

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КОЛОННЫ МОРСКОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПО ПРАВИЛАМ DNV

Владимир Ухо

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова
54025, г. Николаев, просп. Героев Сталинграда, 9*

Vladimir Ukho

*National University of Shipbuilding named after admiral Makarov
54025, Nikolaev, ave. Heroes of Stalingrad, 9*

Аннотация. В статье выполнен расчет на прочность и устойчивость колонны морской ветроэнергетической установки (ВЭУ), как замкнутой кольцевой системы, в соответствии с действующими на нее нагрузками. Выбраны типоразмеры основных конструктивных элементов колонны. Выполнен сравнительный анализ колонн различных конструктивных типов по массовым и геометрическим показателям.

Ключевые слова: прочность, устойчивость, конструктивные элементы, массовые и геометрические характеристики.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При выборе материала и конструкции колонны морской ВЭУ определяющим фактором является то, что современный морской ветропарк состоит из большого числа отдельных ветроэнергетических установок [5]. Их число может составлять от двадцати до нескольких сотен. В связи с этим, изготовление составных частей установки должно осуществляться не только в короткие сроки, но и с минимальными материальными и трудовыми затратами. С этой целью колонна ВЭУ должна изготавливаться по модульной системе, то есть унифицированной, с максимальным применением автоматического и роботизированного труда.

В настоящее время наиболее подходящим материалом по физико-механическим характеристикам, а также пригодности к автоматизированному изготовлению с высоким качеством выходящей продукции является сталь. Конструкция колонны ВЭУ сплошной круговой формы (цилиндрической либо конической) дает возможность не только уменьшить нагрузки от набегающих потоков, но и обезопасить обслуживающий персонал, силовые линии передачи выработан-

ной энергии, внутреннее насыщение колонны и др [6].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для определения толщины обшивки колонны и формы ее изменение по высоте в [14] рекомендуется использовать эмпирическое отношение:

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

где: D – наружный диаметр колонны, мм;
 t – толщина обшивки колонны, мм.

Данная пропорция не соответствует действительным распределениям внешних нагрузок на колонну и внутренним усилиям, которые они вызывают, и обеспечивает прочность колонны с ощутимым запасом, что в свою очередь приводит к увеличению ее металлоемкости и общей стоимости.

Классификационным обществом DNV, разработан ряд стандартов, посвященных проектированию морских ВЭУ. Одним из таких стандартов является [14], в котором приведены расчетные формулы для определения толщин обшивки и подкрепляющего набора колонны ВЭУ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является расчет геометрических характеристик колонны морской ВЭУ (глакостенной и с подкрепляющими ребрами жесткости) в соответствии с действующими нагрузками с последующей проверкой прочности и устойчивости.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве опорной колонны морской ВЭУ принята цилиндрическо-коническая конструкция высотой 80 м, диаметром 4,3 м у основания и 3,0 м у вершины [7].

В соответствии с [14] минимальная толщина обшивки колонны определяется по формуле:

$$t_{\min} = \frac{14,3t_0}{\sqrt{f_{yd}}},$$

где $t_0=7$ мм – для основных конструктивных элементов;

$t_0=5$ мм – для вспомогательных конструктивных элементов;

f_{yd} – приведенный предел текучести, Н/мм²;

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M};$$

f_y – минимальный предел текучести материала; $f_y = 235$ Н/мм²

$$\gamma_M=1,1;$$

тогда: $f_{yd} = \frac{235}{1,1} = 213,64$ Н/мм²,

$$t_{\min} = \frac{14,3 \cdot 7}{\sqrt{213,64}} = 6,85 \text{ мм.}$$

В выполненных расчетах колонна разбита по высоте на 4 равных секции по 20 м каждая []. При рассмотрении колонны в виде замкнутой кольцевой системы расчетная схема может быть представлена в [3]. Такая схема также может применяться при расчетах трубопроводов, сосудов высокого давления, силосных башнях и других подобных системах. Как показано в [3], эпюра изгибающих

моментов и перерезывающих сил по сечению будет носить знакопеременный характер, но наибольшее влияние, при рассмотрении половины сечения, они будут оказывать на пролете в $0,64 \cdot d$, где d – диаметр колонны, м (рис.1). В таком случае опорный контур пластины будут составлять: длинна секции – как большая сторона, $0,64 \cdot d$ – меньшая сторона.

