



ЖУСУПБЕКОВ АСКАР ЖАПАРОВИЧ

Доктор технических наук, профессор, директор Геотехнического института при Евразийском национальном университете, заведующий и профессор кафедры проектирования зданий и сооружений Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева.

Основные направления научной деятельности: ??????????

Автор более 300 научных работ.

E-mail: astana-geostroi@mail.ru



ОРАЗОВА ДИНАРА

Доктор философских наук, ассоциированный профессор кафедры промышленного, гражданского и транспортного строительства Павлодарского государственного университета.

Основные направления научной деятельности: ветроэнергетика и фундаментостроение ветроэнергоустановок в Казахстане, расчет и проектирование свайных фундаментов, численное моделирование оснований и фундаментов.

Автор более 15 научных работ.

E-mail: dinarzhan_84@mail.ru

УДК 624.151.5.1

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛАТИРУЕМОЙ ВЭУ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЕРЕЙМЕНТАУСКОЙ ВЭС

Ключевые слова: ветроэнергетика, вибромониторинг, ветроэлектростанция (ВЭС), ветроэлектрическая установка (ВЭУ), колебания, вибрации, Plaxis 2D.

У статті наведені результати вибромониторинга вітроенергетичної установки (ВЕУ). За результатами натурних спостережень наведено аналіз вібраційного впливу від пульсаційних навантажень вежі на фундамент ВЕУ. Результати дослідження представлені графічною залежністю вібраційних характеристик (частота, амплітуда, прискорення) від інтенсивності напору вітру. Дана екстраполяція потенційних зусиль виникають в фундаменті при максимальних вітрових навантаженнях району. Дано рекомендації щодо вибору оптимального фундаменту в інженерно-геологічних і кліматичних умовах ВЕУ.

В статье приведены результаты вибромониторинга ветроэнергетической установки (ВЭУ). По результатам натурных наблюдений приведен анализ вибрационного воздействия от пульсационных нагрузок башни на фундамент ВЭУ. Результаты исследования представлены графической зависимостью вибрационных характеристик (частота, амплитуда, ускорение) от интенсивности напора ветра. Дана экстраполяция потенциальных усилий возникающих в фундаменте при максимальных ветровых нагрузках района. Даны рекомендации по выбору оптимального фундамента в инженерно-геологических и климатических условиях ВЭУ.

The article presents the results of vibration monitoring of wind turbine (wind turbines). According to the results of field observations is an analysis of the impact of vibration on the pulsating tower loads on wind turbine foundations. The results of the study shows the graphical dependence of vibration characteristics (frequency, amplitude, acceleration) from the intensity of the wind pressure. Given the extrapolation potential of emerging efforts in the foundation under maximum wind load area. Recommendations for selection of optimal foundation engineering-geological and climatic conditions of wind turbines.

ВВЕДЕНИЕ

Ветроэнергетика является наиболее динамично развивающимся видом возобновляемых источников энергии. После изучения энергетического потенциала ветра в Казахстане, Правительство Республики Казахстан совместно с Программой развития ООН «Казахстан - инициатива развития рынка ветроэнергетики» определили Ерейментауский район Акмолинской области как наиболее перспективный для строительства ветровых электростанций [1].

Первые шаги по реализации программы были осуществлены в Акмолинской области в городе Ерейментау.

На данный момент запустили в эксплуатацию 22 ВЭУ, которые присоединяются к Екибастузкой ЛЭП и снабжают электроэнергией город Ерейментау, поселок Еркеншилик, а также частично г. Астана.

В рамках проведения предстоящей выставки «EXPO-2017», за счет энергии, выработанной Ерейментауской ВЭС, планируется обеспечить электроснабжение объектов выставки в Астане.

1 ОПИСАНИЕ ПЛОЩАДКИ

Участки строительства ВЭУ расположены на свободной от застройки территории. Главными формами рельефа являются куполовидные сопки, сложенные плотными породами. Сопки разделены ветвящимися сухими логами и долинами временных ручьев, которые приурочены к менее устойчивым породам. Относительные превышения сопки колеблются от 30 до 110 метров.

В геологическом строении описываемой территории принимают участие осадочные и метаморфические породы протерозоя и палеозоя, прорываемые в северо – восточной части города интрузиями, и перекрытые чехлом элювиально – делювиальных четвертичных отложений, представленных суглинками, супесями и глинами с дресвой и щебнем, сапролитами глинистыми и суглинистыми, щебенисто-дресвяными и дресвяно-щебенистыми грунтами с песчаным и суглинистым заполнителем [2].

