

УДК 624.042.4:629.5

В.С. Ухо, аспирант,

А.С. Рашковский, профессор, д-р техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

пр. Героев Сталинграда 9, г. Николаев, Украина, 54025

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК НА ОСНОВАНИЕ МОРСКОЙ ВЭУ

Выполнен выбор и обоснование морской опоры ВЭУ для заданного района. Определены численные значения внешних нагрузок, действующих на фундамент морской ВЭУ. Выбраны наиболее значимые нагрузки на фундамент, а также вычислены составляющие суммарного опрокидывающего момента.

Ключевые слова: фундамент морской ВЭУ, внешние нагрузки, суммарный опрокидывающий момент.

Введение. Постановки задачи. В связи с быстро распространяющимся размещением ВЭУ в морской зоне [6] особое внимание в таких случаях придается фундаменту сооружения. В отличие от наземного расположения ВЭУ, в морских условиях действуют дополнительные внешние нагрузки природного происхождения: волновые, ледовые, нагрузки от течения и др., величины которых в различных режимах эксплуатации ВЭУ могут быть соизмеримы или даже превышать величину основной нагрузки – ветровой [6]. Помимо этого, расположение фундамента в агрессивной морской среде, приводит к повышенным требованиям к долговечности конструкции и стойкости при воздействии всех внешних нагрузок. Все выше перечисленные факторы отводят фундаменту первое место во всей конструкции ветроустановки, а расчеты его на прочность и стойкость являются первоочередными при проектировании морской ВЭУ.

Анализ последних исследований и публикаций. Конструкции наиболее распространенных фундаментов морских ВЭУ в зависимости от их способа монтажа, структурных особенностей и материала изготовления разделяются на следующие типы (рисунок 1) [9]: моносвайные; трехопорные; ферменного типа; гравитационные и плавучие. Каждый из этих фундаментов имеет свои особенности изготовления, транспортировки и монтажа, в большей мере определяемые условиями глубины акватории в зоне установки морской ВЭУ.

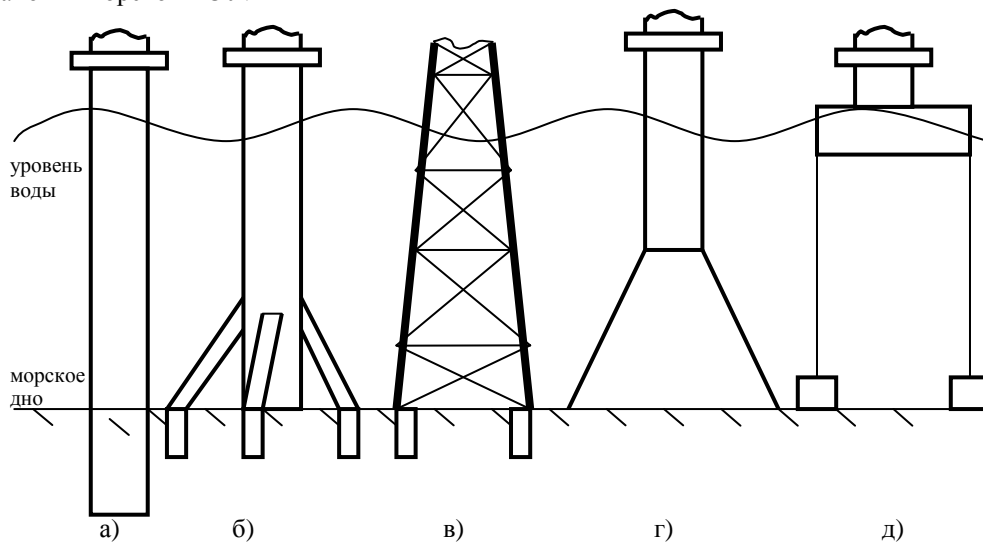


Рисунок 1 – Современные типы фундаментов морских ВЭУ: а) моносвайный; б) трехопорный; в) ферменного типа; г) гравитационный; д) плавучий

Моносвайный фундамент – самый простой тип основания, состоящий из забитой в морской грунт одной или нескольких свай, соединенных с башней с помощью переходной секции. Составные элементы такого фундамента представляют собой стальные цилиндрические трубы. Технология монтажа основания заключается в забивании в грунт свай с последующим надеванием на нее переходной секции. Такой тип фундамента применяется при глубине установки ВЭУ до 25 метров.