Толщина обшивки гладкостенной колонны ВЭУ, на которую действует боковое давление ветра, должна быть не меньше:

$$t = \frac{15,8k_a k_r s \sqrt{p_d}}{\sqrt{\sigma_{pd1} k_{pp}}},$$

где: k_a – поправочный коэффициент для соотношения сторон пластины; $k_a=(1,1-0,25s/l)^2$; при $s/l=0,4$ $k_{a \max}=1,0$; при $s/l=1$ $k_{a \min}=0,72$;

k_r – поправочный коэффициент для кривизны перпендикулярной р.ж.;

$$k_r=1-0,5s/r_c;$$

r_c – радиус кривизны, м;

s – расстояние между р.ж., или опорный контур пластины, расположенный вдоль обшивки, м; $s=0,64d$;

l – длина пролета пластины, м; принято $l=20$ м, по размеру одной секции башни; тогда поправочный коэффициент для опорного сечения $k_a=(1,1-0,25s/l)^2=(1,1-0,25 \cdot 0,64 \cdot 4,3/20)^2=1,14$; принято $k_a=1,0$ для всех сечений.

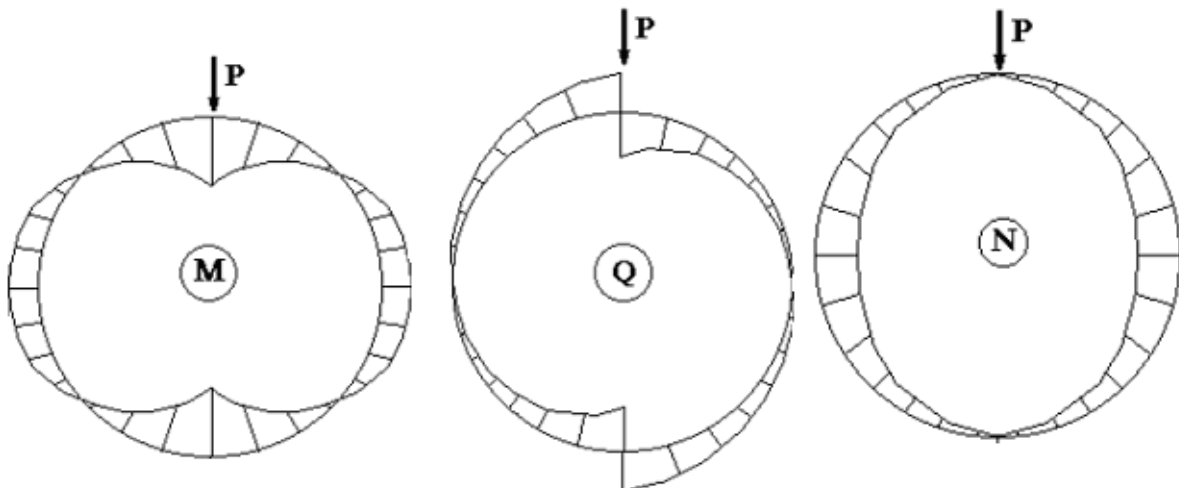


Рис. 1. Эпюры распределения нагрузок: M – изгибающие моменты; Q – перерезывающие силы; N – продольные усилия

Fig 1. Diagram of the load distribution: M – bending moments; Q – shear forces; N – longitudinal forces

Поскольку в любом сечении колонны радиус кривизны r_c и опорный контур пластины s будут зависеть от диаметра колонны, то и коэффициент k_r по высоте не будет меняться и определяется как $k_r=1-0,5 \cdot 0,64 \cdot 4,3/2,15=0,36$;

p_d – расчетное давление, кПа, вычисленное в соответствии с [4];