В качестве фундамента было принято решение применить плитный фундамент диаметром 22 м (рисунок 1).

2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ КОЛЕБАНИЙ И ВИБРАЦИЙ НА ПРИБОРЕ VIBRA PROFOUND

Натурные наблюдения, а также измерения вибрационного воздействия на фундамент ВЭУ были проведены с помощью прибора VIBRA Profound. Прибор позволяет определить скорость, ускорение, частоту вибраций, а также перемещения фундамента, вызванные напором ветра.

Выполнение измерений проведено в следующей последовательности:

- 1) Измерения вибрационного воздействия проводились на площадке Ерейментау с 26 по 27 сентября

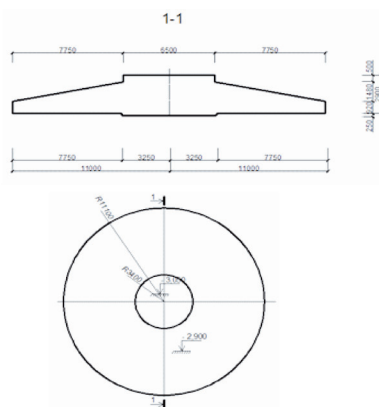


Рис 1. Действующая Ерейментауская ВЭС и плитный фундамент.

2015 года.

- 2) Датчик вначале устанавливался на фундаменте ВЭУ на расстоянии 100 мм от башни. Вторым этапом было установление датчика на башне ВЭУ.
- 3) Стандарт измерения отвечает международным стандартам DIN 4150 и DIN 45669.
- 4) Промежуточные измерения отсчитывались через каждый 10 секунд.

3 ОЦЕНКА ВЕТРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПЛОЩАДКЕ ВЭС

В рамках проекта ПРООН по ветроэнергетике на площадке были произведены годовые замеры скорости и направления ветра. Замеры производились в соответствии с международными стандартами в области измерений скорости ветра для оценки ветрового потенциала (IEA/IEC) [2].

Распределения скорости ветра, параметры Weibull на высоте 51 м (ось гондолы) для площадки Ерейментауской ВЭС, показаны на рисунке 2.

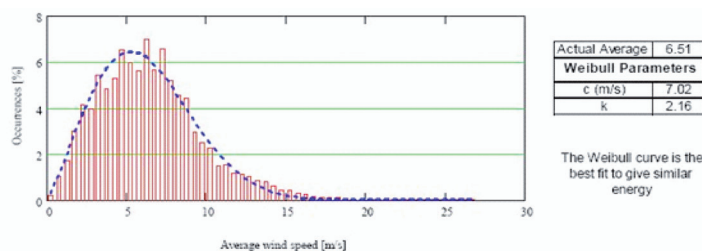


Рис 2. Распределение скорости ветра и параметры Weibull на высоте 51 м.

Роза направления ветра и роза энергии ветра на высоте 50м показаны на рисунке 3. Роза направления ветра показывает, что преобладающее часть ветра имеет направление с юго-востока. Распределение энергии ветра показывает, что основная часть энергии ветра идет с юго-восточного направления.

По результатам замеров напора ветра построена диаграмма сезонного распределения скорости ветра, демонстрирующего характер изменения скорости ветрового потока по месяцам по отношению к среднегодовой скорости ветра (рисунок 4).

4 ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ ФУНДАМЕНТА ВЭУ

С применением прибора VIBRA Profound проводились испытания фундамента ВЭУ на стройплощадке на вибрационные воздействия.

Перед началом измерения вибродатчики устанавливаются на фундамент ВЭУ на расстоянии 100 мм от башни ВЭУ, во избежание прямого контакта с источником возбуждения (башни) (рисунок 5).

С помощью прибора получен график зависимости абсолютных перемещений фундамента и времени на данном участке (рисунок 6). По графику видны максимальные значения перемещений для каждой позиции. Для 1 позиции максимальные значения перемещений 0,1 мм, для 2 и 3 позиции максимальные значения перемещений 0,2мм, для 4 позиции соответственно значения 0,3мм при максимальном напоре

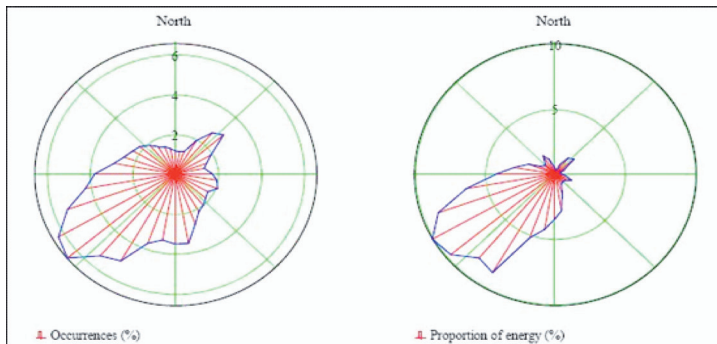


Рис 3. Роза напрямлення ветра (слева) и роза энергии ветра (справа).

