



ТЕХНОЛОГІЯ КОМБІНОВАНИХ РОЗРАХУНКІВ ФУНДАМЕНТІВ ВІТРОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ПОТУЖНІСТЮ 2,5–3,0 МВт

В. І. Корсун¹, Ю. Ю. Калмиков², С. Ю. Макаренко³

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

E-mail: ¹korsun_vi@mail.ru, ²urkalmikow@rambler.ru, ³s.u.makarenko@donnasa.ru.

Отримана 12 червня 2015; прийнята 26 червня 2015.

Анотація. Викладено досвід проектування фундаментів під вітрові енергетичні установки (ВЕУ), які відносяться до класу унікальних висотних споруд висотою $H=100...120$ м і характеризуються підвищеними вимогами щодо їх жорсткості і стійкості. Розглянуто питання проектування фундаментів для ВЕУ виробників «Furlender», «Vestas», «General Electric» потужністю 2,5...3,0 МВт, які вперше застосовані на вітряних електростанціях України і не мають аналогів у країнах СНД. У статті представлені основні типи розрахунків для фундаментів ВЕУ, що влаштовуються на стискуваних і нестискуваних підвалинах. Описана покрокова методика виконання розрахунків підвалин та елементів конструкції фундаментів ВЕУ, а також встановлена необхідність кількісної оцінки і врахування впливу неоднорідних за обсягом конструкцій температурно-осіданих деформацій бетону на напружений стан фундаментів в процесі твердіння бетонної суміші. Представлені результати розрахунків деформацій ростверку для ВЕУ різних типів і розрахунків втомної міцності анкерних елементів конструкцій фундаменту. Виконано порівняльний аналіз найбільш прийнятних розрахункових кінцево-елементних моделей об'єктів. Застосована технологія проектування фундаментів розглянутих типів ВЕУ заснована на комбінуванні традиційних інженерних нормативних методів розрахунку з комп'ютерними технологіями проектування будівельних конструкцій. Вона застосована вперше в країнах СНД і дозволила отримати обґрунтовані конструктивні рішення і техніко-економічні показники основних конструкцій. Урахування умов тверднення і набору міцності бетоном при прийнятій технології бетонування ростверку фундаменту, що супроводжується значними тепловиділеннями, дозволив обмежити несприятливий вплив температурно-осіданих деформацій бетону на напружений стан масивних фундаментних плит.

Ключові слова: фундаменти вітроенергетичних установок, деформації, міцність, втома, розрахунки, звичайно-елементна модель, характеристики напружено-деформованого стану.

ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ РАСЧЕТОВ ФУНДАМЕНТОВ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МОЩНОСТЬЮ 2,5–3,0 МВт

В. И. Корсун¹, Ю. Ю. Калмыков², С. Ю. Макаренко³

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

E-mail: ¹korsun_vi@mail.ru, ²urkalmikow@rambler.ru, ³s.u.makarenko@donnasa.ru.

Получена 12 июня 2015; принята 26 июня 2015.

Аннотация. Изложен опыт проектирования фундаментов под ветровые энергетические установки (ВЭУ), которые относятся к классу уникальных высотных сооружений высотой $H=100...120$ м и характеризуются повышенными требованиями к их жесткости и устойчивости. Рассмотрены вопросы проектирования фундаментов для ВЭУ производителей «Furlender», «Vestas», «General Electric» мощностью 2,5...3,0 МВт,

которые впервые применены на ветряных электростанциях Украины и не имеют аналогов в странах СНГ. В статье представлены основные типы расчетов для фундаментов ВЭУ, устраиваемых на сжимаемых и несжимаемых основаниях. Описана пошаговая методика выполнения расчетов оснований и элементов конструкций фундаментов ВЭУ, а также установлена необходимость количественной оценки и учета влияния неоднородных по объему конструкций температурно-усадочных деформаций бетона на напряженное состояние фундаментов в процессе твердения бетонной смеси. Представлены результаты расчетов деформаций ростверка для ВЭУ различных типов и расчетов усталостной прочности анкерных элементов конструкций фундамента. Выполнен сопоставительный анализ наиболее приемлемых расчетных конечно-элементных моделей объектов. Примененная технология проектирования фундаментов рассмотренных типов ВЭУ основана на комбинировании традиционных инженерных нормативных методов расчета с компьютерными технологиями проектирования строительных конструкций. Она применена впервые в странах СНГ и позволила получить обоснованные конструктивные решения и технико-экономические показатели основных конструкций. Учет условий твердения и набора прочности бетоном при принятой технологии бетонирования ростверка фундамента, сопровождающийся значительными тепловыделениями, позволил ограничить неблагоприятное влияние температурно-усадочных деформаций бетона на напряженное состояние массивных фундаментных плит.

Ключевые слова: фундаменты ветроэнергетических установок, деформации, прочность, усталость, расчеты, конечно-элементная модель, характеристики напряженно-деформированного состояния.

COMBINED TECHNOLOGY DESIGN FOUNDATION WIND POWER PLANTS WITH A CAPACITY OF 2.5–3.0 MW

Volodymyr Korsun¹, Yuriy Kalmykov², Sergey Makarenko³

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

E-mail: ¹korsun_vi@mail.ru, ²urkalmikow@rambler.ru, ³s.u.makarenko@donnasa.ru.

Received 12 June 2015; accepted 26 June 2015.

Abstract. The experience of the design of foundations for wind power installations (wind turbines), which belong to a class of unique high-rise building height $H=100...120$ m and are characterized by high demands on their rigidity and stability, are presented. The problems of foundation design for wind turbine manufacturers «Furlender», «Vestas», «General Electric» capacity of 2.5...3.0 MW, which was first used in the wind power plants in Ukraine and have no analogues in the CIS, are reviewed. The article presents the basic types of calculations for the foundations of wind turbines, arranged in the compressible and incompressible grounds. We describe a step by step method of performing calculations bases and elements of foundations of wind turbines, as well as the need to set quantitative assessment and consideration of the effect of inhomogeneous structures in terms of temperature and shrinkage deformation of concrete in the foundations of the state of stress in the process of hardening concrete. The results of calculations of deformations of raft foundation for wind turbines various types and calculation of fatigue strength of anchoring elements of foundations are presented. A comparative analysis of the most appropriate calculation of finite element models of objects are made. Applied technology foundation design considered types of wind turbines based on the combination of traditional engineering regulatory calculation methods with computer technology structural design. It applied for the first time in the CIS and provides a reasonable design solutions and technical and economic indicators of the main structures. Considerations hardening and curing concrete in the technology adopted concrete foundation raft foundation accompanied by significant heat generation, it will limit the adverse effects of temperature and shrinkage deformation of concrete on the stress state of the massive foundation slabs.

Keywords: foundations of wind turbines, deformation, strength, fatigue calculations, finite element model, the characteristics of the stress-strain state.

Введение

На приазовских территориях Донецкой, Запорожской и Николаевской областей Украины в период с 2011 по 2014 гг. были введены в эксплуатацию в общей сложности 177 ВЭУ с горизонтальной осью вращения ветроколеса. Мощности эксплуатируемых установок составляют: 2,5 МВт – для ВЭУ типов «Furlender – R100 (W100-50Hz LM48.8) – GL3a/DIBt2» и «General Electric – 2.x-120 DFIG 110m НН IEC S LM58.7 SW»; 3,0 МВт – для ВЭУ типа «Vestas – V112-3.0 MW НН94 IEC2a». Отметки положения осей роторов названных ВЭУ составляют соответственно 98,2, 110,0 и 94,0 м, диаметры лопастей роторов – 100, 120 и 112 м.