Трехопорный фундамент состоит из трех трубчатых стальных ног, служащих раскосами для центральной переходной секции, соединяемой с колонной ВЭУ. Также в этой конструкции могут использоваться дополнительные вертикальные или наклонные раскосы. Такой тип фундамента применяется при глубине установки ВЭУ от 20 до 50 метров.

Фундамент ферменного типа состоит из пересекающихся связей, образующих ферменную конструкцию основания. В местах опирания фундамента о морское дно забиваются сваи, для обеспечения устойчивости всей конструкции. Такой тип фундамента применяется при глубине установки ВЭУ от 20 до 40 метров.

Фундамент гравитационного типа, в отличие от свайных фундаментов, спроектирован с целью уменьшения подъемных сил между днищем основания ВЭУ и морским дном. Такой тип фундамента представляет собой железобетонный пустотелый блок обтекаемой формы. Для увеличения держашей силы, середина такого основания засыпается песком, железной рудой либо гравием. Работы по монтажу такого фундамента сводятся к транспортировке предварительно изготовленного основания, опусканию его на морское дно и засыпанию балластом, что полностью исключает дорогостоящие свайные операции и монтаж подводных переходных секций. Такой тип фундамента применяется при глубине установки ВЭУ до 30 м, но при необходимости возможно увеличение глубины установки до 50 м, что требует дополнительных расчетов на стойкость и скольжение по морскому дну.

Плавающее основание представляет собой находящуюся на поверхности воды плавучую платформу, удерживаемую на месте позиционирования с помощью системы якорей. Для дополнительной устойчивости опора может иметь подводный стабилизационный элемент в виде поплавка. Такие типы оснований легко транспортируются на место установки, кроме того применяя плавающее основание возможно учитывать сезонность ветров и передвигать ВЭУ по акватории. Чаще всего такие основания применяют на глубоководье, где нет возможности устанавливать другие типы фундаментов.

Целью работы является анализ и определения внешних нагрузок на фундамент морской ВЭУ для определенного района акватории Крыма.

Изложение основного материала. Местоположение ВЭУ выбирается с точки зрения наибольшей эффективности работы ветро-ротора, то есть в месте самых больших скоростей ветра. На территории Украины таким местом является район мыса Меганом в АР Крым [7], поэтому нагрузки на фундамент для ВЭУ рассчитаны для этого района. По карте рельефа морского дна Черного моря [2] район мыса Меганом является прибрежным мелководным, с переменной глубиной от 15 до 35 м (рисунок 2). Расположению ВЭУ на расстоянии 1,0 – 1,5 км от побережья (на рисунке 2 обведено черной линией) соответствует глубина 20–30 м. Принимая расчетную глубину установки ВЭУ 30 м, можно предварительно выбрать фундамент гравитационного типа, как наиболее практичный и наименее дорогостоящий с точки зрения монтажных работ.



Рисунок 2 – Карта глубин морского дна Черного моря в районе Судакской бухты

В качестве первого приближения выбран железобетонный фундамент цилиндрическо-конического типа, примененный при постройке ветропарка Торнтон в Северном море [10]. Основные размеры данного основания приведены на рисунке 3. Именно для этого типа фундамента рассчитаны внешние нагрузки природного происхождения.

Для расчета максимальной горизонтальной нагрузки от волнения фундамент ВЭУ рассматривается как цилиндрическое сооружение с конической вставкой. В этом случае преграда разбивается с помощью горизонтальных равноотстоящих сечений на ряд элементов, а суммарная нагрузка приближенно определяется по формуле из [4]

$$P_x = \frac{\rho \cdot g \cdot \pi \cdot k \cdot h \cdot \Delta z_1}{8 \cdot \operatorname{ch}(k \cdot H)} \cdot \sum_{j=1}^n c_i(z_{1j}) \cdot D^2(z_{1j}) \cdot \operatorname{ch}(k(H - z_1)),$$

где ρ – плотность морской воды, кг/м³; $\rho = 1025$ кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/сек²; $g = 9,81$ м/сек²; k – волновое число; $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны, м; h – высота волны, м; Δz_1 – величина равновеликого интервала по высоте преграды от спокойного уровня до морского дна, м; H – глубина водоема, м; n – число интервалов Δz_1 ; z_1 – вертикальная координата, принимаемая от поверхности воды вниз, м; $D(z_{1j})$ – средний диаметр сооружения на глубине z_{1j} , соответствующей середине участка Δz_j , м; $c_i(z_{1j})$ – коэффициент, определяемый по графику 6.13, а [4], и соответствующий параметру $\pi D(z_{1j})/\lambda$.