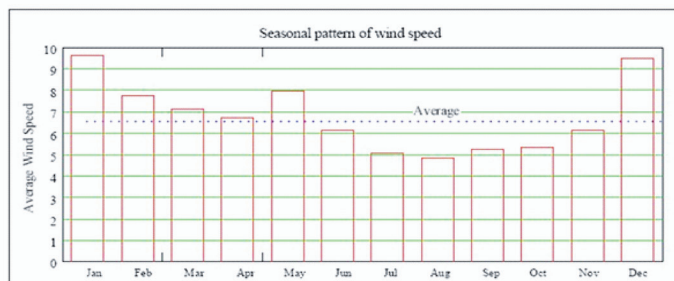


Рис 4. Ежемесячные средние скорости ветра на высоте 50 м.

ветра 4,75 м/с.

Вторым этапом было установление вибродатчика непосредственно на источник возбуждения (башню) ВЭУ. Результаты измерений вибраций показаны на графиках зависимости перемещений, ускорений, частоты вибраций, скорости вибраций от скорости ветра (рисунок 7).

5 ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Программа PLAXIS 2D позволяет моделировать взаимодействие между грунтом и конструкцией. Рассмотрено влияние работы вибрации на грунт, на котором он установлен. Источником вибра-

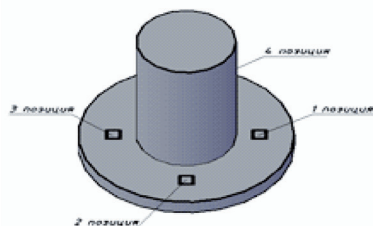


Рис 5. Фиксирование вибродатчика на фундаменте ВЭУ.

ции является башня ВЭУ, стоящим на железобетонном фундаменте толщиной 2,9 м и диаметром 22 м. Колебания вызванные башней, передаются через фундамент на грунтовое основание.

Для задания геометрической модели применима плоская модель (рисунок 9).

Грунтовое основание состоит из одного слоя мощностью 60 м. Дневная поверхность основания задается на отметке $y=0$. Основание представлено глиной, которая рассматривается здесь как упругий материал. Создается набор данных, выбрав тип грунт и интерфейс, согласно информации, заданной в таблице 1. Динамическая жесткость грунта существенно превышает его статическую жесткость, поскольку динамическое нагружение обычно происходит быстро и приводит к сверхмалым деформациям.

Здесь задается плита, представляющую фундамент и набор данных по материалу для фундамента, согласно информации, заданной в таблице 2.

Приложена распределенная нагрузка, горизонтальная сила и сосредоточенный момент на фундаменте для моделирования веса ветрогенератора, а также для колебаний, которые он вызывает. Действительное значение нагрузки задается позже в режиме Staged construction (Поэтапное строительство).

Создается сетка конечных элементов. Оставляется значение параметра Element distribution (Распределение элементов) по умолчанию (Medium).

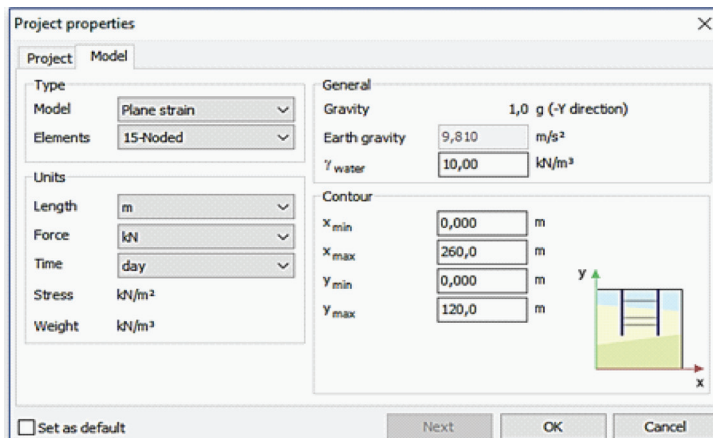


Рис 9. Ежемесячные средние скорости ветра на высоте 50 м.

