

Шутова М.Н., Евтушенко С.И., Калафатов Д.А. Анализ эффективности применения конструкций двухслойных фундаментов портала ЛЭП на основе численного эксперимента // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 17–128. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01

Shutova M.N., Evtushenko S.I., Kalafatov D.A. Analysis of the efficiency of the application of two-layer foundation structures of the power line portal through a numerical experiment. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019. Vol. 10. No. 1. Pp. 17-28. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**
Т. 10, № 1, 2019
**PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.02

УДК 624.154.5

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ДВУХСЛОЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОРТАЛА ЛЭП НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

М.Н. Шутова¹, С.И. Евтушенко¹, Д.А. Калафатов²

¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

²Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 04 сентября 2018
Принята: 23 ноября 2018
Опубликована: 29 марта 2019

Ключевые слова:

конечно-элементная модель, ПК ANSYS, портал ЛЭП, модель фундамента, двухслойный фундамент, строительство в сейсмических районах.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вариантному проектированию конструкций сборных фундаментов портала ЛЭП в сейсмически опасном районе с расчетной сейсмичностью площадки 8 баллов. Рассмотрены три основных варианта устройства фундамента: монолитный фундамент из бетона класса В15, сборный фундамент по типовому решению согласно рабочей документации ЮЖЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ и двухслойная конструкция фундамента, состоящая из подошвы класса В15 и элементов с призматическим основанием класса В30. В результате проведенного моделирования с применением ПК ANSYS методом конечных элементов было определено напряженно-деформированное состояние на поверхности элементов модели. Рассмотрено 10 вариантов нагружений, несколько основных и одно особое сочетание усилий. Были определены максимальная осадка и разность осадок (второе предельное состояние), напряжения в бетоне и в сетках рабочего армирования (первое предельное состояние). Установлено, что максимальная осадка фундаментов рассмотренных вариантов значительно не отличается (в пределах 3 %), разность осадок отличается на 40 %. Напряжения в бетоне различаются на 17 %, но даже в худшем варианте составляют 41 % от расчетного сопротивления бетона на сжатие. Для каждого из вариантов фундаментов для особого сочетания усилий было подобрано сечение рабочей арматуры. В моделях были установлены две сетки по нижней подошве фундамента. Определено, что для рассмотренных моделей фундаментов оптимальными являются сетки с одинаковым шагом, но разного диаметра. Эффект от применения модели двухслойного фундамента с призматическим основанием класса В30 составляет 49 % по площади рабочего армирования, что позволяет сделать вывод об эффективности использования двухслойного фундамента при возведении порталов ЛЭП.

© ПНИПУ

© Шутова Марина Николаевна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: pretty_marry@mail.ru.
Евтушенко Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: evtushenko_s@novoch.ru.
Калафатов Джафер Аминьевич – ассистент, e-mail: jafer90@mail.ru.

Marina N. Shutova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pretty_marry@mail.ru.
Sergej I. Evtushenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: evtushenko_s@novoch.ru.
Djafer A. Kalafatov – Assistant, e-mail: jafer90@mail.ru.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF TWO-LAYER FOUNDATION STRUCTURES OF THE POWER LINE PORTAL THROUGH A NUMERICAL EXPERIMENT

M.N. Shutova¹, S.I. Evtushenko¹, D.A. Kalafatov²

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novotcherkassk, Russian Federation

²V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 04 September 2018

Accepted: 23 November 2018

Published: 29 March 2019

Keywords:

finite-element model, PC ANSYS, power line portal, foundation model, two-layer foundation, construction in seismic regions.

ABSTRACT

The article is devoted to variant design of the prefabricated building structures of the power transmission line portal in a seismically hazardous area with a calculated seismicity is 8 points. Three basic versions of the foundation are considered: a monolithic foundation of concrete of class B15, a prefabricated foundation according to a standard solution according to the working documentation of the YUZHENERGOSETPROEKT and a two-layer foundation construction consisting of a monolithic pillow of class B15 and elements with a prismatic base of class B30. As a result of the simulation by PC ANSYS, using finite element method to determine the stress-strain state on the surface of the model elements. 10 variants of loads have been considered, several basic and one particular combination of forces. Maximum sediment and sediment difference (the second limit state), stresses in concrete and in working reinforcement meshes (the first limit state) were determined. It was found that the maximum sedimentation of the foundations of the considered options is not significantly different (within 3 %), the difference in sediment differs by 40 %. Stresses in concrete differ by 17 %, but even in the worst case, 41 % of the calculated compressive strength of concrete. For each of the options for a special combination of efforts, the cross section of the working armature was selected. In the models, two grids were installed along the bottom of the basement. It is established that for the considered models of foundations, the grids with the same step, but of different diameters, are optimal. The effect from the application of the model of a two-layer foundation with a prismatic base of class B30 is 49 % in terms of the area of the working reinforcement, which makes it possible to draw a conclusion on the efficiency of using a two-layer foundation for the construction of power line portals.

