

УДК 624.971:629.5  
У 89

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА ВНЕШНИХ НАГРУЗОК НА КОЛОННУ МОРСКОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В. С. Ухо, асп.

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Определены величины внешних нагрузок, действующих на колонну морской ветроэнергетической установки. Составлена расчетная схема внешних нагрузок, которая может использоваться при дальнейшем определении основных геометрических характеристик колонны.

**Ключевые слова:** внешние нагрузки, колонна, морская ветроэнергетическая установка, расчетная схема.

**Анотація.** Визначено величини зовнішніх навантажень, що діють на колону морської вітроенергетичної установки. Складено розрахункову схему зовнішніх навантажень, яка може бути використана при подальшому визначенні основних геометричних характеристик колони.

**Ключові слова:** зовнішні навантаження, колона, морська вітроенергетична установка, розрахункова схема.

**Abstract.** The values of external loads, which affect the column of the wind-driven power plant have been determined. The design model of external load is developed which can be used in further calculations of main geometrical characteristics.

**Keywords:** external loads, column, wind-driven power plant, design model.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В практике мирового строительства ветроэнергетических установок (ВЭУ) несущая колонна рассматривается в виде станины, держащей ветроротор и передающей выработанную энергию через сеть кабелей к подстанциям. В то же время она воспринимает большое число нагрузок, которые разделяются на три группы [7] и используются для прочностных расчетов тех или иных конструктивных элементов. Отсутствие точных данных о величине нагрузок либо пренебрежение некоторыми из них приводит к неточным результатам при проектных расчетах и может повлечь за собой как потерю прочности либо устойчивости отдельных элементов колонны, так и разрушение установки в целом.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Большинство геометрических характеристик колонны ВЭУ, в частности ее высота, нижний и верхний диаметры (в случае изготовления колонны в виде конуса), число секций, определяются исходя из технических требований либо эмпирических зависимостей. Для определения толщины обшивки колонны и ее изменения по высоте в [10] рекомендуется использовать эмпирическое отношение

$$\frac{D}{t} \approx 200,$$

где  $D$ ,  $t$  — наружный диаметр и толщина обшивки колонны, мм.

Данная пропорция не соответствует действительным распределениям внешних нагрузок на колонну и внутренним усилиям, которые они вызывают, и обе-

спечивает прочность колонны с ощутимым запасом, что, в свою очередь, приводит к увеличению металлоемкости и общей стоимости ВЭУ.

Классификационным обществом DNV разработан ряд стандартов, посвященных проектированию морских ВЭУ. Одним из таких стандартов является DNV-OS-C101 [9], в котором приведены расчетные формулы для определения толщин обшивки и подкрепляющего набора колонны ВЭУ, но для данных расчетов основной составляющей является величина внешних нагрузок.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — точное определение внешних нагрузок на колонну ВЭУ для определенного ветрового района Украины.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Мировой рост энергопотребления, а также исчерпаемость мировых запасов нефти и газа, как основных энергоносителей, привели к широкому и активному использованию альтернативных источников энергии во всем мире. Большинство ведущих европейских и мировых стран уже на протяжении десяти лет активно используют различные источники возобновляемой энергии, среди которых первое место занимает ветроэнергетика, как наиболее дешевый способ выработки энергии.

Украина как страна, стремящаяся к евроинтеграции, также старается выполнять основные директивы, принятые на саммитах стран — членов ЕС. Одной из таких является Директива 2001/77/ЕС «О создании благоприятных условий продажи электроэнергии, полученной от возобновляемых источников энергии, на внутреннем рынке электрической энергии». Она требует от стран — членов ЕС установить

целевые показатели потребления электроэнергии, основанной на возобновляемых источниках, в размере 12% валового внутреннего потребления, а также каждые пять лет утверждать и публиковать отчет, устанавливающий национальные целевые показатели для будущего потребления электроэнергии, полученной от возобновляемых источников. Для достижения поставленных ЕС целей в Украине необходимо увеличить число ветроэлектростанций (ВЭС), поскольку ВЭС, которые еще существуют, не только морально устарели, но и вырабатывают значительно меньше энергии по сравнению с современными ВЭС. В связи с этим в Украине началось строительство современных ВЭУ мощностью 2 МВт и более. Первые такие ВЭС устанавливаются в Николаевской области, в Очаковском и Березанском районах. К началу 2012 года в Николаевской области запущена в эксплуатацию Очаковская ВЭС суммарной мощностью 20 МВт, состоящая из 10 отдельно стоящих ВЭУ. Остальные ВЭС находятся на стадии проектирования либо строительства.