$\sigma_{pd1} = 1,3(f_{yd} - \sigma_{jd})$ – расчетные изгибающие напряжения, но не больше чем $f_{yd} = 213,64$, Н/мм²;

$\sigma_{jd} = \sqrt{\sigma_{xd}^2 + \sigma_{yd}^2 - \sigma_{xd} \cdot \sigma_{yd} + 3\tau_d^2}$ – приведенное расчетное напряжение для пластины; где σ_{xd} и σ_{yd} – нормальные напряжения вдоль осей x и y соответственно;

τ_d – касательные напряжения в плоскости x - y

k_{pp} – параметры фиксации пластины; $k_{pp}=1,0$ для подкрепленных кромок; $k_{pp}=0,5$ для опертых краев.

С целью увеличения запаса прочности в качестве приведенного напряжения σ_{pd1} принята расчетная прочность $f_{yd} = 213,64$ Н/мм². Результаты расчетов толщин обшивки колонны приведены в табл.1.

Учитывая стандартный размер и толщину листового проката, применяемого в судостроении [10], с целью уменьшения количества сварных швов и следовательно трудоемкости изготовления всей колонны [9], для изготовления башни принято использовать листовую прокат в соответствии с ОСТ 5.9075-84 [2] размером 14000x3000 и рассчитанной толщиной. Размеры и толщина принятых пластин схематически показана на рис. 2.

При рассмотрении конструкции в виде листовой обшивки с подкрепляющими ребрами жесткости [12], колонна так же как и в случае с гладкостенной конструкцией разделена по высоте на четыре равных секции по 20 м каждая. В качестве продольных подкрепляющих р.ж. выбраны несимметричные полособульбы по ГОСТ 21937-76 [1] в количестве 18 штук по всей окружности колонны. Угол между двумя соседними ребрами жесткости будет составлять $\alpha=360/18=20$ град. В таком случае шпация между р.ж. будет меняться по всей высоте колонны и в каждом сечении будет определяться как

Таблица 1. Расчет толщины обшивки гладкостенной колонны
Table 1. The shell thickness calculations for smooth tower

Высота колонны, м	Давление ветра p_d , кПа	k_a	r_c , м	s , м	k_r	σ_{pd1} , Н/мм ²	k_{pp}	t , мм
0	524,27	1,0	2,15	2,750	0,36	213,64	1,0	24,29
10	630,40	1,0	2,069	2,650	0,36	213,64	1,0	25,68
20	679,73	1,0	1,988	2,544	0,36	213,64	1,0	25,60
30	726,56	1,0	1,906	2,440	0,36	213,64	1,0	25,40
40	765,88	1,0	1,825	2,336	0,36	213,64	1,0	24,97
50	804,06	1,0	1,744	2,232	0,36	213,64	1,0	24,45
60	834,47	1,0	1,663	2,128	0,36	213,64	1,0	23,75
70	864,46	1,0	1,581	2,024	0,36	213,64	1,0	23,00
80	894,01	1,0	1,50	1,920	0,36	213,64	1,0	22,18

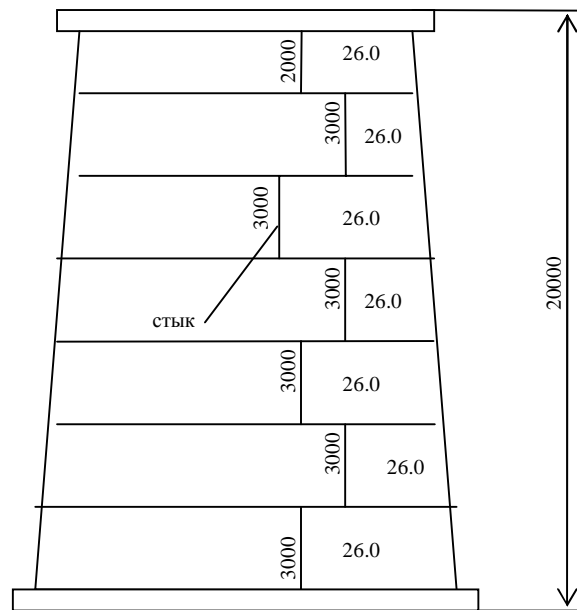


Рис.2. Схема расположения стыков и распределение толщин по высоте колонны
 Fig. 2. The scheme of butts situation and thickness distribution on the height of the tower