© PNRPU

Введение

Исследование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций при помощи численного эксперимента является приоритетным направлением при определении их реальной несущей способности. Метод конечных элементов позволяет учитывать сложную геометрию и нелинейность материалов, представленных в модели оснований и фундаментов строительных объектов. Компьютерная симуляция гораздо экономичнее натурального эксперимента, сходимость результатов эксперимента и симуляции достаточна для многих инженерных задач.

Так, авторами статьи была выявлена сходимость менее 5 % результатов эксперимента (натурных испытаний) и симуляции при помощи ПК ANSYS для линейной модели металлической конструкции [1] и 6,1 % – для нелинейной модели фундамента на грунтовом основании [2].

При определении основных прочностных и эксплуатационных характеристик системы «основание – фундаменты» необходимо учитывать специфику грунтов (неоднородность, анизотропность и нелинейность свойств грунтов), а также некоторые особые нагрузки (сейсмические, пульсационные ветровые, динамические нагрузки от машин и механизмов). Эти задачи успешно решают при помощи симуляции в ПК ANSYS.

Авторами Д.Д. Ченгом, С.В. Абушараром и К.Ч. Вангом было проведено трехмерное нелинейное конечно-элементное моделирование фундамента на цементно-гравийных сваях [3]. При помощи ПК ANSYS были установлены зависимости между длиной и материалом свай, а также распределением нагрузки по кусту свай.

Особенности сейсмических нагрузок на строительные конструкции исследовали А. Байрактар, В. Севин, А.К. Альтунисик [4]. Установлена достаточная сходимость результатов натурного наблюдения и проведенного численного эксперимента, при том что разница в собственных частотах колебаний достигла 15 %.

При помощи МКЭ П. Джа и С. Кумаром была установлена взаимосвязь между НДС оснований существующих фундаментов глубоко заложения и НДС возводимых фундаментов мелкого заложения [5].

Китайскими учеными были воссозданы условия для расчета куста свай под толщей воды [6]. При помощи ПК ANSYS были определены частоты собственных колебаний свай и смоделировано влияние течения воды на свайно-групповой фундамент.

Моделирование оснований и фундаментов дамб в условиях сейсмических воздействий было проведено Б.А. Зайданом [7]. При этом материалы дамб и основания были представлены как линейные. Результаты показывают, что масса и гибкость фундамента оказывают наибольшее влияние на поведение дамб.

Индийские ученые провели динамический анализ свайного фундамента с опиранием на различные виды грунтов [8]. При помощи численного эксперимента была выбрана наиболее оптимальная форма фундамента при различных грунтовых условиях, с учетом сейсмических воздействий.

Влияние усталостной прочности на материал фундамента было проанализировано И. Унобе и А. Соренсенем [9] на примере конструкции фундамента под ветрогенератор. В качестве сочетания усилий было выбрано особое: знакопеременные воздействия ветра и сейсмическая нагрузка. При помощи симуляции в ANSYS было выявлено, что данное сочетание усилий является критическим для рассмотренной модели фундамента и значительно снижает его несущую способность.

В России тема моделирования грунтового основания при помощи МКЭ также нашла широкое применение. Коллектив авторов под руководством Н.Н. Некрасовой [10] проанализировал результаты математического моделирования фундаментных плит на упругом основании и данных, полученных на основе конечно-элементной компьютерной симуляции, установив, что предложенная модель адекватна и может быть использована для инженерных расчетов.

Влияние анизотропии свойств грунта на НДС было рассмотрено в работе [11]. При моделировании свойств материалов в ПК ANSYS был учтен коэффициент, зависящий от степени анизотропии грунтового основания и геометрических размеров фундамента.

Расчет НДС регулируемого фундамента выполнен А.Б. Пономаревым и Е.Н. Сычкиной [12]. Двухэтапный анализ (моделирование при равномерной нагрузке на балку и моделирование при подъеме краевой части балки домкратом) показал, что результаты численного метода хорошо согласуются с тестами.

А.И. Ивашкиным были применены билинейные модели материала для получения достоверных результатов [13].

Е.В. Марковой, О.В. Чегуа [14] была оценена конструкционная прочность изделий и конструкций при помощи геометрического моделирования и прямой генерации узлов и элементов.

М.Л. Иванов, А.А. Добрынин [15] также применили математическую модель МКЭ для прочностного анализа пространственной системы «здание – фундамент – основание».

Основная часть

Для верификации ПК ANSYS в расчетах моделей с нелинейными свойствами был проведен расчет контактных напряжений в моделях двухслойных и монолитных фундаментов, подробно рассмотренных в работе [2]. Модель и результаты расчета представлены на рис. 1.