Конструктивно ВЭУ состоят из металлоконструкций несущей башни и конструкций гондолы с электромеханическим оборудованием и лопастями ротора. По геометрическим параметрам конструкции ВЭУ относятся к классу высотных сооружений башенного типа, надежность работы которых обеспечивается выполнением жестких требований первой и второй групп предельных состояний, предъявляемых к конструкциям несущей башни и фундаментов. Основными факторами, определяющими геометрические параметры названных конструктивных элементов, являются жесткость положения фундаментов и усталостная прочность стальных конструкций несущей башни и крепежных анкерных болтов, устраиваемых в теле фундамента.

Производителями турбин ВЭУ с целью обеспечения надежной работы механических устройств, размещаемых в гондole ВЭУ, сформулированы особые требования к жесткости системы «фундамент – грунтовое основание», определяющей расчетные величины наклонов (крен) и вертикальных перемещений сооружения. Наличие таких требований, в дополнение к стандартным [1, 2], обусловлено стремлением к снижению дополнительных усилий, возникающих в сечениях несущей башни вследствие крена фундамента, а также вследствие деформаций геометрической оси башни от действующих горизонтальных нагрузок.

Состояние вопроса

Строительство ветряных электростанций с ВЭУ мощностью от 2,5 МВт на территории Украины

осуществлялось впервые. Устанавливаемые ВЭУ не имели аналогов применения на территории стран СНГ, что и объясняет отсутствие опыта проектирования фундаментов таких электростанций, а также определяет необходимость выполнения уникальных работ по проектированию инженерных сетей и строительных конструкций.

Имеющийся опыт строительства ВЭУ на территориях Украины и Российской Федерации включал в себя случаи строительства установок с номинальной мощностью не более 1,0 МВт и со значительно меньшей высотой несущих башен (менее 60 м). Для конструкций фундаментов упомянутых установок были разработаны методики расчета [3–6], которые в достаточно полном объеме содержат указания по определению нагрузок, по выполнению прочностных и деформационных расчетов оснований и элементов конструкций фундаментов ВЭУ. Однако в методиках [3–6] не рассмотрены вопросы расчетов анкерных устройств с предварительным напряжением, работающих в условиях знакопеременных нагрузжений, недостаточно полно определяются параметры расчетов на усталость, а также не содержатся рекомендации по автоматизации расчетов сечений конструктивных элементов фундаментов и деформаций фундаментов в целом как единой системы.

Целью работы является обоснование выбора, оптимизация конструктивных решений и разработка рабочей документации на устройство фундаментов под ВЭУ «Furlender», «Vestas» и «GeneralElectric» мощностью 2,5...3,0 МВт для приазовских территорий Донецкой, Запорожской и Николаевской областей Украины.

Основные задачи исследований:

- выполнить анализ инженерно-геологических условий строительства, дополнительных требований к фундаментам, предъявляемых производителями ВЭУ;
- выполнить сопоставительные расчеты и определить оптимальные конструктивные решения фундаментов под ВЭУ трех вышеуказанных типов;
- разработать рабочую проектную документацию на устройство конструкций фундаментов под применяемые ВЭУ;
- выполнить авторский надзор за реализацией проектных решений в процессе строительства;

- выполнить натурные измерения полей температур по объему конструкций фундаментов, оценить расчетными методами влияние действительных перепадов температуры на НДС конструкций в процессе возведения;
- выполнить контроль геодезическими средствами за деформациями фундаментов в течение первого года эксплуатации ВЭУ.

Расчеты оснований и основных конструктивных элементов фундаментов по деформациям и несущей способности, а также разработка рабочих чертежей на 177 штук фундаментов ВЭУ «Furlender» «Vestas», «General Electric» мощностью 2,5...3,0 МВт были выполнены специалистами Специализированного научно-производственного центра «Специальные и высотные инженерные сооружения» (СНПЦ «СВИС») при Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДонНАСА, Украина). Результаты расчетов и разработанные проектные решения конструкций фундаментов прошли экспертную проверку и утверждение специалистами проектно-конструкторского бюро НСЕ (Гамбург, Германия). Исполнителями работ осуществлен авторский надзор в процессе строительства фундаментов, выполнены натурные измерения полей температур в бетоне массивных фундаментов, наблюдения за образованием и динамикой развития трещин на наружных поверхностях фундаментов вследствие неоднородного развития температурно-усадочных деформаций по объему конструкций, геодезические измерения осадок и кренов сооружений в течение первого года эксплуатации.

Финансирование проектных работ осуществлялось компаниями ООО «ТП Фирма «Донттехпром» (г. Донецк), ООО «Ветропарк «Краснодонский» (г. Луганск), ЧП «Проектбуд» г. Старый Самбір Львовской обл.).

Исходные данные для разработки проекта

Усилия, передающиеся на привалочную плоскость фундамента от несущей башни ВЭУ в виде изгибающих моментов и сосредоточенных сил, принимались согласно данным из технических спецификаций поставщиков турбин. Усилия, представленные в технических спецификациях, определены согласно требованиям стандарта [7], где в разделе 7 рассмотрены все возможные си-

туации жизненного цикла ВЭУ: стадии нормальной и аварийной эксплуатации, стадии запуска, стадии останова и др. Согласно требованиям стандарта [7] усилия, действующие в сечениях несущей башни, принимаются из анализа результатов расчета динамической модели сооружения для различных расчетных ситуаций. Для расчетов динамических моделей ВЭУ используют, как правило, численное моделирование аэродинамических процессов работы установок, используя мощные приложения типа ABAQUS, ANSYS, с последующей верификацией полученных результатов соответственно данным наблюдений за поведением полномасштабных моделей ВЭУ в натуральных условиях.

При выборе типа конструкции фундамента под ВЭУ принимались во внимание следующие факторы:

- различная многослойная структура слагающих основание грунтов с переменным уровнем грунтовых вод (УГВ);
- сравнительно большой разброс в характеристиках слагающих основания грунтов на площадках строительства;
- необходимость в типизации конструктивных решений и в унификации размеров основных элементов свай и ростверка, узлов их соединений.

В данном исследовании использован вычислительный программный комплекс ПК «Lira-Windows» версии 9.6 (лицензия № 94107794).

Величины усилий для расчетов оснований и конструкций фундаментов по первой (ultimate limit state) и второй (serviceability limit states) группам предельных состояний для различных типов ВЭУ представлены соответственно в таблицах 1 и 2, положительные направления усилий – на рис. 1.

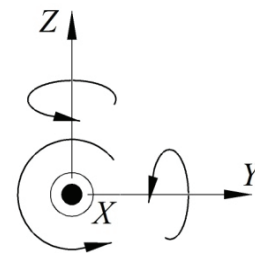


Рисунок 1. Положительные направления усилий на привалочной плоскости фундамента.

Из анализа величин усилий, действующих на привалочной плоскости фундаментов, следует, что их наибольшие значения характерны для ВЭУ производства компании «Furlender», наименьшие – для ВЭУ компании «Vestas». Однако отмеченное различие в относительных величинах не превышает 5%. Дополнительно отмечается, что для ВЭУ типа «Vestas» величины, представленные в таблице 1, указаны без соответствующих коэффициентов безопасности, обязательных к применению при численном моделировании. Дополнительный изгибающий момент от искривления продольной оси ствола в вертикальной плоскости вследствие действия ветро-

вого давления и допускаемого крена фундамента учитывался на этапах выполнения расчетов основания. Площадки строительства ВЭУ расположены в сейсмически пассивных районах (сейсмичность по шкале MSK – не более 6 баллов), поэтому специальные динамические расчеты системы «основание – фундамент – надфундаментное строение» не выполнялись.