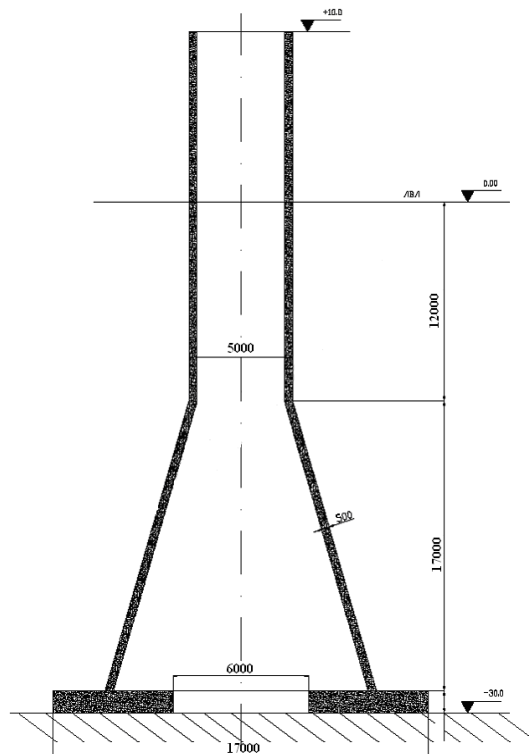


Рисунок 3 – Общий вид основания гравитационного типа для морской ВЭУ

В инженерных расчетах рассматриваются волны с обеспеченностью в системе 0,1 %; 1 %; 3 %; 13 % (13,5 %) [4]. Для определения волновых нагрузок на фундамент морской ВЭУ приняты статистические данные волн 1 % обеспеченности для Черного моря по [1]. В соответствии с этим побережье южной и восточной части Крыма относится ко II району. В данном районе повторяемость сильного волнения невелика, и по статистическим данным составляет для волн высотой 5-6 метров от 0,7 % обеспеченности зимой до 0,08 % обеспеченности летом (весной и осенью – 0,5 % обеспеченности). Период волн с обеспеченностью меньше 1 % равен 11-13 сек. Для последующих расчетов нагрузок от волнения приняты расчетные параметры волн: высота – 6 метров; период – 13 сек.

Используя трохоидальную теорию волнения [5], длину волны λ можно выразить через период с помощью зависимости

$$\lambda = \frac{g \cdot \tau^2}{2\pi},$$

где τ – период волны, сек. Тогда расчетная длина волны будет равна $\lambda = \frac{9,81 \cdot 13^2}{2 \cdot 3,14} = 264,0$ м. Волновое число $k = 2 \cdot 3,14 / 264 = 0,024$.

При расчете волновой нагрузки на морское основание гравитационного типа в связи с особенностями конструкции следует выделить две области, имеющие разный характер действия волнового давления. Первая область располагается от уровня летней ватерлинии до глубины 12 м. Именно на этой глубине заканчивается цилиндрическая часть основания, а сама нагрузка уменьшается пропорционально осадке. Вторая область расположена от глубины 12 м до морского дна. Она характеризуется конической конструкцией фундамента и соответствующим увеличением волновой нагрузки. При этом не учитывается особенность конструкции в опорной зоне (кольцо диаметром 17 м и

высотой 1,0 м) в связи с ее малыми размерами по высоте. Последующие расчеты волновой нагрузки на каждом интервале фундамента ВЭУ и суммарной нагрузки приведены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1 – Расчет волновой нагрузки на равновеликих отрезках фундамента ВЭУ и суммарной величины

z_1 , м	ρ , кг/м ³	g , м/с ²	π	k	h , м	Δz_1 , м	H , м	$c_i(z_{1j})$	$D(z_{1j})$, м	P_i , Н
0	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	56832,27
2	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	55214,21
4	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	53723,39
6	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	52356,37
8	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	51110,00
10	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	49981,42
12	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,0	48968,01
14	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	5,89	66702,42
16	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	6,76	86419,00
18	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	7,63	108508,85
20	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	8,50	133007,44
22	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	9,36	159645,46
24	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	10,23	189185,22
26	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	11,10	221458,71
28	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	11,97	256647,52
30	1025	9,81	3,14	0,024	6,0	2,0	30,0	2,0	12,40	275100,91
									$P_{\text{сумм}} =$	1589760,29