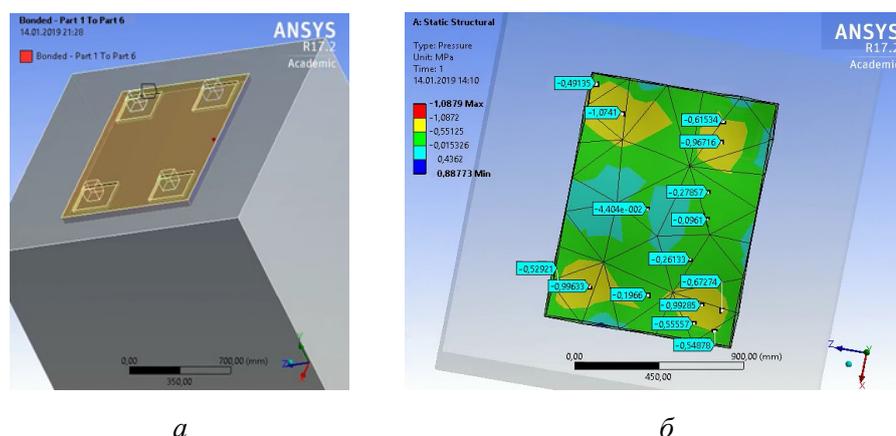


Рис. 1. Вычисление контактных напряжений двухслойного фундамента:
a – конечно-элементная модель фундамента; *б* – контактные напряжения, МПа
 Fig. 1. Calculation of contact tension of the two-layer foundation:
a – FEM of the foundation; *b* – contact stresses, MPa

По результатам проведенного натурного и численного эксперимента была определена сходимость результатов для разных величин нагрузки (рис. 2). Установлено, что с повышением нагрузки разница в результатах увеличивается.



Рис. 2. Относительная разница между результатами опыта и эксперимента для модели монолитного фундамента (ФПс1_1) и для модели двухслойного фундамента (ФПс 1_2)
 Fig. 2. The relative difference between results of experience and experiment for model of the monolithic foundation (FPs1_1) and for model of the two-layer foundation (FPs 1_2)

Для расчета эффективности применения двухслойных фундаментов был принят в качестве прототипа проект под линию портала 500 кВт, выполненный ЮЖЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ. Объект находится в Темрюкском районе Краснодарского края, сейсмичность площадки строительства составляет 8 баллов.

Уровень ответственности сооружений открытого распределительного устройства (ОРУ) – повышенный.

Грунтами основания служат суглинки легкие пылеватые твердой консистенции, незасолненные, которые характеризуются следующими нормативными физико-механическими показателями: $\gamma = 1,71 \text{ г/см}^3$, $c = 0,016 \text{ МПа}$, $\varphi = 17,0^\circ$, $E = 17,9 \text{ МПа}$. Суглинки залегают до глубины 5,6 м. Грунтовые воды залегают на глубинах 10,5–12,5 м.

Расчет металлоконструкций портала типа ПС-220Я2 выполнен специалистами ЮЖЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ. Трехмерная схема для расчета в StructureCad представлена на рис. 3.

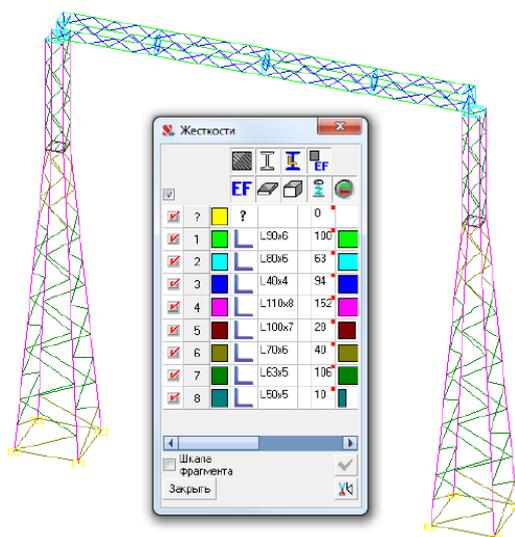


Рис. 3. Трехмерная и расчетная схема для расчета в StructureCad
Fig. 3. 3D modeling to calculate using StructureCad

Расчет был проведен по следующим нагрузкам: собственный вес, ветер по оси x , ветер по оси y , тяжение без учета гололеда, тяжение с учетом гололеда, масса монтера, пульсации ветра по x , пульсации ветра по y , сеймика по x , сеймика по y .

В результате проведенного расчета конструкций надземной части было установлено, что металлоконструкции опор удовлетворяют требованиям по первой и второй группе предельных состояний при основном и особом сочетании нагрузок.

На уровне крепления конструкции к фундаменту были получены значения нагрузок на фундаменты при особом сочетании усилий: $N = 2,56 \text{ тс}$, $M_y = 4,35 \text{ тс}\cdot\text{м}$, $M_x = 66,8 \text{ тс}\cdot\text{м}$, $Q_x = 0,33 \text{ тс}$, $Q_y = 4,73 \text{ тс}$.

Рассмотрены следующие варианты расчетных моделей:

Вариант 1. Монолитный фундамент из бетона класса В15 (рис. 4).

Вариант 2. Сборный фундамент согласно рабочей документации ЮЖЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ по «Серии 3.407-115. “Унифицированные фундаментные конструкции ВЛ 35-500 кВ”. Выпуск 2» (рис. 5, 6).