Морская ВЭУ имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с наземными [6] и для обеспечения альтернативной энергией населенных пунктов других районов Украины необходимо осваивать и такое расположение ВЭУ. На рис. 1 приведен, по данным Гидрометцентра Украины [3], кадастр ветров со значениями среднегодовых скоростей ветров.

Как показывают метеорологические исследования, наибольшие значения среднегодовой скорости ветра наблюдаются в Черновицкой области (р-н Карпатских гор) и у южного побережья Крыма (р-н мыса Меганом) и составляют 6,2 м/с и более. Используя известную зависимость скорости ветра от высоты с учетом рельефа местности [1], можно определить скорость ветра на высоте ступицы ротора и сделать

соответствующие выводы о целесообразности применения ВЭУ в данном районе:

$$V_1 = V_0 \cdot \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^{k_m},$$

где  $V_1, V_0$  — скорость ветра на расчетной высоте и высоте флюгера соответственно, м/с;  $H_1, H_0$  — расчетная высота и высота флюгера соответственно, м;  $k_m$  — степенной показатель, принимаемый с учетом степени шероховатости подстилающей поверхности; в [4] принято  $k_m = 0,167$ . Стандартная высота флюгера  $H_0 = 10$  м, тогда скорость ветра на высоте ступицы современной морской ВЭУ  $H_1 = 80,0$  [6] будет

$$V_{80} = V_{10} \cdot \left( \frac{H_{80}}{H_{10}} \right)^{k_m} = 6,2 \cdot \left( \frac{80}{10} \right)^{0,167} = 8,77 \text{ м/с},$$

что вполне достаточно для стабильной работы ВЭУ [8].

Для определения ветровых нагрузок используется СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [5]. В соответствии с разделом 6 из [5] ветровую нагрузку следует определять как сумму средней и пульсационной составляющих. Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте  $z$  над поверхностью земли

$$w_m = w_0 \cdot k \cdot c. \quad (1)$$

Здесь  $w_0$  — нормативное значение ветрового давления, кПа [5, п. 6.4]; принято  $w_0 = 0,48$  кПа;

$k$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте [5, табл. 6], определяется в зависимости от типа местности:  $A$  — открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра;  $B$  — городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно

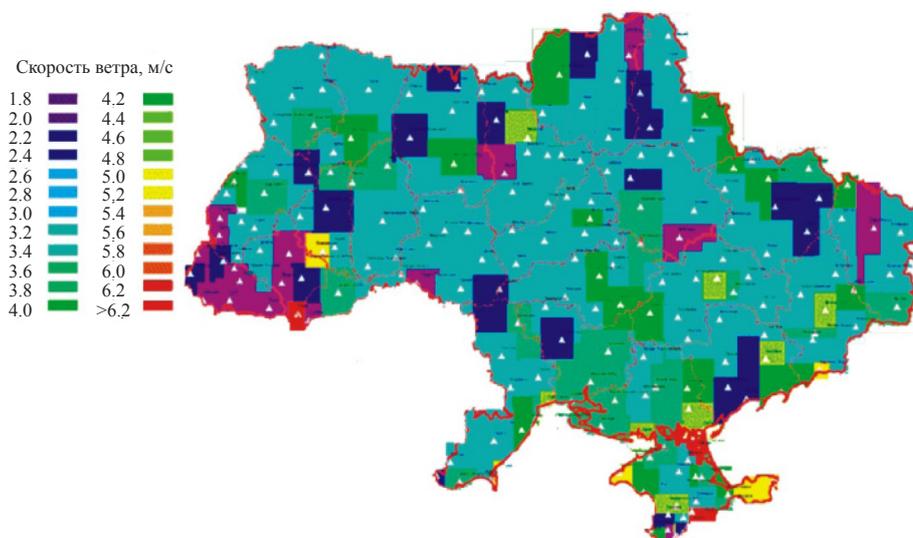


Рис. 1. Кадастр ветров Украины

покрытые препятствиями высотой более 10 м;  $C$  — городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м. Для морской ВЭУ принята местность типа  $A$ ;