Сочетания усилий от действующих нагрузок, согласно требованиям заказчиков и поставщиков турбин ВЭУ, определялись с использованием коэффициентов безопасности, представленных в стандартах [8–12]. Правила вычисления суммарных силовых эффектов, соответствующие

Таблица 1. Величины наибольших усилий для расчетов по первой группе предельных состояний

Расчетные случаи согласно [7]	Величины сосредоточенных сил				Величины изгибающих моментов				Коэффициент безопасности	Скорость ветра на уровне оси ВК, м/с	Угол ветровой направленности, градусы
	F _z , кН	F _y , кН	F _x , кН	F _{res} , кН	M _z , кН×м	M _y , кН×м	M _x , кН×м	M _{res} , кН×м			
ВЭУ типа General Electric - 2.x-120 DFIG 110m HH IEC S LM58.7 SW											
DLC 8.1	-6331,8	50,9	191,3	198,0	-917,0	-9456,7	4860,4	10632,6	1,50	19,8	-22,5
DLC 6.2	-4609,3	-944,6	26,8	945,0	2316,7	5011,0	-87560,4	87703,7	1,10	47,3	75,2
DLC 1.5	-5757,8	15,3	893,2	893,4	-922,3	-92633,1	-1594,8	92646,8	1,35	10,1	-8,0
DLC 2.2	-4697,5	-167,0	436,6	467,4	6329,0	-42925,4	-22700,3	48558,1	1,10	10,4	8,0
DLC 1.6	-5766,2	-32,9	883,9	884,5	1329,5	-92788,0	-7247,9	93070,6	1,35	12,5	-8,0
DLC 6.2	-4576,2	-914,7	93,0	919,4	2976,2	4780,6	-88041,3	88171,0	1,10	39,8	28,3
DLC 6.2	-4583,1	944,6	96,5	949,5	-2599,9	-1976,2	87738,3	87760,6	1,10	48,0	-63,0
DLC 1.6	-5767,1	-33,8	883,0	883,6	1298,4	-92785,2	-7368,0	93077,3	1,35	12,4	-8,0
ВЭУ типа Furlender - R100 (W100-50Hz LM48.8) - GL3a/DIBt2											
DLC 1.1a	-6405,8	87,8	-402,3	411,8	79,7	-37080,5	-10534,1	38547,7	1,35	12,0	0,0
DLC 6.1n	-5384,0	-875,0	-108,0	881,0	-1174,0	-365,0	65374,0	65375,0	1,35	32,1	-21,2
DLC 2.2a	-4458,3	-247,5	-1079,1	1107,7	-42,9	-97175,1	4228,4	97267,1	1,10	25,0	0,0
DLC 1.6e	-5242,1	-12,2	164,7	166,1	-6822,9	22331,7	6123,6	23156,1	1,35	29,0	0,0
DLC 2.2a	-4458,3	-247,5	-1079,1	1107,7	-42,9	-97175,1	4228,4	97267,1	1,10	25,0	0,0
DLC 6.1r	-5363,0	855,0	-568,0	1028,7	2105,0	-30380,0	-70228,0	76517,4	1,35	50,0	14,5
DLC 6.1e	-5196,0	-811,0	-792,0	1133,0	-1209,0	-47665,0	68275,0	83267,2	1,35	53,0	-12,4
DLC 2.2a	-4458,3	-247,5	-1079,1	1107,7	-42,9	-97175,1	4228,4	97267,1	1,10	25,0	0,0
ВЭУ типа Vestas - V112-3.0 MW HH94 IEC2a											
DLC 3.2	-4184,8	-	-	752,7	-808,7	-	-	69583,0	1,35	32,0	0,0
DLC 6.2a	-4105,4	-	-	956,1	1826,3	-	-	80751,0	1,10	50,0	0,0

Таблица 2. Величины наибольших усилий для расчетов по второй группе предельных состояний

Расчетные случаи согласно [7]	Величины сосредоточенных сил				Величины изгибающих моментов				Коэффициент безопасности	Скорость ветра на уровне оси ВК, м/с	Угол ветровой направленности, градусы
	F _z , кН	F _y , кН	F _x , кН	F _{res} , кН	M _z , кН×м	M _y , кН×м	M _x , кН×м	M _{res} , кН×м			
ВЭУ типа General Electric - 2.x-120 DFIG 110m HH IEC S LM58.7 SW											
DLC 3.1	-4260,8	28,1	-411,5	412,5	-97,7	-42608,0	-5084,0	43261,7	1,00	-	0,0
DLC 6.2	-4190,4	866,1	-23,8	866,5	2118,5	4569,5	-79889,3	80019,8	1,00	-	0,0
DLC 2.2	-4193,5	870,1	-26,5	870,5	2157,4	4310,0	-79840,5	79956,3	1,00	-	0,0
ВЭУ типа Furlender - R100 (W100-50Hz LM48.8) - GL3a/DIBt2											
DLC 3.1, 4.1	-4052,0	14,0	-356,0	356,3	178,0	-33139,0	-2964,0	33271,3	1,00	10,0	0,0
	-3967,0	83,0	-91,0	123,2	-1018,0	-4663,0	-7314,0	8674,0	1,00	24,0	0,0
	-4043,0	6,0	-375,0	375,0	337,0	-34242,0	-2228,0	34314,4	1,00	10,0	0,0
	-3974,0	19,0	-93,0	94,9	-1413,0	-5424,0	-1905,0	5748,8	1,00	24,0	0,0
	-4039,0	-5,0	-374,0	374,0	427,0	-34325,0	-1235,0	34347,2	1,00	10,0	0,0
	-3967,0	83,0	-91,0	123,2	-1018,0	-4663,0	-7314,0	8674,0	1,00	24,0	0,0
	-4043,0	6,0	-975,0	975,0	337,0	-34242,0	-2228,0	34314,4	1,00	10,0	0,0
	-4039,0	-5,0	-374,0	374,0	427,0	-34325,0	-1235,0	34347,2	1,00	10,0	0,0
ВЭУ типа Vestas - V112-3.0 MW HH94 IEC2a											
DLC 1.1, 3.1, 4.1	-4221,1			572,3	345,0			48904,0	1,00	10,0	0,0

совместному действию нагрузок, устанавливались последовательно для каждого расчетного случая нормальной либо аварийной эксплуатации ВЭУ. Расчетные случаи, коэффициенты безопасности и соответствующие им группы комбинируемых усилий для расчетов по первой и второй группам предельных состояний представлены соответственно в таблицах 3 и 4. В зависимости от вида выполняемых расчетов суммарные усилия на привалочной плоскости рассматривались как соответствующие отдельным случаям эксплуатации ВЭУ.

Расчеты фундаментов по деформациям

По результатам предварительных расчетов оснований и конструкций фундаментов с учетом расхода бетона и арматуры установлено, что фундаменты мелкого заложения в виде сплошной фундаментной плиты целесообразно применять на площадках строительства с несжима-

емыми основаниями, а также с основаниями, сложенными крупнообломочными либо песчаными грунтами с модулем деформации $E_{гр}$ не менее 30...35 МПа. Расчеты деформаций фундаментов на несжимаемых грунтах, либо устраиваемых на сваях-стойках, не выполняются. Для таких фундаментов выполняется проверка несущей способности основания согласно требованиям [1, 2] и проверка устойчивости фундамента против опрокидывания.