$$s = \frac{\alpha}{57,3} \cdot r = 0,349 \cdot r,$$

где: α – угол между соседними р.ж., град;

r – радиус колонны в выбранном сечении, м.

Опорный контур пластины будут составлять: длина секции $l=20$ м – как большая сторона; расстояния между соседними р.ж. – меньшая сторона [11].

Поскольку расчетные формулы по определению толщины обшивки такие же как и для гладкостенной колонны, то в работе представлены только результаты расчетов (табл.2).

Момент сопротивления сечения Z_s продольных ребер жесткости, подвергающихся боковому давлению, должен быть не меньше чем:

$$Z_s = \frac{l^2 \cdot s \cdot p_d}{k_m \cdot \sigma_{pd2} \cdot k_{ps}} \cdot 10^6 \text{ мм}^3, \text{ но больше чем } 15 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

где l – пролет ребер жесткости, м; $l=20$ м;

s – шпация, м;

p_d – расчетное давление, кПа;

k_m – фактор изгибающего момента, определяется по табл. G1 [15] и принят в расчетах $k_m=12$;

σ_{pd2} – расчетные изгибающие напряжения, Н/мм², принято $\sigma_{pd2}=213,64$;

k_{ps} – параметр фиксации для р.ж.; $k_{ps}=1,0$ если хотя бы один конец р.ж. жестко заделан; $k_{ps}=0,9$ если оба конца свободно оперты.

Расчет параметров продольных р.ж. представлен в табл.3.

В качестве продольных ребер жесткости по всей высоте колонны может быть применен несимметричный полособульб 18б с геометрическими характеристиками по [1]. Размеры и толщина принятых пластин и набора схематически показана на рис. 3.

Для расчета на прочность и устойчивость колонна ВЭУ представляется в виде непризматической балки [13], жестко защемленной с одной стороны (со стороны монтажного фланца) и свободной с другой. При расчетах используются стандартные формулы при сложном изгибе стержней. Расчет на прочность и устойчивость, выполненный в MathCAD, подтвердил что принятые толщина и момент сопротивления р.ж. удовлетворяют требованиям прочности и устойчивости при действии внешних ветровых нагрузок на колонну. Сопоставление геометрических характеристик колонн представлено в табл. 4.

Таблица 2. Расчет толщины обшивки колонны с подкрепляющими р.ж.
 Table 2. The shell thickness calculations for tower with stiffeners

Высота, м	Давление ветра p_d , кПа	l , м	s , м	k_a	r_c , м	k_r	σ_{pd1} , Н/мм ²	k_{pp}	t , мм
0	524,27	20,0	0,750	1,0	2,15	0,826	213,64	1,0	15,33
10	630,40	20,0	0,722	1,0	2,069	0,826	213,64	1,0	16,18
20	679,73	20,0	0,694	1,0	1,988	0,826	213,64	1,0	16,15
30	726,56	20,0	0,665	1,0	1,906	0,826	213,64	1,0	16,00
40	765,88	20,0	0,637	1,0	1,825	0,826	213,64	1,0	15,74
50	804,06	20,0	0,609	1,0	1,744	0,826	213,64	1,0	15,42
60	834,47	20,0	0,580	1,0	1,663	0,826	213,64	1,0	14,96
70	864,46	20,0	0,552	1,0	1,581	0,826	213,64	1,0	14,50
80	894,01	20,0	0,524	1,0	1,50	0,826	213,64	1,0	14,00