$c$  — аэродинамический коэффициент [5, прилож. 4]. Для сооружений и их элементов с круговой цилиндрической поверхностью (резервуары, градирни, башни, дымовые трубы), проводов и тросов, а также круглых трубчатых и сплошных элементов сквозных сооружений  $c_x = k_1 \cdot c_{x0}$ , где  $k_1$  — коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента  $\lambda_c$ . При вертикальном расположении сооружения  $\lambda_c = 2\lambda$ ;  $\lambda$  — коэффициент, учитывающий соотношение сторон:  $\lambda = \frac{l}{b}$ ,  $l, b$  — соответственно максимальный и минимальный размеры сооружения или его элемента в плоскости, перпендикулярной направлению ветра. Тогда  $\lambda = \frac{l}{b} = \frac{80,0}{3,0} = 26,67$  и  $\lambda_c = 2\lambda = 2 \cdot 26,67 = 53,34$ .

Методом интерполяции по табл. 1 прилож. 4 из [5] определяем коэффициент

$$k_1 = 0,9 + \frac{0,95 - 0,9}{100 - 50} \cdot (53,34 - 50) = 0,903.$$

Величина  $c_{x0}$  определяется по графику к схеме № 14 [5, прилож. 4]. Для определения ее необходимо вычислить число Рейнольдса, а также значение  $\Delta$ .

Число Рейнольдса

$$Re = 0,88d \sqrt{w_0 \cdot k(z) \cdot \gamma_i} \cdot 10^5,$$

где  $d = 3,0$  — диаметр конструкции, м (принято меньшее значение);  $z$  — расстояние от поверхности моря до центра тяжести колонны, принято  $z = 0,5h + h_{\text{фл}}$  ( $h_{\text{фл}} = 5$  м — возвышение монтажного фланца колонны над уровнем моря);  $z = 80 \cdot 0,5 + 5 = 45$  м;  $k(z) = 1,55$  определяется методом интерполяции в соответствии с п. 6.5 из [5];  $\gamma_i = 1,4$  — коэффициент надежности по ветровой нагрузке, определяется в соответствии с п. 6.11 из [5]. Таким образом,

$$Re = 0,88 \cdot 3,0 \cdot \sqrt{0,48 \cdot 1,55 \cdot 1,4} \cdot 10^5 = 2,69 \cdot 10^5;$$

Таблица 1. Расчет средней составляющей ветровой нагрузки

$z$ , м	$w_{0z}$ , Па	$k$	$c$	$w_m$ , Па
0	480	0,75	0,641	230,76
10	480	1,0	0,641	307,68
20	480	1,25	0,641	384,60
30	480	1,375	0,641	423,06
40	480	1,5	0,641	461,52
50	480	1,6	0,641	492,29
60	480	1,7	0,641	523,06
70	480	1,775	0,641	546,13
80	480	1,85	0,641	569,21
90	480	1,925	0,641	592,28
100	480	2,0	0,641	615,36

Значение  $\Delta$  принимается:  $\Delta = 0,001$  м — для стальных сооружений,  $\Delta = 0,005$  м — для бетонных и железобетонных сооружений; при  $\Delta/d = 0,001/4,3 = 2,33 \cdot 10^{-4}$ , по графику,  $c_{x0} = 0,7$  — для стальных колонн; при  $\Delta/d = 0,005/4,3 = 1,13 \cdot 10^{-3}$ , по графику,  $c_{x0} = 0,7$  — для железобетонных колонн.

Таким образом,  $c_x = k \cdot c_{x0} = 0,916 \cdot 0,7 = 0,641$  — для стальных и железобетонных башен.

Рассчитанные по формуле (1) значения  $w_m$  приведены в табл. 1.

