирюков // Известия высших учебных заведений. — 2010. — № 5. — С. 12–16.
7. *Polton J. A.* Can Drake Passage Observations Match Ekman's Classic Theory? / J. A. Polton // Journal of Physical Oceanography. — 2013. — Т. 43. — № 8. — P. 1733–1740.
8. *Lenn Y. D.* Observations of Ekman currents in the Southern Ocean / Y. D. Lenn, T. K. Chereskin // Journal of Physical Oceanography. — 2009. — Т. 39. — № 3. — P. 768–779.
9. *Щевьев В. А.* Ветровые течения во внутренних морях и озерах [Электронный ресурс]/ В. А. Щевьев // Электронный журнал «Исследовано в России». — Режим доступа: <http://www.sci-journal.ru/articles/2008/005.pdf> 25.03.2015 (дата обращения — 25.05.2015).
10. *Ekman V. W.* On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean Currents / V. W. Ekman // Arkiv for matematik, Astronomi, och Fysic. — 1905. — Вып. 2 (11). — С. 1–52.
11. *Давидан И. Н.* Сравнительная характеристика современных математических моделей ветрового волнения и их применение для решения прикладных задач / И. Н. Давидан, Г. И. Давидан // Тр. Государств. океанограф. ин-та / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Исследования океанов и морей. — 2005. — № 209. — С. 107–128.
12. Морё. Развитие идей и наблюдений, связанных с изучением моря / отв. ред. В. Тиманов; пер. с англ. Б. Каган [и др.]. — Л.: Гидрометеоздат, 1965. — 464 с.
13. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е. С. Нестерова. — М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ), 2013. — 295 с.
14. *Stewart R.* Introduction to Physical Oceanography / R. Stewart. — Texas: Department of Oceanography Texas A&M University, 2008. — P. 353.
15. *Ralph E. A.* Wind-driven currents in the tropical / E. A. Ralph, P. P. Niiler // Journal of Physical Oceanography. — Т. 29 (9). — 1999. — P. 2121–2129.
16. *Абузяров З. К.* Оперативное океанографическое обслуживание / З. К. Абузяров, И. О. Думанская, Е. С. Нестеров. — М.: Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009. — 288 с.