Таблица 3. Расчет момента сопротивления продольных р.ж. колонны
 Table 3. The resistance moment calculations for longitudinal stiffeners

Высота, м	Давление ветра p_d , кПа	l , м	s , м	k_m	k_{ps}	σ_{pd2} , Н/мм ²	$Z_s \cdot 10^6$, мм ³	№ профиля
0	524,27	20,0	0,750	12	1,0	213,64	61,35	18а
10	630,40	20,0	0,722	12	1,0	213,64	71,02	18б
20	679,73	20,0	0,694	12	1,0	213,64	73,60	18б
30	726,56	20,0	0,665	12	1,0	213,64	75,39	18б
40	765,88	20,0	0,637	12	1,0	213,64	76,12	18б
50	804,06	20,0	0,609	12	1,0	213,64	76,40	18б
60	834,47	20,0	0,580	12	1,0	213,64	75,52	18б
70	864,46	20,0	0,552	12	1,0	213,64	74,45	18б
80	894,01	20,0	0,524	12	1,0	213,64	73,09	18б

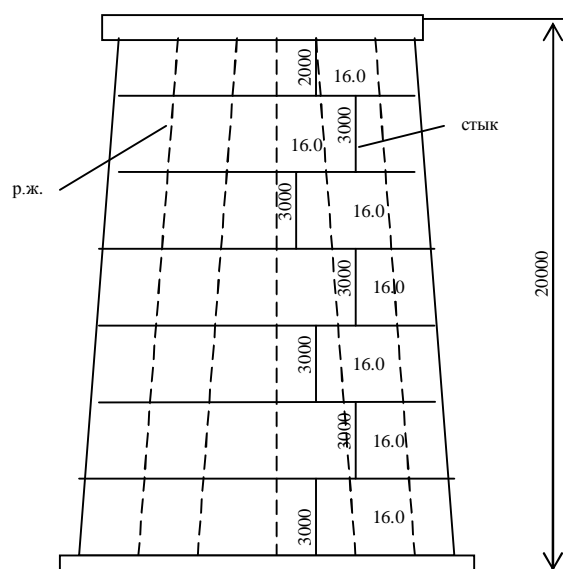


Рис.3. Схема расположения стыков и распределение толщин по высоте колонны с р.ж.
 Fig. 3. The scheme of butts situation and thickness distribution on the height of the tower with stiffeners

Таблица 4. Сопоставление геометрических характеристик колонн

Table 4. Comparative of geometrical characteristics of the towers

Сечение колонны, м	Площадь сечения, м ²		Момент инерции сечения, м ⁴		Вес колонны, т	
	Гладкостен.	С набором	Гладкостен.	С набором	Гладкостен.	С набором
0	0,349	0,262	0,797	0,590	159,6	127,6
10	0,323	0,246	0,683	0,512	133,2	107,7
20	0,298	0,230	0,582	0,442	108,8	89,0
30	0,274	0,216	0,492	0,380	86,4	71,5
40	0,251	0,201	0,414	0,325	65,7	55,1
50	0,230	0,188	0,345	0,276	46,9	39,8
60	0,209	0,175	0,285	0,233	30,0	25,6
70	0,187	0,163	0,233	0,195	14,1	12,3
80	0,17	0,151	0,189	0,162	0	0

ВЫВОДЫ

Рассчитанные по правилам DNV конструктивные элементы колонны морской ВЭУ отвечают условиям прочности и стойкости непрямоугольного стержня, испытывающего сложный изгиб. При этом, колонна с подкрепляющими продольными ребрами жесткости на 32 тонны легче чем гладкостенная колонна, что составляет 20,0 % от её массы, что в свою очередь облегчает подъемные, транспортные и монтажные операции.