Расчеты деформаций фундаментов на сжимаемых грунтах, которые преобладают на площадках строительства рассматриваемых ВЭУ, включают определение жесткостных характеристик основания (коэффициентов постели) под подошвой ростверка, в уровне пяты сваи, а также по боковым поверхностям свай; определение угла наклона (крена) свайного фундамента. Расчеты жесткостных параметров основания и кренов свайного фундамента выполнялись согласно указаниям нормативных документов

Таблица 3. Расчетные случаи, коэффициенты безопасности и соответствующие им группы комбинируемых усилий для расчетов по первой группе предельных состояний

Расчетные случаи	LC1	LC2	LC3	LC11	LC12	LC13	LC21	LC22	LC23
	Собственный вес фундамента	Полезная нагрузка на грунтовой засыпке	Выталкивающее действие грунтовой воды	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 6.2a; определяющий фактор – вертикальная сила	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 6.2a; определяющий фактор – изгибающий момент; направление 0°	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 6.2a; определяющий фактор – изгибающий момент; направление 11,25°	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 3.2; определяющий фактор – вертикальная сила	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 3.2; определяющий фактор – изгибающий момент; направление 0°	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 3.2; определяющий фактор – изгибающий момент; направление 11,25°
Группы усилий									
LG 11	0,90	–	1,35	0,90	1,10	–	–	–	–
LG 12	0,90	–	1,35	0,90	–	1,10	–	–	–
LG 13	1,35	1,20	–	1,10	1,10	–	–	–	–
LG 14	1,35	1,20	–	1,10	–	1,10	–	–	–
LG 21	0,90	–	1,35	–	–	–	0,90	1,35	–
LG 22	0,90	–	1,35	–	–	–	0,90	–	1,35
LG 23	1,35	1,20	–	–	–	–	1,35	1,35	–
LG 24	1,35	1,20	–	–	–	–	1,35	–	1,35

Примечания.

1. Представлены данные для усилий, действующих в уровне низа несущей башни ВЭУ типа «Vestas».
2. Аббревиатуры в заголовках строк и столбцов: LC – расчетный случай, LG – расчетная группа нагрузок.
3. Направление плоскости действия изгибающего момента M_{res} , соответствующее углу 0°, совпадает с главными осями фундамента.

Таблица 4. Расчетные случаи, коэффициенты безопасности и соответствующие им группы комбинируемых усилий для расчетов по первой группе предельных состояний

Расчетные случаи	LC1	LC2	LC3	LC11	LC12	LC13
	Собственный вес фундамента	Полезная нагрузка на грунтовой засыпке	Выталкивающее действие грунтовой воды	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 3.2; определяющий фактор – вертикальная сила	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 3.2; определяющий фактор – изгибающий момент; направление 0°	Случай эксплуатации ВЭУ DLC 3.2; определяющий фактор – изгибающий момент; направление 11,25°
Группы усилий						
LG 11	1,0	–	1,0	1,0	1,0	–
LG 12	1,0	–	1,0	1,0	–	1,0
LG 13	1,0	1,0	–	1,0	1,0	–
LG 14	1,0	1,0	–	1,0	–	1,0

Примечания – соответственно тексту примечаний к таблице 3.

[1, 2, 13, 14], достоверность результатов расчетов обеспечивалась также выбором соответствующей конечно-элементной модели (рис. 2), разработанной в ПК «Lira-Windows». При этом выполнялся параллельный анализ трех расчетных схем: схема 1 – предусматривала совместную работу ростверка фундамента с основанием согласно указаниям [2]; схема 2 – представлена пространственной моделью грунто-свайного массива; схема 3 – была рекомендована бюро НСБ, не учитывала отпор грунта по подошве ростверка и

предполагала жесткую заделку опорных участков свай в основании.

Общая конечно-элементная модель фундамента для всех анализируемых схем представлена пространственной расчетной моделью метода конечных элементов (МКЭ), в качестве основных составляющих которой приняты стержневые конечные элементы (тип КЭ-10) – для моделирования свай и несущей башни ВЭУ, и плоские конечные элементы (КЭ-41, КЭ-44) – для моделирования конструкций ростверка. Сопряжение стерж-

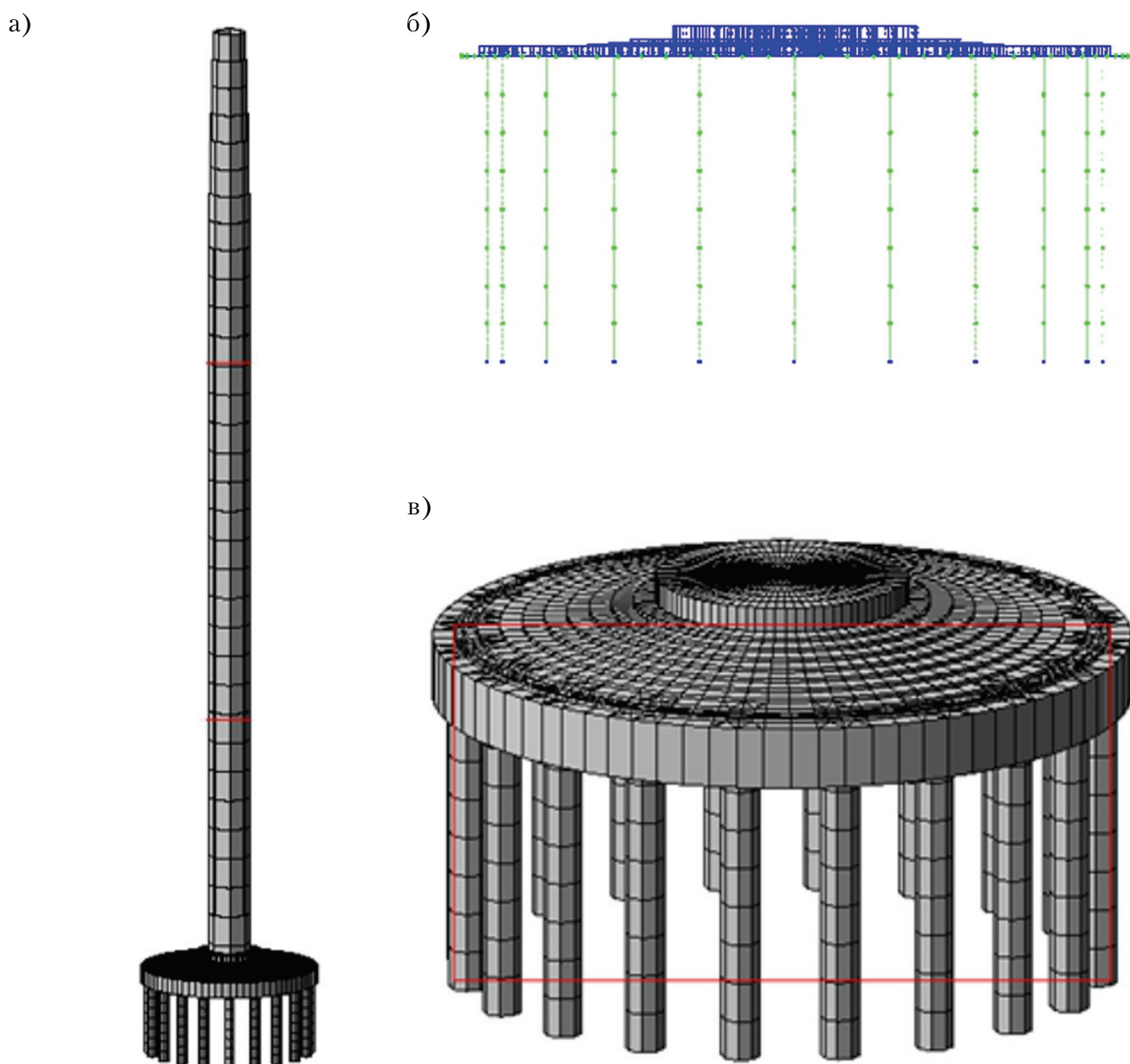


Рисунок 2. Конечно-элементная модель для расчетов свайного фундамента ВЭУ: а) общий вид модели; б) дискретизация модели на конечные элементы; в) общий вид модели свайного фундамента.