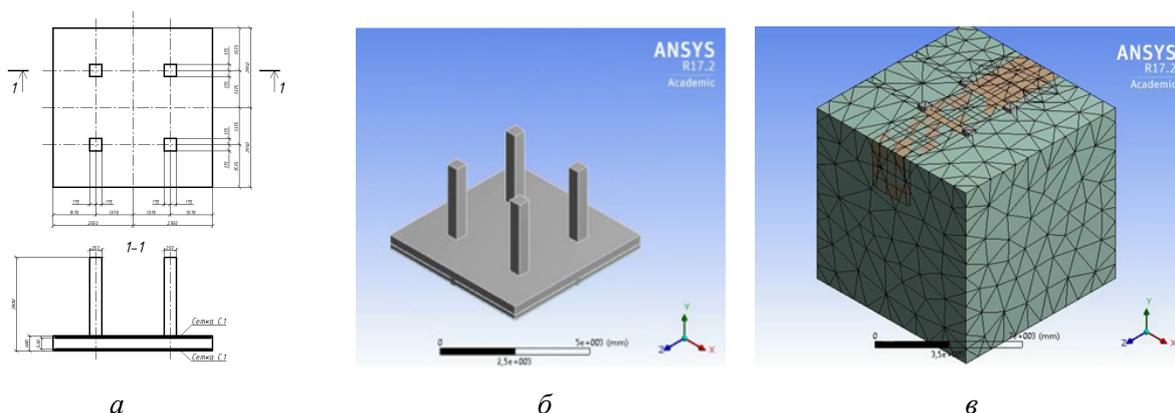


Рис. 4. Монолитный фундамент под опору ЛЭП: *a* – геометрические размеры фундамента; *б* – трехмерная модель фундамента; *в* – трехмерная модель фундамента с грунтовым основанием
Fig. 4. Monolithic foundation for power line construction: *a* – geometry of foundation; *b* – 3-D foundations model; *c* – 3-D foundation model including a ground solid

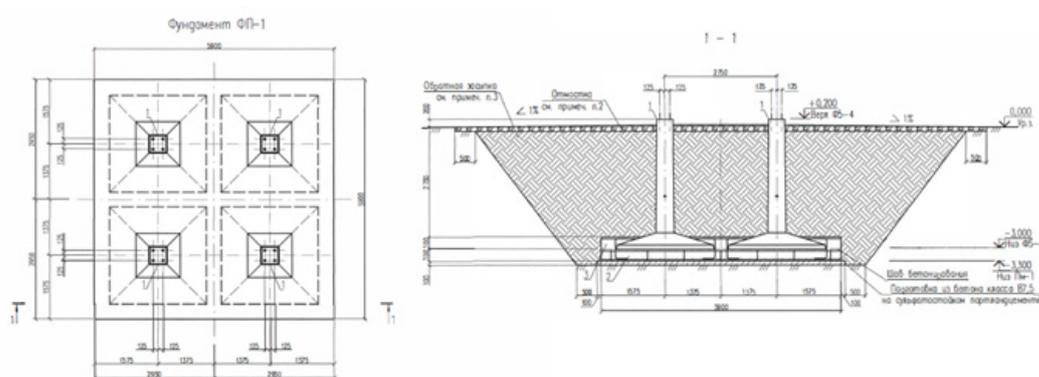


Рис. 5. Геометрические размеры сборного фундамента по проекту ЮЖЭНЕРГОСЕТЫПРОЕКТ
Fig. 5. Geometry of composite foundation by UZHENERGOSETPROEKT

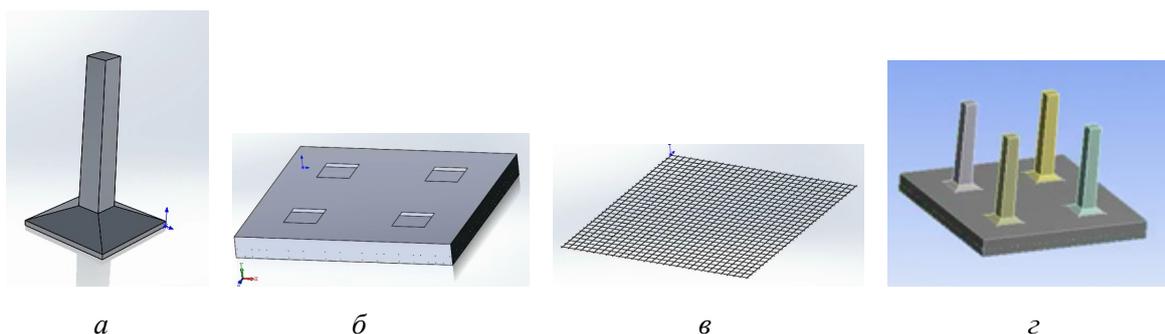


Рис. 6. Конечно-элементная модель сборного фундамента по проекту ЮЖЭНЕРГОСЕТЫПРОЕКТ: *a* – модель фундамента сборного Ф5-4 из бетона класса В30; *б* – модель фундамента монолитного плитного из бетона класса В20; *в* – сетка арматурная $\varnothing 12$ А-400, шаг 100 мм; *г* – модель составного фундамента

Fig. 6. Finite-element model composite foundation by UZHENERGOSETPROEKT: *a* – foundation model F5-4 from concrete B30; *b* – monolithic foundation model of plate from concrete B20; *c* – mesh reinforcement $\varnothing 12$ A-400; *d* – composite foundation model

Вариант 3. Составной фундамент, выполненный по патенту МПК E02D27/01 [16] (рис. 7).