Расчет состоит из шести фаз и будет задан в режиме Staged construction (Поэтапное строительство). На рисунке 12 показана деформированная сетка фундамента.

Для проведения динамического расчета особенно удобна функция Curve generator (Генератор кривых). С ее помощью можно легко построить график изменения фактической входной нагрузки во времени или посмотреть, как меняются во времени перемещения, скорости и ускорения в выбранных точках. Для того чтобы проследить, как изменяются во времени заданные коэффициенты, можно построить соответствующие графики, отложив по оси x динамическое

Таблиця 1. Свойства грунтового основания.

Параметр	Обозначение	Значение	Ед.изм.
General (Общие свойства)			
Модель материала	Model	Mohr – Coulomb	-
Тип поведения материала	Type	Drained (Дренажированный)	
Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод	γ_{unsat}	16	кН/м ³
Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод	γ_{sat}	18	кН/м ³
Parameters (Параметры)			
Модуль Юнга (постоянная величина)	E'	13*10 ⁴	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν'	0,38	
Initial (Начальные условия)			-
K_o determination (Метод задания K_o)	-	Automatic (Автоматически)	-
Коэффициент бокового давления грунта	$K_{o,x}$	0,674	-

Таблиця 2. Свойства материала фундамента.

Параметр	Обозначение	Значение	Ед.изм.
General (Общие свойства)			
Модель материала	Model	Linear elastic	-
Тип поведения материала	Type	Non-porous	-
Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод	γ_{unsat}	24	кН/м ³
Модуль Юнга (постоянная величина)	E'	30*10 ⁶	кН/м ²
Коэффициент Пуассона	ν'	0,2	
Initial (Начальные условия)			-
K_o determination (Метод задания K_o)	-	Automatic (Автоматически)	-
Коэффициент бокового давления грунта	$K_{o,x}$	1	-

время (Dynamic time), а по оси y-у. На рисунках 6.8, 6.9, 6.10 показаны результаты значений ускорений, результаты значений скоростей вибраций и график зависимости вертикального перемещения от времени.

Авторы выражают глубокую благодарность работникам Казахстанских компаний ТОО "Первая ветровая электрическая станция" и ТОО «KGS» за техническую поддержку проведения экспериментальных исследований.

ВЫВОДЫ

В настоящее время без применения современных

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная программа развития ветроэнергетики до 2015 г. с перспективой до 2024г (проект) Алматы / / Астана. – 2007.
2. Проект Правительства Казахстана и Программы Развития ООН « Казахстан – инициатива развития рынка ветроэнергетики», Ветровая электростанция вблизи г. Ерейментау, Прединвестиционное исследование / / Алматы. – 2008.
3. Оразова Д.К. Прогноз работы оснований и фундаментов ветровых энергетических сооружений: дисс. ... докт. фил. Ph.D.: 6B05072900.- Астана: ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.- 2016. -170 с.

автоматизированных методов расчета невозможно представить работу научных исследователей, проектировщиков и инженеров. Расчет фундаментов ВЭУ с помощью численного моделирования намного облегчает работу инженеров.

В данной статье были приведены некоторые аспекты проектирования ветроэнергетической установки (ВЭУ) в гидрогеологических условиях Ерейментауского района. По результатам измерений был сделан прогноз вибрационных параметров фундамента эксплуатируемой ВЭУ от напора ветра. По графикам были получены максимальные значения параметров при максимальном ветровом напоре данного региона:

- 1) Максимальное перемещение по X=0,09 мм, Y=0,076 мм, Z=0,048 мм;
- 2) Максимальное ускорение по X= 5,14 м/с², Y=2,24 м/с², Z=6,48 м/с²;
- 3) Максимальная частота вибраций по X=450 Гц, Y=200 Гц, Z=480 Гц;
- 4) Максимальная скорость вибраций по X=7,8 мм/с, Y=9 мм/с, Z= 11,8 мм/с.

После оценки надежности эксплуатируемой ВЭУ по результатам натурных наблюдений были получены выходные данные максимальных значений параметров. Эти параметры были заложены в программный комплекс Plaxis 2D для сравнения данных динамического воздействия на фундамент от башни ВЭУ [3].

Методом экстраполяции берется воздействие на фундамент при максимальной скорости ветра 25 м/с.