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки на высоте  $z$  для сооружений, которые можно рассматривать как систему с одной степенью свободы,

$$w_p = w_m \cdot \xi \cdot \zeta \cdot v. \quad (2)$$

Здесь  $\xi$  — коэффициент динамичности, определяемый по рис. 3 из [5] в зависимости от параметра

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\gamma_i w_0}}{940 f_1}$$

и логарифмического декремента колебаний  $\delta$  [5, п. 6.8];  $\gamma_i = 1,4$  — коэффициент надежности по нагрузке;  $w_0 = 480$  — нормативное значение ветрового давления, Па;  $f_1 = 4,3$  — для стальных колонн, определяется по табл. 8 из [5];  $f_1 = 1,4$  — для железобетонных колонн;

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{1,4 \cdot 480}}{940 \cdot 4,3} = 0,006$$
 — для стальных ко-

$$\text{лонн, } \varepsilon = \frac{\sqrt{1,4 \cdot 480}}{940 \cdot 1,4} = 0,020$$
 — для железобетонных колонн;

$\delta = 0,15$  — для стальных башен, мачт, футерованных дымовых труб, аппаратов колонного типа, в том числе на железобетонных постаментов;  $\delta = 0,30$  — для железобетонных и каменных сооружений, а также зданий со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций.

По графику рис. 2 [5] коэффициент  $\xi = 1,25$  — для стальных колонн,  $\xi = 1,50$  — для железобетонных.

В формуле (2)  $\zeta$  — коэффициент пульсации давления ветра на уровне  $z$ , принимаемый по табл. 7 из [5];

$v$  — коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра.

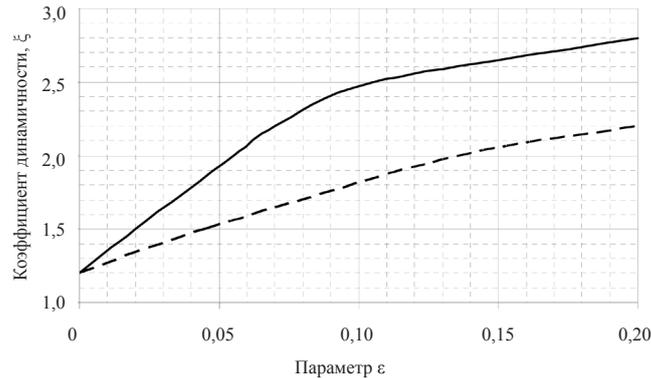


Рис. 2. График определения коэффициента динамичности: ----- для  $\delta=0,3$ ; — для  $\delta=0,15$

Для сооружений с круговой цилиндрической поверхностью при определении коэффициента  $\nu$  следует принимать  $b=0,7d$ . Тогда  $b=0,7 \cdot 4,3=3,01$  м;  $h=80$  м;  $\rho=b=3,01$ ;  $\chi=h=80$ .

По табл. 9 из [5] методом интерполяции определяем  $\nu=0,741$ .

Расчитанные значения  $w_p$  и суммарное давление  $w=w_m+w_p$  приведены в табл. 2 и 3. В таблицах принято: ст. — стальная, ж/б — железобетонная колонны.

Расчитанные данные ветровых нагрузок представлены на рис. 3.

Помимо ветровых нагрузок на колонну ВЭУ могут действовать также другие внешние нагрузки — волновая, снеговая и ледовая.

Для удобства монтажа колонны, а также для предотвращения волновых ударных нагрузок на колонну монтажный фланец, соединяющий морской фундамент с несущей колонной ВЭУ, расположен на высоте 5 м от уровня моря. По статистическим данным [2], акватория вблизи мыса Меганом относится ко II району Черного моря, для которого повторяемость  $P$  и обеспеченность  $F$  высот волн представлены в табл. 4.

Таблица 2. Расчет пульсационной составляющей ветровой нагрузки

$z$ , м	$w_m$ , Па		$\xi$		$\zeta$	$\nu$	$w_p$ , Па	
	ст.	ж/б	ст.	ж/б			ст.	ж/б
0	230,76	230,76	1,25	1,50	0,85	0,741	181,08	217,30
10	307,68	307,68	1,25	1,50	0,76	0,741	216,59	259,91
20	384,60	384,60	1,25	1,50	0,69	0,741	245,80	294,96
30	423,06	423,06	1,25	1,50	0,655	0,741	256,67	308,0
40	461,52	461,52	1,25	1,50	0,62	0,741	265,04	318,04
50	492,29	492,29	1,25	1,50	0,60	0,741	273,59	328,31
60	523,06	523,06	1,25	1,50	0,58	0,741	281,0	337,20
70	546,13	546,13	1,25	1,50	0,57	0,741	288,34	346,0
80	569,21	569,21	1,25	1,50	0,56	0,741	295,25	354,30
90	592,28	592,28	1,25	1,50	0,55	0,741	301,73	362,08
100	615,36	615,36	1,25	1,50	0,54	0,741	307,79	369,35