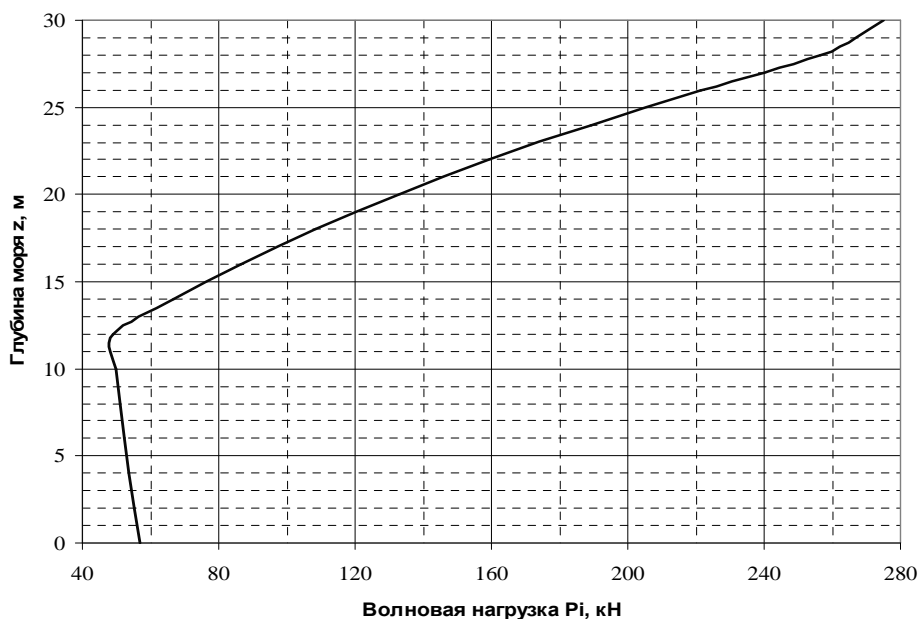


Рисунок 4 – График распределения волновой нагрузки по глубине моря

При расчете нагрузок на фундамент морской ВЭУ от течения условно принято, что скорость приливно-отливных течений практически не изменяется во времени, поэтому течения можно рассматривать как стационарные потоки. В связи с этим распределение скорости течения по глубине зависит от происхождения самого течения, и тогда в расчетах может быть использована следующая зависимость [4]:

$$v = v(0) \cdot \left(1 + \frac{z}{H}\right)^{1/7},$$

где $v(0)$ – скорость частиц воды на поверхности моря, м/сек; z – вертикальная координата, отсчитываемая от свободной поверхности вниз, м; H – глубина акватории, м.

По дрефтерным данным поверхностных течений Черного моря [3] их схема представлена на рисунке 5.