жневых элементов несущей башни, а также свай с плоскими элементами ростверка в МКЭ-модели предусмотрено жестким. Жесткое сопряжение обеспечивалось применением специальных элементов – абсолютно жестких тел, объединяющих узлы опорного участка несущей башни с узлами постаменты ростверка, а также оголовки свай с пластинами ростверка на участках их сопряжения. В пространственной модели грунто-свайного массива использовались объемные изопараметрические элементы типов КЭ-34, КЭ-36. Отмечается возможность применения нелинейных объемных элементов (КЭ-234, КЭ-236). Учет совместной работы грунта с конструкциями фундамента в МКЭ-модели выполнялся путем использования специальных конечных элементов-пружин (КЭ-56), которые вводились в узлы стержневых элементов для свай, а также путем подсчета величин коэффициентов постели основания С1. Определение коэффициентов постели С1, а также жесткостных параметров КЭ-56 выполнялось согласно требованиям [1, 2, 14].

Учет моментных нагрузок в МКЭ-модели фундамента осуществлялся путем подсчета величины эквивалентной равномерно распределенной нагрузки для соответствующих значений изгибающих моментов, действующих в вертикальных плоскостях расчетной схемы, с последующим приложением равномерно распределенной нагрузки на стержневые конечные элементы, моделирующие несущую башню.

Как показал сопоставительный анализ результатов расчетов различных МКЭ-моделей (таблица 5), а также расчетов согласно требованиям нормативных документов [1, 2, 14], расчетная модель, составленная по схеме 1, с достаточной достоверностью отображает работу системы «основание – фундамент – надфундамент-

ное строение». Аналогичные результаты в части деформаций показывает также расчетная модель, составленная по схеме 2, однако ее использование усложняет процедуру разработки МКЭ-модели, увеличивает количество уравнений МКЭ, что обуславливает увеличение временных затрат по выполнению расчетных процедур и усложняет обработку результатов. Применение в расчетах модели, разработанной по схеме 3, предложенной бюро НСЕ (Германия), приводит к увеличению деформаций сооружения, усилий в сваях и в ростверке.

Конструктивные особенности фундаментов

Согласно результатам сопоставительных расчетов фундаментов по деформациям для всех типов ВЭУ принят свайный фундамент в составе 16...20 висячих буронабивных свай и ростверка диаметром 18,0 м. Количество и диаметры висячих свай определялись из расчетов по несущей способности оснований. Схема расположения элементов фундамента для ВЭУ типа «Vestas» представлена на рис. 3.

Расчетное определение средних, условно равномерных осадок фундаментов является необязательным и не требуется поставщиками турбин.

Расчеты конструкций фундаментов по несущей способности

В состав расчетов конструктивных элементов свайных фундаментов ВЭУ по первой группе предельных состояний, согласно требованиям нормативных документов [8, 12, 15, 17], должны быть включены следующие:

- вычисление расчетных усилий, действующих в сваях, с последующим их сопоставлением с

Таблица 5. Результаты расчетов кренов свайного фундамента для ВЭУ типа «Vestas»

Расчетные величины кренов, мм /м:			Предельно допускаемые величины кренов, мм /м:			
вычисленные согласно указанию [14]	вычисленные согласно указанию [2]	полученные из МКЭ модели (схема 1)	для ВЭУ типа «Vestas»	для ВЭУ типа «Furlender»	для ВЭУ типа «GE»	Согласно требованиям [1, 2]
0,0031	0,0016	0,0012	0,003	0,001	0,003	0,004

Примечание. Результаты расчетов представлены для оснований с усредненным модулем деформаций $E_{гр} = 14\ 000$ кПа.

- несущей способностью свай заданных размеров по грунту основания;
- расчет свай на совместное действие горизонтальной силы и изгибающего момента как стержней, работающих в упругой среде;
- вычисление расчетного сопротивления грунта под подошвой грунто-свайного массива и его сопоставление с реактивными напряжениями от действующих на фундамент нагрузок;
- расчеты прочности нормальных и наклонных сечений плитного ростверка и буронабивных свай;
- расчеты нормальных и наклонных сечений ростверка и буронабивных свай на усталостное разрушение.

Расчетные усилия в наиболее нагруженных сваях для выполнения первых двух видов расчетов, а также для расчетов прочности нормальных и наклонных сечений свай определялись двумя способами. Первый способ предусматривал использование стандартных методик вычисления действующих в сваях нормальных и поперечных сил, а также изгибающих моментов в соответствии с указаниями соответствующих разделов и приложений строительных норм [1, 2, 14]. Расчетные процедуры были автоматизированы реализацией несложных расчетных процедур в электронных таблицах MS Excel. Второй способ был основан на результатах численного анализа расчетных МКЭ-моделей аналогичных тем, которые использовались в расчетах деформаций фундаментов. Сопоставление полученных усилий, представленных в таблице 6, показывает, что сжимающие усилия в сваях, полученные из

МКЭ-анализа, являются несколько (до 25 %) заниженными в сравнении с величинами, полученными после выполнения расчетов согласно [1, 2, 14], и существенно, более чем в два раза, могут превышать величины растягивающих усилий. Расчетные данные, представленные в таблице 5, однозначно свидетельствуют об определенных резервах в величинах несущей способности свай для случаев учета реактивного отпора по подошве ростверка свайного фундамента принятых размеров.

Длина и диаметр буронабивных свай определялись несущей способностью свай по грунту основания, которая подсчитывалась согласно требованиям [1, 2]. По результатам выполненных расчетов для различных типов грунтовых условий в местах площадок строительства ветроэлектростанций длина свай составляла от 16 до 28 м при заданном диаметре сваи 1,2 м и их количестве 16 шт. Увеличение количества свай до 20 шт. при уменьшении их диаметра до 1,0 м и укорочении длины не привело к значимой экономии материалов и трудозатрат на бурение скважин.

Проверка напряжений под подошвой грунто-свайного массива выполнялась согласно стандартным методам, регламентируемым в [1, 2, 14]. Размеры конструктивных элементов фундамента, установленные на этапе расчета его деформаций, обеспечивали, как правило, выполнение требований, установленных в [1, 2, 14].