Таблица 3. Расчет суммарной ветровой нагрузки, Па

$z$ , м	$w_m$		$w_p$		$w$	
	ст.	ж/б	ст.	ж/б	ст.	ж/б
0	230,76	230,76	181,08	217,30	411,84	448,06
10	307,68	307,68	216,59	259,91	524,27	567,59
20	384,60	384,60	245,80	294,96	630,40	679,56
30	423,06	423,06	256,67	308,0	679,73	731,06
40	461,52	461,52	265,04	318,04	726,56	779,56
50	492,29	492,29	273,59	328,31	765,88	820,60
60	523,06	523,06	281,0	337,20	804,06	860,26
70	546,13	546,13	288,34	346,0	834,47	892,13
80	569,21	569,21	295,25	354,30	864,46	923,51
90	592,28	592,28	301,73	362,08	894,01	954,36
100	615,36	615,36	307,79	369,35	923,15	984,71

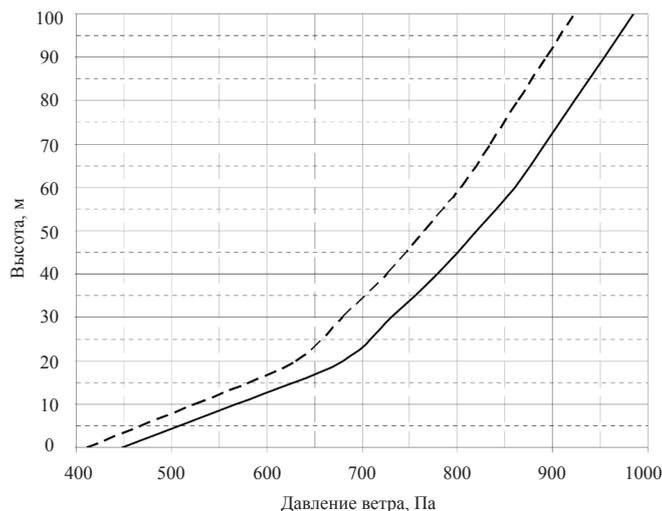


Рис. 3. График распределения ветрового давления по высоте: ----- для стальной колонны; — для железобетонной

Таблица 4. Повторяемость  $P$  и обеспеченность  $F$  высот волн для II района Черного моря, %

Высота волн, м	Зима		Весна		Лето		Осень	
	$P$	$F$	$P$	$F$	$P$	$F$	$P$	$F$
<1	40	100	45	100	70	100	45	100
1–2	43	60	40	55	25	30	40	55
2–3	12	17	11	15	4	5	11	15
3–4	3	5	2,7	4	0,7	1	2,7	4
4–5	1,3	2	0,8	1,3	0,22	0,3	0,8	1,3
5–6	0,4	0,7	0,35	0,5	0,05	0,08	0,35	0,5

Таблица 5. Массовые характеристики механизмов и ветроротора

Название элемента	Масса, т
Лопасты (указана масса комплекта из 3 шт.)	23,7
Ступица без лопастей	17,0
Трансмиссия с главным валом на технологической раме	39,0
Главная рама	20,0
Кожух гондолы	1,5
Суммарная масса, т	<b>101,2</b>

Как видно из табл. 4, во II районе Черного моря наибольшую повторяемость и обеспеченность имеют волны небольшой высоты (1–2 м), что дает право не учитывать волновые нагрузки на колонну ВЭУ.

В соответствии с [5] гололедные нагрузки необходимо учитывать при проектировании воздушных линий электропередачи и связи, контактных сетей электрифицированного транспорта, антенно-мачтовых устройств и подобных сооружений, в группу которых колонна морской ВЭУ не входит. Поэтому при расчете колонны ВЭУ гололедной нагрузкой можно пренебречь.

Снеговая нагрузка, по [5], учитывается при действии снега на горизонтальную поверхность, что также позволяет отбросить эту составляющую общей нагрузки.

Таким образом, среди внешних нагрузок, вызываемых природными явлениями, учитывается только ветровая.