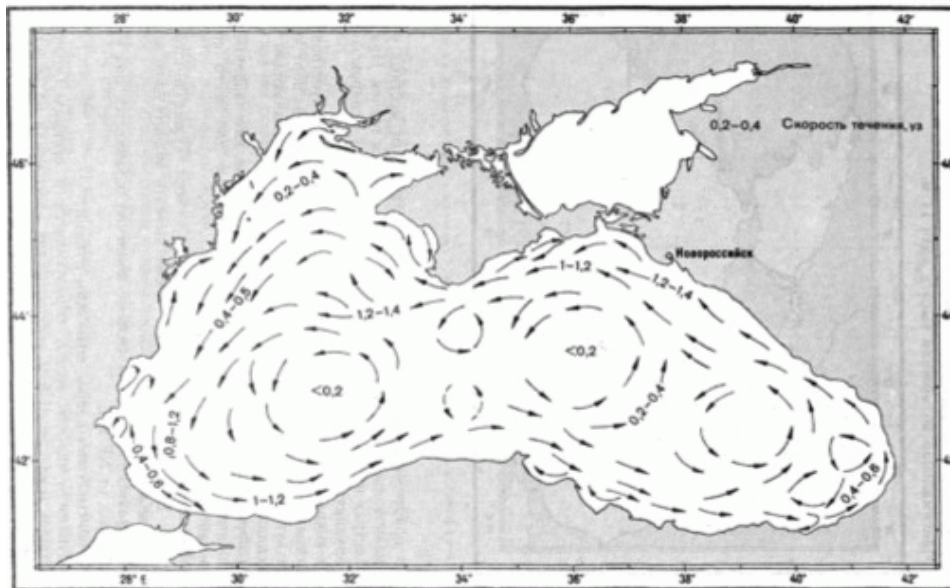


Рисунок 5 – Схема постоянных течений Черного моря

Как видно из рисунка 5 скорость течения в районе установки морских ВЭУ составляет 1 – 1,2 узла, или 0,514 – 0,617 м/сек. Исходя из этих данных, можно рассчитать распределение скорости течения от свободной поверхности воды до морского дна (принято $H=30$ м). Результаты расчетов представлены на рисунке 6.

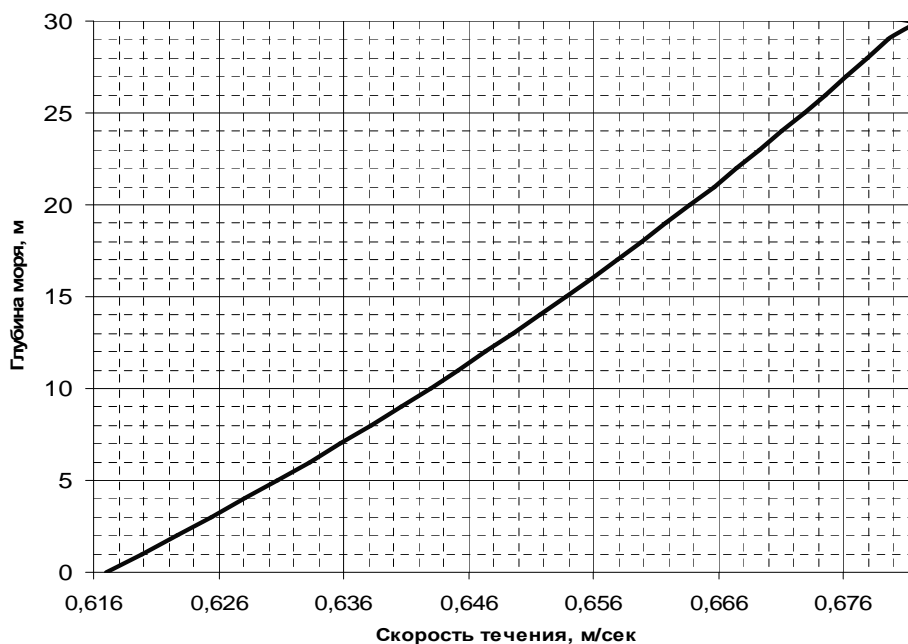


Рисунок 6 – Схема распределения скорости течения по глубине моря в районе мыса Меганом

В общем случае при вычислении нагрузок течение можно рассматривать как стационарное [4], тогда формула нагрузки приобретает вид

$$P_T = 0,5\rho \cdot c_T \cdot v^2 \cdot A_T,$$

где c_T – коэффициент сопротивления; v – скорость течения, м/сек (рисунок 6); A_T – площадь проекции наружного контура подводной части преграды на плоскость, нормальную потоку, м².

Коэффициент c_T учитывает в расчетах положение точки отрыва и ширину области турбулентного движения жидкости. Значение этого коэффициент для гладкого цилиндра зависит от числа Рейнольдса Re , но поскольку подводные части морских гидротехнических сооружений быстро обрастают, то коэффициент c_T можно, независимо от числа Re , принимать в расчетах для преград кругового поперечного сечения равным $c_T \approx 1,2$ [4].

При определении площади проекции наружного контура A_T следует учитывать, что на участке цилиндрической конструкции наблюдается первоначальное линейное увеличение давления с последующим его параболическим увеличением в районе конической части основания ВЭУ. Схема распределения давлений от течения по глубине на основании ВЭУ приведена на рисунке 7. Суммарная нагрузка от течения составляет 59696,11 Н или 59,7 кН, что позволяет в связи с меньшей суммарной величиной по сравнению с волновой нагрузкой, не учитывать нагрузку от течения при большинстве эксплуатационных режимов работы ВЭУ. Величина нагрузки от течения может учитываться при расчете фундамента на скольжение по морскому грунту.