При моделировании инженерных данных геомеханических систем в программном комплексе ANSYS 17.2 была выбрана модель Друкера – Прагера (Drucker-Prager), определяющая поведение или разрушение некоторых материалов под влиянием пластической деформации.

В ПК ANSYS исходными данными для моделирования оснований являются:

- одноосная прочность на сжатие (Uniaxial compressive strength);
- одноосная прочность на растяжение (Uniaxial tensile strength);
- двуосная прочность на сжатие (Biaxial compressive strength).

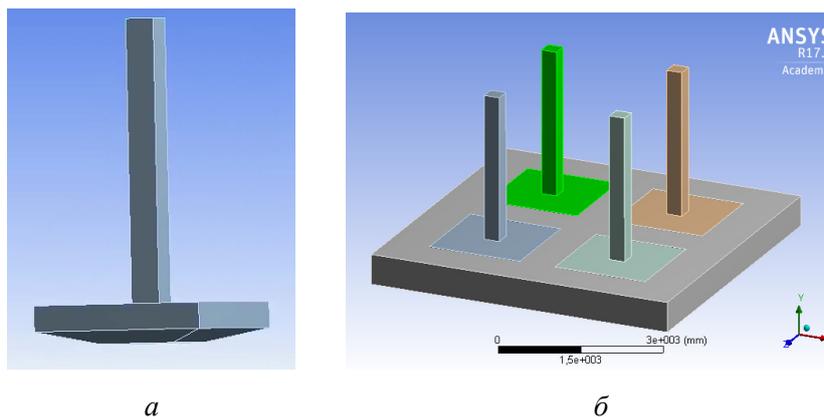


Рис. 7. Модель двухслойного фундамента: *a* – модель фундамента сборного по патенту МПК E02D27/01 [16] с трапециевидной формой основания из бетона В30; *б* – двухслойная сборная модель фундамента (сетки армирования располагаются аналогично модели 2)

Fig. 7. Two-layer foundation model: *a* – foundation model by patent МПК E02D27/01 [16] with a trapezoid form of the basis from concrete В30; *b* – two-layer composite model (mesh reinforcement as in the model 2)

Расчет НДС конструкции был выполнен в программе ANSYS 17.2.

Нагрузка в модели передается в качестве давления (опция *Pressure*) и изгибающего момента (*Moment*) на оголовки колонн. Для расчета МКЭ массив грунта закрепляется по внешним граням (опция *Fixed Support*)

Целью расчета является определение следующих параметров железобетонной конструкции:

1. Осадка фундамента (предельно допустимая осадка согласно п. 7 табл. Г.1 по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.01–83*» составляет 10 см).

2. Разность осадок фундамента $\Delta S/l$ (предельно допустимая разность осадок согласно п. 78 табл. Г.1 СП 22.13330.2011 составляет **0,003**).

Напряжения в бетоне конструкций (согласно табл. 6.8 СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01–2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

3. Расчетные сопротивления бетона на сжатие равны 8,5 и 17,0 МПа для бетонов класса В15 и В30 соответственно, расчетные сопротивления бетона на растяжения равны 0,75 и 1,15 МПа для бетонов класса В15 и В30 соответственно.

4. Напряжения в арматурных сетках (согласно табл. 6.14 СП 63.13330.2012 расчетное сопротивление арматуры класса А400 на сжатие и растяжение равно 350 МПа).

Эпюры перемещений в плите от особого сочетания нагрузок во всех вариантах исполнения фундамента приведены на рис. 8.

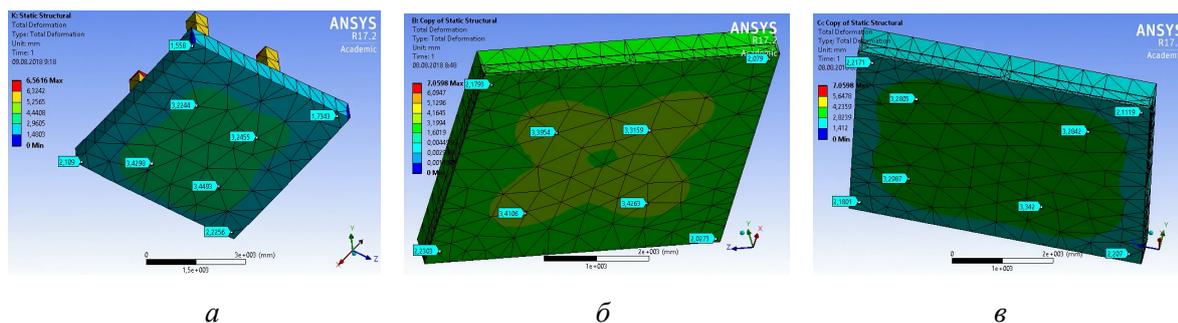


Рис. 8. Эпюры перемещений по вертикальной оси: *a* – для монолитного фундамента; *b* – для сборного фундамента, вариант 2; *c* – для двухслойного фундамента, вариант 3
Fig. 8. Diagram of movements on a vertical axis: *a* – for the monolithic foundation; *b* – for the composite foundation, model 2; *c* – for the two-layer base option 3

Напряжения в плитной части для разных типов конструкции показаны на рис. 9.