Расчеты прочности нормальных и наклонных сечений ростверка и висячих свай оказалось наиболее удобным выполнять с использованием автоматической процедуры импорта результатов рас-

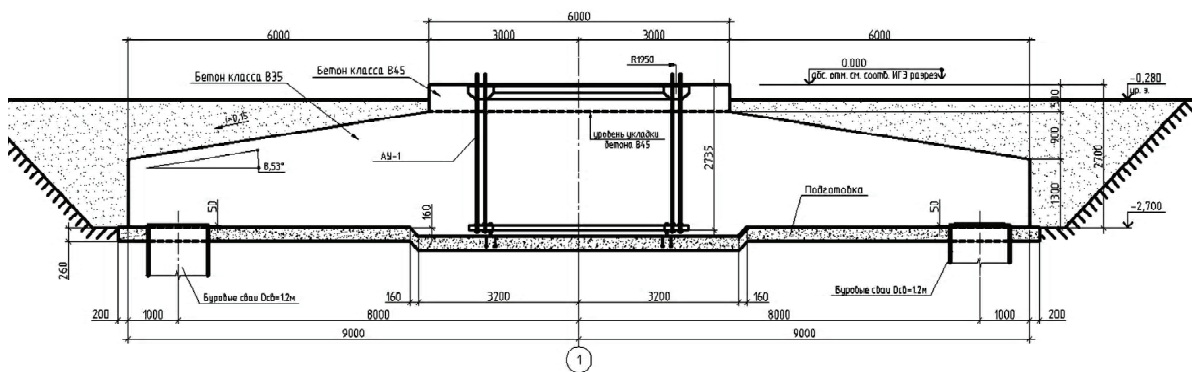


Рисунок 3. Схема расположения элементов свайного фундамента ВЭУ типа «Vestas».

Таблица 6. Нормальные силы в наиболее нагруженных сваях, вычисленные разными методами для ВЭУ типа «Vestas»

Шифр группы РСН (см. табл. 3)	Знак усилия	Величины усилий в сваях, кН, для различных расчетных моделей			
		МКЭ-модели			Модели строительных норм
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	ДБН В.2.1-10-2009 [1]
LG21	сжатие	-1720,3	-2030,6	-2152,7	-2277,0
	растяжение	+1369,9	+1412,9	+1534,9	+698,9
LG23	сжатие	-2515,1	-3041,3	-3163,4	-3227,9
	растяжение	+786,5	+613,6	+735,6	+205,6

Примечания: 1. Поскольку распределение продольных усилий по длине КЭ, моделирующих сваи, является неравномерным, в таблице представлены наибольшие значения усилий.

2. Для расчетной модели типа 1 выполнен учет реактивных давлений грунта по подошве ростверка (модель плитно-свайного фундамента). Для расчетной модели типа 2 учет реактивных давлений по подошве ростверка не выполнялся. В модели 3-го типа в уровне пяты свай введены связи, ограничивающие перемещения нижних концов свай в вертикальном направлении (аналог определения усилий в сваях согласно разделу 8.5 [1]).

четов МКЭ-модели ПК «Lira-Windows» в специальный конструирующий модуль «ЛИР-АРМ», предназначенный для определения требуемого количества арматуры в железобетонных стержневых элементах и элементах-пластинах. Модуль «ЛИР-АРМ» реализует алгоритмы расчетов сечений железобетонных элементов конструкций согласно требованиям строительных норм [15, 12]. Определение требуемого количества арматуры в модуле «ЛИР-АРМ» основано на выполнении как расчетов по первой группе предельных состояний, так и расчетов по допускаемой ширине раскрытия трещин, которые зачастую являются определяющими для назначения необходимого армирования ростверка. Результаты расчетов требуемого количества арматуры представляются в виде изополей армирования верхних и нижних зон пластин в ортогональных направлениях, которые непосредственно используются при разработке рабочих чертежей.

Расчеты на усталостную прочность нормальных и наклонных сечений конструктивных элементов фундамента ввиду сложностей, связанных с алгоритмизацией расчетных процедур и неоднозначности в выборе расчетных моделей, занимают особое место в перечне расчетов по первой группе предельных состояний. Методики расчетов железобетонных элементов кон-

струкций на усталость в строительных нормах [12, 17] и [10, 12, 15] носят принципиальные различия. По требованию поставщиков турбин расчеты на усталость выполнялись согласно указаниям строительных стандартов [10, 12, 15]. Исходными данными для выполнения расчетов являются массивы величин (т. н. матрица Маркова) в виде списков циклов изменения усилий на привалочной плоскости фундамента, предоставляющая следующий набор данных для каждого цикла изменения усилий: среднее значение усилия, амплитуда отклонения усилия от среднего значения, а также количество циклов, связанных со средним значением и амплитудой. Указанные массивы предоставляются для каждого усилия на привалочной плоскости (M_y , F_x и т. д.).

Отмечается, что использование в расчетах указанного массива величин для непосредственной численной оценки усталостной прочности конструктивных элементов фундамента является достаточно сложной задачей, требующей применения специальных программных комплексов и использования значительных ресурсов ПЭВМ. Поэтому для практических расчетов принято использовать так называемый rainflow-counting algorithm (алгоритм «водопада»), являющийся одним из способов схематизации случайных процессов нагружения конструкций согласно [18].

Определение усилий в сечениях конструктивных элементов фундамента для расчетов усталостной прочности производилось с использованием расчетной МКЭ-модели ПК «Lira-Windows». С учетом того, что для определения усилий решалась упругая задача МКЭ, на первом этапе определялись величины внутренних усилий в рассматриваемых сечениях ростверка и свай от единичных нагрузок. На втором этапе полученные усилия умножались на величину соответствующей внешней нагрузки для конкретного цикла изменения усилий с целью получения напряжений в растянутой арматуре. Расчет на усталостную прочность выполнялся согласно [12]. Допускаемое значение напряжений в арматуре при расчете на усталость согласно [12] определяется для различных случаев по представленным ниже формулам.

Для случая $N \leq N^*$:

$$\log_{10}(\Delta\sigma) = \log_{10}(\Delta\sigma_{RSK}) \cdot 2 - \frac{\log_{10}(N)}{\log_{10}(N^*)}.$$

Для случая $N > N^*$:

$$\log_{10}(\Delta\sigma) = \log_{10}(\Delta\sigma_{RSK}) \cdot 2 - \frac{\log_{10}(N^*)}{k_1} - \frac{\log_{10}(N) - \log_{10}(N^*)}{k_2}.$$

Здесь:

$\Delta\sigma$ – допускаемое изменение напряжения в арматуре;

$\Delta\sigma_{RSK}$ – максимально допускаемое напряжение в арматуре при количестве циклов, равном N^* ;

N – действительное количество циклов;

$N^* = 10^6$ – максимальное количество циклов, при котором допускаемый уровень напряжения в арматуре может достигать $\Delta\sigma_{RSK}$;

$k_1 = 5$; $k_2 = 9$ – вспомогательные коэффициенты.

Определение усталостной прочности производилось для наиболее нагруженных фрагментов фундамента.

Результаты расчетов усталостной прочности фундаментов поставщика «GE» в виде так называемых кривых «S-N» представлены на рис. 4.

Учет температурных усилий в ростверках фундаментов

Одним из наиболее жестких требований поставщиков турбин к конструкциям фундаментов ВЭУ является требование к технологии бетонирования ростверков фундаментов, исключающих временные перерывы в укладке бетонной смеси. Вследствие потребности в непрерывной

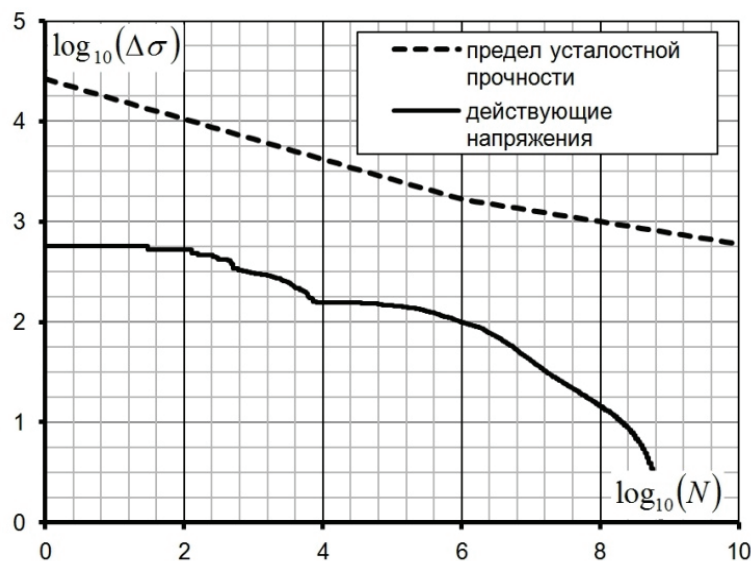


Рисунок 4. Сопоставление величин напряжений в арматуре ростверка фундамента ВЭУ типа «GE» в зависимости от количества циклов их отклонения от среднего значения с пределом усталостной прочности, регламентированной [12].