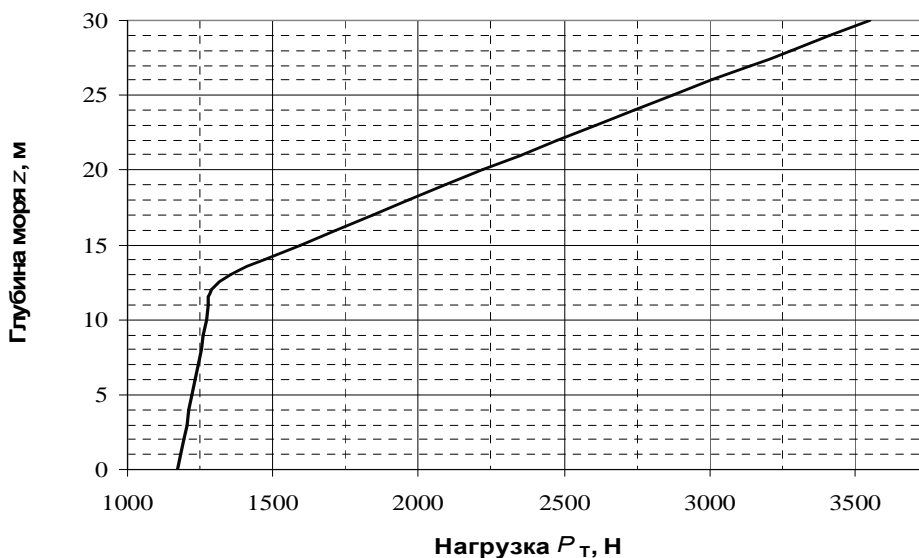


Рисунок 7 – Схема распределения нагрузки от течения на фундамент ВЭУ

Воздействие льда на гидротехнические сооружения характерно для всех районов шельфов стран СНГ. Для южных морей, таких как Азовское и северной части Каспийского моря, ледовые нагрузки не являются определяющими, но даже там толщина ледового покрова может достигать 1 м, а в Черном море – 0,6 м.

Большинство шельфовых сооружений либо их элементов можно рассматривать как одиночную преграду или систему преград цилиндрической либо конической формы. Подвижное ледяное поле в зависимости от накопленной кинетической энергии, подойдя к преграде, либо остановится со смятием кромки льда, либо прорежется. Взаимодействие подвижного ровного ледяного поля с конической опорой может сопровождаться разрушением льда как от сжатия так и от изгиба. Сила от воздействия движущихся ледяных полей на сооружения с вертикальной передней гранью в виде треугольника, многогранника или полуциркульного очертания, в случае отсутствия данных натурных испытаний, не должна превышать значения из [5]

$$F_{b,p} = mk_b k_v R_c b h_d, \text{ МН},$$

где m – коэффициент формы опоры в плане, принимается по таблице 29 [5]. Для опор с передней гранью в виде многогранника или полуциркульного очертания $m=0,83$; b – ширина опоры в плане действия льда, м; $b=5,0$ м; h_d – расчетная толщина ровного льда, м; принимается для морского льда равной максимальной толщине льда 1 %-й обеспеченности. В связи с тем, что вопрос обледенения Черного моря мало изучен ввиду не регулярности данного физического явления, в последующих расчетах основным источником принято [4], а толщина льда 1 %-й обеспеченности принята $h_d=0,6$ м; k_b – коэффициент, принимаемый по таблице 30 [5], в зависимости от отношения b/h_d ; $b/h_d=5,0/0,6=8,33$. Для морской воды $k_b=2,17$; k_v – коэффициент, принимаемый по таблице 31 [5], в зависимости от значения $\dot{\epsilon}_e$; $\dot{\epsilon}_e$ – эффективная скорость деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой, с^{-1} ; определяется по формуле $\dot{\epsilon}_e = v/4b$, где v – скорость движения ледяного поля, м/с. Определяется по данным натурных наблюдений, а при их отсутствии допускается принимать ее равной для водохранилищ и морей – 3 % от значения скорости ветра 1 %-ной обеспеченности в период движения льда.