В представленных конструкциях проектом предусмотрено две сетки в плитной части, а также хомуты и каркасы, распределительная и конструктивная арматура для фиксации сеток и сборных частей фундамента. В расчете учитывалась только рабочая арматура – верхние и нижние сетки плиты.

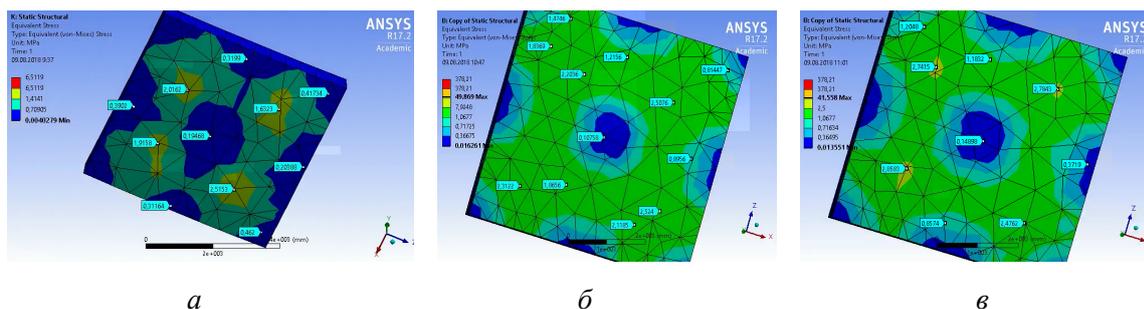


Рис. 9. Напряжения в плитной части фундамента: *a* – монолитного, модель 1; *b* – сборного, модель 2; *c* – двухслойного, модель 3
Fig. 9. Von-Misses stress in the plate part of foundation: *a* – monolithic, model 1; *b* – composite, model 2; *c* – two-layer, model 3

Верхнее армирование плиты по результатам расчета не воспринимает основные растягивающие напряжения, поэтому может быть задано конструктивно. С учетом минимального процента армирования фундаментов (0,1 %) от площади сечения по высоте промежутка между слоями арматуры и ширины ленты (п. 3.104 Руководства по конструированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения)), в качестве верхних сеток плитного сборного фундамента могут быть приняты сетки $\varnothing 8$ A400 с шагом 200 мм (площадь поперечного сечения сетки на 1 метр погонной длины – $2,51 \text{ см}^2$, минимальная требуемая площадь: $100 \cdot 22 \cdot 0,1 : 100 = 2,2 \text{ см}^2$).

В качестве верхней сетки монолитного фундамента могут быть приняты сетки $\varnothing 12$ A-400 с шагом 200 мм (площадь поперечного сечения сетки на 1 метр погонной длины – $5,65 \text{ см}^2$, минимальная требуемая площадь: $100 \cdot 52 \cdot 0,1 : 100 = 5,2 \text{ см}^2$).

Расчет напряжений армирования (нижней сетки) был проведен в несколько этапов, с учетом подбора диаметра стержней сетки для каждого из вариантов. Низменные параметры: шаг сетки – 200 мм, геометрические размеры сетки $5,8 \times 5,8$ м, класс арматуры A400. Максимальное напряжение в сетке не должно превышать 350 МПа.

В результате расчета установлено, что для армирования нижней сетки при особом сочетании усилий (с учетом сейсмического воздействия 8 баллов):

- для монолитного фундамента (вариант 1) достаточной является сетка $\varnothing 14$ мм (напряжения составляют 336,12 МПа, рис. 10, а);
- для сборного двухслойного фундамента ЮЖЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ (вариант 2) достаточной является сетка $\varnothing 12$ мм (напряжения составляют 315,09 МПа, рис. 10, б);
- для сборного двухслойного фундамента по аналогии с фундаментом ФПс 2–3 (вариант 3) достаточной является сетка $\varnothing 10$ мм (напряжения составляют 349,7 МПа, рис. 10, в).

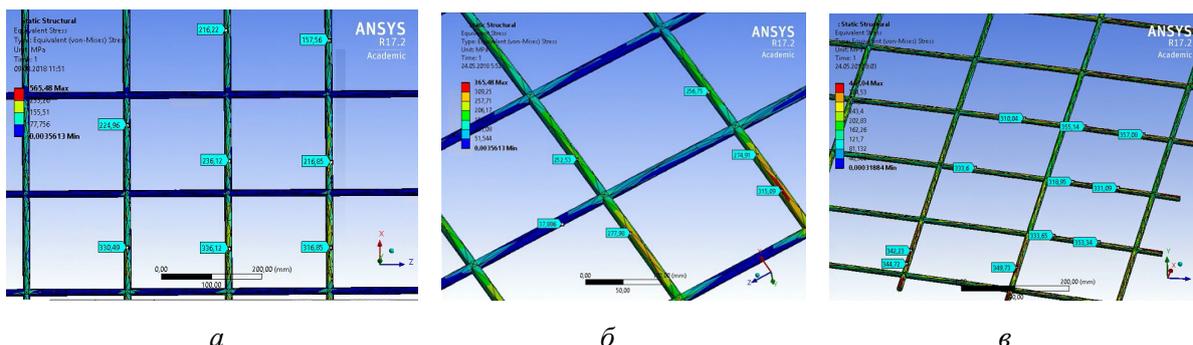


Рис. 10. Эквивалентные напряжения от особого сочетания усилий в арматурной сетке:
а – монолитного фундамента, модель 1; б – сборного, модель 2; в – двухслойного, модель 3
Fig. 10. Equivalent stresses in mesh reinforcement from a special combination of loadings:
a – monolithic, model 1; b – composite, model 2; c – two-layer, model 3

Результаты проведенного расчета сведены в таблицу.