укладке больших объемов бетона твердение бетонной смеси и набор бетоном ростверка прочности сопровождается интенсивными тепловыделениями в глубинных объемах конструкции вследствие экзотермии цемента. Технология ухода за твердеющим бетоном ростверков, в том числе и в зимних условиях, предусматривала минимум 12-ти суточную выдержку в условиях термоса – утепленной теплоизоляционными матами опалубке и огражденными от тепловых потерь открытыми поверхностями ростверка. Контроль температуры в теле бетона в условиях строительной площадки осуществлялся спиртовыми термометрами, систематически погружаемыми в тело ростверка, где в определенных местах устраивались специальные шурфы в количестве не менее 3-х на один ростверк для размещения термометров.

Экзотермия цемента обуславливает нагрев глубинных слоев бетона до температуры не менее 65 °С, что, несмотря на снижение теплопотерь посредством применения соответствующей термоизоляции, обуславливает температурные перепады между глубинными и наружными объемами в период набора бетоном прочности. Величины температурных перепадов увеличиваются вследствие суточного колебания температур, особенно в зимних условиях. В конструкциях различия в деформациях наружных, менее нагретых, и внутренних, более нагретых слоев бетона, приводят к формированию начального напряженного состояния, которое необходимо учитывать при конструировании армирования ростверка. Свидетельством формирования начального напряженного состояния массивной конструкции ростверка являются начальные трещины, образующиеся на наружных поверхностях ростверка на 2...3 суток после снятия опалубки. Начальная ширина раскрытия трещин в момент их образования составляет 0,01...0,03 мм, расстояния между трещинами по наружной грани ростверка являются практически одинаковым и составляют 2,0...2,5 м. В течение 30...50 суток после демонтажа опалубки наблюдается вследствие усадки бетона дополнительное раскрытие ранее образовавшихся трещин до величин 0,2...0,3 мм.

Образование и раскрытие температурно-усадочных трещин является значимым для долговечности конструкций фундамента и делает не-

обходимым выполнение специальных расчетов, направленных на количественную оценку формирующегося начального напряженного состояния в элементах конструкции ростверка. Исходными данными для такого вида расчетов служили результаты специальных натурных исследований распределения температуры по объему ростверка. В период бетонирования фундамента ВЭУ типа «Фурлендер» на площадке Новоазовской ВЭС в тело ростверка в процессе его бетонирования были установлены контрольные термометры и в течение первых двух недель после бетонирования выполнялись измерения температуры.

Оценка начального объемного напряженного состояния конструкций ростверка осуществлялась с использованием ПК «Lira–Windows». МКЭ-модель была представлена объемными физически-нелинейными конечными элементами и учитывала действительное армирование ростверка. Величины температурно-усадочных деформаций и их распределение в теле ростверка определялись согласно методикам [19, 20]. Учет начального напряженного состояния позволил установить местоположение и количество дополнительного армирования, необходимого для снижения ширины раскрытия температурно-усадочных трещин, а также разработать рекомендации по температурным режимам выдержки бетона для летних и зимних периодов бетонирования.

Заключение

1. Строительство ветроэлектростанций в составе ВЭУ производителей «Furlender» «Vestas», «GeneralElectric» мощностью 2,5...3,0 МВт на территории Украины и других стран СНГ осуществляется впервые, что требует разработки обоснованной методологии выполнения расчетов конструкций железобетонных фундаментов под сооружения данного типа.
2. Опыт проектирования фундаментов для ВЭУ указанных типов позволил установить состав и необходимую последовательность расчетов, определить наиболее значимые факторы влияния на конструкцию фундаментов, как то: неоднородность физико-механических свойств грунтов на площадках строительства, особые требования производителей

турбин к жесткости положения фундаментов и некоторые дополнительные особенности в нагрузках, передающихся на привалочную поверхность фундаментов.

3. В процессе проектирования фундаментов установлена возможность комбинирования традиционных инженерных методик их расчетов, базирующихся на указаниях нормативных документов [1, 2, 7, 8–10, 12, 15–17] с инновационными технологиями проектирования строительных конструкций [21]. Технологии проектирования строительных конструкций, основанные на применении в инженерных задачах МКЭ, позволяют получать достоверные результаты, не уступающие результатам, полученным с использованием традиционных методов. Применение специально ориентированных программных комплексов (ПК «Lira–Windows») и их конструирующих модулей («ЛИР-АРМ») позволяет значительно сократить время выполнения расчетов.
4. Использование предложенных методик расчетов фундаментов позволило достичь показате-

В. И. Корсун, Ю. Ю. Калмыков, С. Ю. Макаренко

ля расхода арматурной стали 125...130 кг/м³, характеризующегося как оптимальный, при соблюдении всех предъявляемых требований.

5. Высокоточные натурные измерения осадок и кренов фундаментов на площадках строительства ВЭУ типа «Furlender», выполненные по истечении годичного срока их эксплуатации, показали соответствие измеренных величин деформаций расчетным значениям.
6. При проектировании фундаментов важным представляется расчетная оценка начального напряженного состояния ростверка, обусловленного неравномерным нагревом наружных и внутренних объемов бетона в массивной конструкции вследствие экзотермии цемента. Наличие неравномерных по объему массива температурно-усадочных деформаций бетона делает необходимым выполнение специальных расчетов, применение соответствующего дополнительного армирования, а также разработку рекомендаций по обеспечению оптимальных температурных режимов выдерживания бетона для летних и зимних периодов бетонирования.

Литература

1. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с. – (Державні будівельні норми).
2. СП 50-102-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и устройство свайных фундаментов [Текст]. – Введен впервые ; одобрен для применения постановлением Госстроя России № 96 от 21 июня 2003 г. – М. : Стройиздат, 2003. – 109 с.
3. Елистратов, В. В. Динамические расчеты системы «Ветроэнергетическая установка – фундамент – основание» [Текст] / В. В. Елистратов, И. А. Константинов, А. А. Панфилов. – СПб. : Издательство СПбГТУ, 1999. – 49 с.
4. Елистратов, В. В. Нагрузки на элементы ветроэнергетической установки, на ее фундамент и основание [Текст] / В. В. Елистратов, И. А. Константинов, А. А. Панфилов. – СПб. : Издательство СПбГТУ, 1999. – 38 с.
5. Елистратов, В. В. Расчет фундаментов ветроэнергетических установок [Текст]. Часть 1. Монолитные железобетонные фундаменты мелкого заложения / В. В. Елистратов, И. А. Константинов,