БИблиографический список

1. GOST 21937-76. Polosobul'b gorjachekatanyj nesimmetrichnyj dlja sudostroenija. Sortiment. – Vzamen GOST 5353-52 v chasti polosobul'bovyh nesimmetrichnyh pro-filej; Vved. 01.01.78. – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 6.
2. OST 5.9075-84. Prokat listovoj gorjachekatanyj. Sortiment. – Vzamen GOST 8597-57 v chasti listov shirinoj 500 mm i bolee, GOST 3680-57 i GOST 8075-56 v chasti gorjachekatanyh listov, GOST 5681-57; Vved. 01.01.76. – M.: Izd-vo standartov, 1974. – 17.
3. Smirnov M. 2003. Stroitel'naja mehanika. Raschet arok i kol'cevnyh sistem. / Smirnov M.S., Evdokimov B.M. // SPb. – 36.
4. SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i voz-dejstvija. – Vzamen SNiP II-6-74: Vved. 01.01.87. – M.: Izd-vo standartov, 2003. – 58.
5. Ukho, V. 2010. Analiz konstrukcij opornyh kolonn razlichnyh tipov dlja morskij vetrojenergeticheskijh ustanovok. / V.S.Uho // Zb. nauch. trudov NUK №5. – Nikolaev: NUK. – 27-34.
6. Ukho V. 2013. Opredelenie velichiny i haraktera vneshnih nagruzok na kolonnu morskoy

vetrojenergeticheskoy ustanovki / Uho V.S. // El. vidannja Visnik NUK. – Nikolaev: NUK. – №2.

7. Ukho V. 2010. Sovremennoe sostojanie VJeU i problema izgotovlenija kolonn dlja nih. / V. S. Uho // Innovacii v sudnobuduvanni ta okeaoehnici: materiali Pershoi mizhnar. nauk.-tehn. konf., prisvjachenoj 90-richchju NUK. – Mikolaiv: NUK.

8. Ukho V., Rashkovskij A. 2012. Raschet fundamenta gravitacionnogo tipa morskoy VJeU na stojkost' i sdvig po morskomu gruntu // Zhurnal «Rybnoe hozjajstvo Ukrainy». – Kerch': KGMTU. – №6(83). – 34-41

9. Galkin V. 1983. Spravochnik po sborochno-svarochnoj osnastke cehev verfi / V. Galkin. – L.: Sudostroenie. – 304.

10. Mackevich V. 1980. Osnovy tehnologii sudostroenija / V. Mackevich, J. Ganov, V. Dobrolenskij, V. Kravchenko, V. Lejzerman, V. Naumov, E. Nikitin; [pod. obshh. red.] V.D. Mackevicha. – L.: Sudostroenie. – 177.

11. Elkinton C. 2006. Offshore Wind Farm Layout Optimization (OWFLO) Project: an Introduction / C. Elkinton, J. Manwell, J. McGowan // University of Massachusetts. – 11.

12. Zaaijer M. 2003. Comparison of monopile, tripod, suction bucket and gravity base design for a 6 MW turbine / In Proceedings of OWEMES, ENEA, Italy, April

13. Postnov V. 1987. Stroitel'naja mehanika korablja i teorija uprugost: V 2 t. / V. Postnov, D. Rostovcev, V.P. Suslov, Ju.P. Kochanov / T. 2. Izgib i ustojchivost' sterzhnej, sterzhnevnyh sistem, plastin i oblocek. – L.: Sudostroenie. – 416.

14. DNV-OS-C101. DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES, GENERAL (LRFD METHOD). – October 2008. – Det Norske Veritas. – 49.

15. DNV-OS-J101. DESIGN OF OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURES. – October 2007. – Det Norske Veritas. – 142.

**STRENGTH AND STABILITY
CALCULATIONS OF OFFSHORE WIND
TOWER ACCORDING TO RULES OF
DNV**

Summary. The calculations of strength and stability of wind turbine tower according to actual loads have been made. The dimensions of main structure elements have been chosen. The comparative analysis of different tower types by weight and geometrical characteristics has been made.

Key words: strength, stability, structure elements, weight and geometrical characteristics.