В связи со значительной массой ветроротора, генератора и вспомогательных механизмов на колонну ВЭУ будет действовать также осевое сжимающее усилие  $T$ . Масса элементов, вызывающих осевое усилие, приведена в табл. 5.

Используя 2-й закон Ньютона, величину осевых сжимающих усилий можно определить по формуле  $F=ma$  Н, где  $a=9,81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения;  $m$  — масса, кг. Таким образом,  $T=101,2 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 992770$  Н=992,77 кН.

Расчетная схема для определения параметров колонны с учетом внешних нагрузок, вычисленных ранее, представлена на рис. 4.

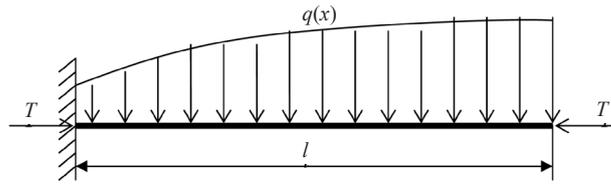


Рис. 4. Расчетная схема колонны ВЭУ:  $l$  — длина колонны, м;  $T$  — осевое сжимающее усилие, кН;  $q(x)$  — внешняя нагрузка, Па.

### ВЫВОДЫ

Из расчетной схемы нагрузок следует, что колонна ВЭУ может быть рассмотрена в виде стержня переменной жесткости, жестко заделанного с одной стороны и свободного — с другой, испытывающего

сложный изгиб от действия бокового распределенного давления и осевой сжимающей силы. Для последующих расчетов необходимо использовать численные методы СМК при сложном изгибе непряматических стержней либо работу [9].

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Васько, П. Ф.** Розрахунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строкових вимірювань швидкості вітру [Текст] / П. Ф. Васько // Технічна електродинаміка. — 2001. — № 6. — С. 45–49.
- [2] **Ветер и волны в океанах и морях** [Текст] : справочные данные / Регистр СССР. — М. : Транспорт, 1974. — 360 с.
- [3] **Кадастр ветров Украины** [Карты]. — Режим доступа: [http://nep.crimea.ua/info/vetryaniye\\_electrogeneratoru.php?page=6](http://nep.crimea.ua/info/vetryaniye_electrogeneratoru.php?page=6).
- [4] О зависимости скорости ветра от высоты с учетом рельефа местности [Электронный ресурс] / Н. С. Голубенко, С. И. Довгалюк, А. М. Фельдман, В. Б. Худик. — Режим доступа: [http://wind.dp.ua/download/o\\_zavisimosti\\_skorosti\\_vetra\\_ot\\_vysoty\\_s\\_uchetom\\_relefa\\_mestnosti.doc](http://wind.dp.ua/download/o_zavisimosti_skorosti_vetra_ot_vysoty_s_uchetom_relefa_mestnosti.doc).
- [5] **СНиП 2.01.07-85.** Нагрузки и воздействия [Текст]. — Взамен СНиП II-6-74 : Введ. 01.01.87. — М. : Изд-во стандартов, 2003. — 58 с.
- [6] **Ухо, В. С.** Анализ конструкций опорных колонн различных типов для морских ветроэнергетических установок [Текст] / В. С. Ухо // 36. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — № 5 (434). — С. 27–34.
- [7] **Ухо, В. С.** Определение внешних нагрузок на опорные колонны ветроэнергетических установок по стандартам различных КО [Текст] / В. С. Ухо // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матер. II Міжнар. наук.-техн. конф. — Миколаїв : НУК, 2011. — Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua>
- [8] **Ухо, В. С.** Современное состояние ВЭУ и проблема изготовления колонн для них [Текст] / В. С. Ухо // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матер. I Міжнар. наук.-техн. конф., присвяченої 90-річчю НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua>.
- [9] **DNV-OS-C101.** Design of offshore steel structures, general (LRFD METHOD) [Text]. — Det Norske Veritas. — October 2008. — 49 p.
- [10] **Zaaijer, M. B.** Comparison of monopile, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine [Text] / M. B. Zaaijer // Proceedings of OWEMES 2003. — ENEA, Italy, April 2003.

© В. С. Ухо

Надійшла до редколегії 27.01.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *Б. А. Бугаєнко*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2012