В результате проведенного численного эксперимента была доказана эффективность применения двухслойных фундаментов под опоры портала ЛЭП с учетом особого сочетания усилий, обусловленная значительной экономической выгодой (до 49 %) при армировании сеток монолитной плиты двухслойного фундамента.

Результаты расчета эффективности двухслойных фундаментов Calculations results of two-layer foundation efficiency

Параметр, ед. изм.	Модель фундамента опоры ЛЭП			Предельно допустимое значение параметра
	вариант 1	вариант 2	вариант 3	
Осадка, мм	3,45	3,43	3,34	100
Разность осадок	0,0012	0,00093	0,0073	0,003
Напряжения в бетоне, МПа	3,44	3,19	2,85	Вариант 1 – 8,5 Варианты 2, 3 – 17,0
Напряжения в арматуре, МПа	336,12	315,09	349,73	350
Верхняя арматурная сетка, сечение и площадь	$\varnothing 12$ А-400 $S = 5,65 \text{ см}^2$	$\varnothing 8$ А-400 $S = 2,51 \text{ см}^2$	$\varnothing 8$ А-400 $S = 2,51 \text{ см}^2$	
Нижняя арматурная сетка, сечение и площадь	$\varnothing 14$ А-400 $S = 7,69 \text{ см}^2$	$\varnothing 12$ А-400 $S = 5,65 \text{ см}^2$	$\varnothing 10$ А-400 $S = 3,93 \text{ см}^2$	
Экономия армирования (по нижней сетке)	0 %	26 %	49 % (по сравнению с вариантом 1) 30 % (по сравнению с вариантом 2)	

Заключение

Эффективность применения конструкций двухслойных фундаментов оценивалась по основным требованиям по первой и второй группе предельных состояний. По второй группе предельных состояний (максимальная осадка и разность осадок) существенной разницы в результатах между тремя видами моделей зафиксировано не было. При анализе напряжений в рабочей арматуре нижней сетки было подобрано оптимальное сечение для каждой модели при особом сочетании усилий. Эффективность применения двухслойного фундамента по сравнению с монолитным составила 49 % по части экономии рабочей арматуры.

Библиографический список

1. The comparative analysis of different computations methods of strength of materials by the example of calculations of the axle beam / S.I. Evtushenko, I.A. Petrov, M.N. Shutova, A.S. Alekseeva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 177. – 012023.
2. Евтушенко С.И., Шутова М.Н., Калафатов Д.А. Анализ сходимости результатов опытов и результатов расчета МКЭ на примере конструкций плитного фундамента // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – № 53 (72). – С. 15–24.
3. Jun-Jie Zheng, Sari W. Abusharar, Xian-Zhi Wang Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG-lime piles // Computers and Geotechnics. – 2008. – Vol. 35, iss. 4. – P. 637–643.
4. Alemdar Bayraktara, Barış Sevimab, Ahmet Can Altunişiká Finite element model updating effects on nonlinear seismic response of arch dam–reservoir–foundation systems // Finite Elements in Analysis and Design. – 2011. – Vol. 47, iss. 2. – P. 85–97.
5. Jha P., Kumar S. Simplified approach to estimate lateral load on drilled shafts resulting from a heavily loaded adjacent shallow foundation using horizontal stress isobars // International Journal of Geomechanics. – 2016. – Vol. 16, iss. 1. DOI: doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000521
6. Modal analysis for deep water pile-group foundation under the effect of fluid structure interaction / G. Ying, W. Xvtao, F. Shisheng, W. Wenyang // Chinese Journal of Applied Mechanics. – 2015. – Vol. 5.
7. Bakenaz A. Zeidan Seismic finite element analysis of dam-reservoir foundation interaction // International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering, 6–9 April 2015. – Hurghada, Egypt, 2015.
8. Chourasia J., Pendharkar U., Singh R. Dynamic analysis of pile foundation with footing in different foundation soils // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2018. – Vol. 5, iss. 1.
9. Unobe I.D., Sorensen A.D. Multi-hazard analysis of a wind turbine concrete foundation under wind fatigue and seismic loadings // Structural Safety. – 2015. – Vol. 57. – P. 26–34.
10. Некрасова Н.Н., Бурковский В.Л., Флавианов В.М. Анализ адекватности математической модели изгиба фундаментных плит на основе инструментальной системы ANSYS // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 6. – С. 15–17.
11. Нуждин Л.В., Павлюк К.В. Учет влияния деформационной анизотропии грунта при расчете осадок фундаментов // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 6. – С. 101–112.

12. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния регулируемого фундамента и грунтового основания в программном комплексе ANSYS WORKBENCH // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 4. – С. 76–89. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.06

13. Ивашкин А.И. Анализ деформационного поведения моделей материалов в ANSYS // Математические методы и модели: теория, приложения и роль в образовании. – 2014. – № 3. – С. 79–92.

14. Маркова Е.В., Чечуга Е.В. Использование программы ANSYS для анализа работоспособности конструкций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8. – С. 45–54.

15. Иванов М.Л., Добрынин А.А. Разработка и численная реализация математической модели пространственной системы «здание – фундамент – основание» // Интеллектуальные системы в производстве. – 2001. – № 1. – С. 24–35.

16. Плитный фундамент каркасного здания: пат. Рос. Федерация, МПК E02D27/01 / Калафатов Д.А. – № 167172; заявл. 22.04.2016; опубл. 27.12.2016. Бюл. № 36. – 2 с.

References

1. Evtushenko, S.I., Petrov, I.A., Shutova, M.N., Alekseeva, A.S. The comparative analysis of different computations methods of strength of materials by the example of calculations of the axle beam. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, no. 177, 012023.

2. Evtushenko, S.I., Shutova, M.N. Kalafatov D.A. Analiz skhodimosti rezultatov opytov i rezultatov rascheta MKE na primere konstruktsiy plitnogo fundamenta [Analysis of the convergence of the results of experiments and the calculation of FEM on the example of slab foundation structures]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitecturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitelstvo i arhitektura*, 2018, no. 53 (72), pp. 15–24.

3. Jun-Jie Zheng, Sari W. Abusharar, Xian-Zhi Wang Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG–lime piles. *Computers and Geotechnics*, 2008, vol. 35, iss. 4, pp. 637–643.

4. Alemdar Bayraktara, Barış Sevimab, Ahmet Can Altunişikika Finite element model updating effects on nonlinear seismic response of arch dam–reservoir–foundation systems. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, vol. 47, iss. 2, pp. 85–97.

5. Jha P., Kumar S. Simplified approach to estimate lateral load on drilled shafts resulting from a heavily loaded adjacent shallow foundation using horizontal stress isobars. *International Journal of Geomechanics*, 2016, vol. 16, iss. 1. Doi.Org/10.1061/ (Asce) Gm.1943-5622.0000521

6. Ying G., Xvtao W., Shisheng F., Wenyang W. Modal analysis for deep water pile-group foundation under the effect of fluid structure interaction. *Chinese journal of applied mechanics*, 2015, vol. 5.

7. Bakenaz A. Zeidan Seismic finite element analysis of dam-reservoir foundation interaction. *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering*, 6–9 April 2015, Hurghada, Egypt.

8. Chourasia J., Pendharkar U., Singh R. Dynamic analysis of pile foundation with footing in different foundation soils. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2018, vol. 5, iss. 1, p-ISSN: 2395-0072.

9. Unobe I.D., Sorensen A.D. Multi-hazard analysis of a wind turbine concrete foundation under wind fatigue and seismic loadings. *Structural Safety*, 2015, vol. 57, pp. 26–34.
10. Nekrasova N.N., Burkovskij V.L., Flavisnov V.M. Analiz adekvatnosti matematicheskoi modeli izgiba fundamentnyh plit na osnove instrumentalnoi sistemy ANSYS [Analysis of the adequacy of the mathematical model of bending of foundation slabs based on the ANSYS tool system]. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2010, no. 6, pp. 15–17.
11. Nuzhdin L.V., Pavluk K.V. Uchet vliyaniya deformacionnoi anizotropii grunta pri raschete osadok fundamentov [Taking into account the influence of soil deformation anisotropy in the calculation of foundation settlement]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, 2017, no. 6. pp. 101–112.
12. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Rezultaty modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya reguliruemogo fundamenta i gruntovogo osnovaniya v programmnom komplekse ANSYS WORKBENCH [The results of modeling stress-strain state of the adjustable foundation and soil base in the software package ANSYS WORKBENCH]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 4, pp. 76–89. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.06.
13. Ivashkin A.I. Analys deformacionnogo povedeniya modelei materialov v ANSYS [Analysis of deformation behavior of material models in ANSYS]. *Matematicheskie metody i modeli: teoriya, prilozheniya i rol v obrazovanii*, 2014, no. 3, pp. 79–92.
14. Markova E.V., Chegua E.V. Ispolsovanie programmy ANSYS dlya analiza rabotosopnosti konstrukzii [The use of ANSYS software to analyze the health of structures]. *Isvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2016, no. 8, pp. 45–54.
15. Ivanov M.L., Dobrynin A.A. Rasrabotka i chislennaya realizaziya matematicheskoi modeli prostranstvennoi sistemy "zdaniya-fundament-osnovaniya" [Development and numerical implementation of the mathematical model of the spatial system " building-foundation-foundation"]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2001, no. 1, pp. 24–35.
16. Kalafatov D.A. Plitny fundament karkasnogo zdaniya [Slab foundation of frame building]. Patent Rossiiskaia Federaziia no. 167172 (2016).