References

1. DBN V.1.2-2:2006. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
2. SP 50-102-2003. Design and construction of pile foundations. Moscow: Stroiizdat, 2003. 109 p. (in Russian)
3. Elistratov, V. V.; Konstantinov, I. A.; Panfilov, A. A. Dynamic analysis of the system «Wind-electric set – foundation – understructure». St. Petersburg: Publishing St. Petersburg State Technical University, 1999. 49 p. (in Russian)
4. Elistratov, V. V.; Konstantinov, I. A.; Panfilov, A. A. Load on elements of wind-electric set, on its foundation and understructure. St. Petersburg: Publishing St. Petersburg State Technical University, 1999. 38 p. (in Russian)
5. Elistratov, V. V.; Konstantinov, I. A.; Panfilov, A. A. Foundation analysis of wind-electric set. The first part. Cast-in-place reinforced concrete shallow foundation. St. Petersburg: Publishing St. Petersburg State Technical University, 2001. 93 p. (in Russian)
6. Elistratov, V. V.; Konstantinov, I. A.; Panfilov, A. A. Foundation analysis of wind-electric set. The second part. Pile foundations. St. Petersburg: Publishing

- А. А. Панфилов. – СПб. : Издательство СПбГТУ, 2001. – 93 с.
6. Елистратов, В. В. Расчет фундаментов ветроэнергетических установок [Текст]. Часть 2. Свайные фундаменты / В. В. Елистратов, И. А. Константинов, А. А. Панфилов. – СПб. : Издательство СПбГТУ, 2005. – 95 с.
 7. Wind Turbine Generator Systems. Part 1 Safety Requirements [Текст] : IEC Standard 61400-1. – Geneva : IEC, 1999. – 92 p.
 8. ДБН В.1.2-14:2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше зі скасуванням в Україні ГОСТ 7751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4868-84 ; чинні з 2009–12–01. – К. : Мінрегіонбуд, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
 9. Comité Eurointernational du Béton CEB/FIP Model Code 90. Design Code [Текст]. – London : Thelford, 1993. – 871 p.
 10. EN 61400-1:2005. Wind turbines – Part 1: Design requirements [Текст]. – Geneva : IEC, 2005. – 70 p.
 11. Recommended Practice for Compliance of Large On-land Wind Turbine Support Structures [Текст] : ASCE/AWEA RP2011. – Washington : AWEA, 2011. – 89 p.
 12. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings [Текст]. – Geneva : IEC, 1992. – 173 p.
 13. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа [Текст] / НИИ оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова. – М. : Стройиздат, 1984. – 263 с.
 14. Руководство по проектированию свайных фундаментов [Текст] / НИИ оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова. – М. : Стройиздат, 1980. – 151 с.
 15. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – На заміну СНиП 2.03.01-84* ; чинні від 2011–06–01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
 16. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – Уведено вперше ; чинний з 2011–06–01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
 17. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры [Текст]. – Введен впервые ; одобрен для применения Постановлением Госстроя России от 25 декабря 2003 г. № 215. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – 54 с.
 18. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов St. Petersburg State Technical University, 2005. 95 p. (in Russian)
 7. Wind Turbine Generator Systems. Part 1 Safety Requirements: IEC Standard 61400-1. Geneva: IEC, 1999. 92 p.
 8. DBN V.1.2-14:2009. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. General principles of reliability control and constructional safety of buildings, structures and supports. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 37 p. (in Ukrainian)
 9. Comité Eurointernational du Béton CEB/FIP Model Code 90. Design Code. London: Thelford, 1993. 871 p.
 10. EN 61400-1:2005. Wind turbines – Part 1: Design requirements. Geneva: IEC, 2005. 70 p.
 11. Recommended Practice for Compliance of Large On-land Wind Turbine Support Structures: ASCE/AWEA RP2011. Washington: AWEA, 2011. 89 p.
 12. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings. Geneva: IEC, 1992. 173 p.
 13. Gersevanov Research and Development Institute of foundation and underground structures. Guidelines for design of raft foundation of skeleton construction and structures of turret-type. Moscow: Stroizdat, 1984. 263 p. (in Russian)
 14. Gersevanov Research and Development Institute of foundation and underground structures. Guidelines for design of Pile foundations. Moscow: Stroizdat, 1980. 151 p. (in Russian)
 15. DBN V.2.6-98:2009. Concrete and reinforced concrete constructions. Fundamental principles. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 71 p. (in Ukrainian)
 16. DSTU B V.2.6-156:2010. Structures of buildings and erections. Concrete and reinforced concrete structures with heavy weight. Structural concrete. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 118 p. (in Ukrainian)
 17. SP 52-101-2003. Concrete and reinforced concrete structures without prestressing. Moscow: FGUP TsPP, 2004. 54 p. (in Russian)
 18. GOST 25.101-83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results. Moscow: State committee on USSR standards, 1983. 48 p. (in Russian)
 19. Krichevskii, A. P. Analysis of reinforced concrete engineer construction at effect of temperature. Moscow: Stroizdat, 1984. 148 p. (in Russian)
 20. Fomin, S. L.; Ahmedov, A. A. Strinkage of heavy concrete under elevated temperature. In: *Concrete and reinforced concrete*, 1977, No. 4, pp. 30–31. (in Russian)
 21. Gorodetskii, A. S.; Evzerov, I. D. Computer model of constructions. Kyiv: Fact, 2005. 344 p. (in Russian)

- [Текст]. – [Введ. 01.07.1984]. – М. : Гос. комитет по стандартам СССР, 1983. – 48 с.
19. Кричевский, А. П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия [Текст] / А. П. Кричевский. – М. : Стройиздат, 1984. – 148 с.
 20. Фомин, С. Л. Усадка тяжелого бетона при повышенных температурах [Текст] / С. Л. Фомин, А. А. Ахмедов // Бетон и железобетон. 1977. № 4. С. 30–31.
 21. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзоров. – К. : Факт, 2005. – 344 с.

Корсун Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розробка методів розрахунку залізобетонних конструкцій для загального випадку об'ємного напруженого стану з урахуванням силових і температурно-вологісних впливів різної тривалості.

Калмыков Юрій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних конструкцій Донбаської національної академії будівництва та архітектури, гл. інженер СНВЦ «Спеціальні і висотні інженерні споруди». Наукові інтереси: удосконалення методів оцінки напружено-деформованого стану елементів залізобетонних конструкцій будівель і споруд, що працюють в умовах складних силових і температурно-вологісних впливів.

Макаренко Сергій Юрійович – асистент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження повзучості важкого бетону в умовах складних напружених станів.

Корсун Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: разработка методов расчета железобетонных конструкций для общего случая объемного напряженного состояния с учетом силовых и температурно-влажностных воздействий различной длительности.

Калмыков Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, гл. инженер СНПЦ «Специальные и высотные инженерные сооружения». Научные интересы: усовершенствование методов оценки напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях сложных силовых и температурно-влажностных воздействий.

Макаренко Сергей Юрьевич – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование ползучести тяжелого бетона в условиях сложных напряженных состояний.

Korsun Volodymyr – D.Sc. (Engineering), Professor, the Head of the Reinforced Concrete Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: development of analysis for general case of three dimensional stress reinforced concrete structures taking into account the temperature and moisture effects of different duration.

Kalmykov Yuriy – Ph.D. (Engineering), Associated Professor; Reinforced Concrete Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, chief engineer of the Center «Special and High Engineering Structures». Research interests: imperfection of the methods of estimating a stressed-deformed state of elements of reinforced frames of structures and buildings operating under complex force and temperature-humidity action.

Makarenko Sergey – assistant; Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: the study of heavy concrete creep under complex stress states.