По [1] скорость ветра в период движения льда (зимой) для II ветрового района Черного моря составляет 18–20 м/сек и скорость движения льда соответственно будет равной $v=0,03 \cdot 20=0,6$ м/сек;

тогда $\dot{\epsilon}_e = \frac{0,6}{4 \cdot 5,0} = 0,03$ или $3,0 \cdot 10^{-2}$, с^{-1} ; по таблице 31 [5] принято $k_v = 0,3$; R_c – прочностные характеристики льда при сжатии, МПа. Используя климатические данные (соленость и температура воздуха) Черного моря [8], прочность льда при сжатии определяется по таблице 7 [4] и равна $R_c = 1,2$ МПа.

Тогда сила от воздействия движущихся полей льда будет равна

$$F_{b,p} = 0,83 \cdot 2,17 \cdot 0,3 \cdot 1,2 \cdot 5,0 \cdot 0,6 = 1,95 \text{ МН.}$$

Если учесть, что наибольшее волнение и сила ветра действуют зимой, в период обледенения прибрежных вод, то вполне вероятным является откалывание льдины и удар от силы ветра и волнения об фундамент ВЭУ, возвышающийся над водой.

Выводы. Расчет внешних нагрузок природного происхождения на фундамент морской ВЭУ показал, что наиболее значимое влияние оказывают волновые и ледовые нагрузки. Их суммарные величины составляют 1,59 и 1,95 МН соответственно. Именно эти нагрузки являются основными при расчете фундамента на стойкость. Нагрузку от течения, в связи с ее малой величиной, можно не учитывать при расчетах на стойкость фундамента морской ВЭУ, но она должна быть учтена при расчете его на сдвиг по морскому грунту.

Бibliографический список использованной литературы

1. Ветер и волны в океанах и морях / Регистр СССР. — М.: Транспорт, 1974. — 360 с.
2. Интерактивная карта Крым [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (2 546 bytes). — MAPS.boom.ru, 2012. — Режим доступа: <http://tie-games.narod.ru/maps/crimea.html> Monday, 14 May 2012 14:07:02.
3. Никитин О.П. Атлас поверхностных течений Черного моря по дрейфтерным данным / О.П. Никитин, С.Ю. Касьянов // Государственный океанографический институт Росгидромета. — Москва, 2008. — 36 с.
4. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе / Г.В. Симаков, К.Н. Шхинек, В.А. Смелов [и др.]. — Л.: Судостроение, 1989. — 328 с.
5. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). — Взамен СНиП П-57-75: Введ. 01.01.84. — М.: Изд-во стандартов, 2003. — 83 с.
6. Ухо В.С. Анализ конструкций опорных колонн различных типов для морских ветроэнергетических установок / В.С. Ухо // 36. науч. трудов НУК. — Николаев: НУК, 2010. — № 5. — С. 27–34.
7. Ухо В.С. Современное состояние ВЭУ и проблема изготовления колонн для них / В.С. Ухо // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали Першої міжнар. наук.-техн. конф., присвяченої 90-річчю НУК. — Миколаїв: НУК, 2010. — С. 43–52.
8. Черное море [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (450 400 bytes). — Википедия, 2012. — Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Черное море](http://ru.wikipedia.org/wiki/Черное_море) Monday, 14 May 2012 14:07:02.
9. DNV-OS-J101. DESIGN OF OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURES. — October 2007. — Det Norske Veritas. — 142 p.
10. Peire K. Gravity base foundations for the Thornton bank offshore wind farm / K. Peire, H. Nonneman, E. Bosschem // Terra et Aqua. — June, 2009. — № 115. — P. 19–29.

Поступила в редакцию 25.10.2012 г.

Ухо В.С., Рашковський О.С. Аналіз і розрахунок зовнішніх навантажень на опору морського ВЕУ

Виконаний вибір та обґрунтування морської опори ВЕУ для заданого району. Визначені числові значення зовнішніх навантажень, що діють на фундамент морського ВЕУ. Обрані найбільш вагомі навантаження на фундамент, а також підраховані складові сумарного перекидального моменту.

Ключові слова: фундамент морського ВЕУ, зовнішні навантаження, сумарний перекидальний момент.

Uho V.S., Rashkovskiy A.S. Analysis and calculation of environmental loads on marine wind turbine foundation

The choice and justification for strict sea region of marine foundation for wind turbine have been executed. The numerical values of environmental loads, which act to marine foundation of wind turbines, have been determined. The most influence loads to marine foundation have been chosen and the components of total overturn moment have been calculated.

Keywords: foundation of marine wind turbine, environmental loads, total overturn moment.