

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ОСНОВАНИЯ**

*Ю. А. Кожанов, к. т. н., доц., А. Г. Ефименко, студ., В. А. Загильский, студ.,
А. П. Якубенко, студ.*

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, конечноэлементная модель, объемные КЭ, коэффициенты постели, SCAD 11.5

Постановка проблемы. В современном проектировании встречаются случаи моделирования надземной части конструкции без учета реальных геологических условий. Вводится допущение, что основание является абсолютно жестким. Это упрощение обусловлено простотой реализации основания в расчетных комплексах. Но такой подход влечет за собой ряд ошибочных результатов, так как характер поведения конструкции на жестком основании и с учетом геологических особенностей основания существенно отличается.

Цель статьи. Путем варьирования способов учета основания в расчетном комплексе Structure CAD 11.5 оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) железобетонной конструкции Узла бора Южно-Украинской АЭС.

Анализ публикаций. В последнее время проблеме учета основания в компьютерном моделировании конструкций уделяется значительное влияние. Анализ НДС железобетонных конструкций в системе «сооружение – основание» вызывает большой интерес среди отечественных и зарубежных специалистов. Этой теме посвящено большое количество публикаций, научных работ и литературных источников [1; 5; 7].

Изложение материала. Создание наиболее точной расчетной модели, в частности, с учетом основания, является первоочередным фактором, влияющим на адекватность полученных результатов. Для зданий и сооружений АЭС учет основания имеет особое значение, ввиду высокой степени их ответственности. В соответствии с [6], расчетные модели зданий и сооружений должны наиболее точно отражать характер их взаимодействия с грунтом основания. Модели оснований зданий и сооружений разрабатываются с учетом особенностей массива грунта (его слоистости, толщины и физико-механических свойств). Эффектом от учета грунтового основания целесообразно пренебречь в случае если конструкция расположена на скальном основании и имеет небольшую массу. Однако для конструкций, расположенных на слабом основании, тяжелых конструкций, высотных зданий и зданий повышенной категории ответственности учет основания необходим [7].

В практике проектирования часто применяются упрощенные модели основания. Самой простой является одноконстантная модель Винклера. В этой модели осадка точки основания пропорциональна давлению в этой точке. Коэффициент постели характеризует жесткость пружинки, установленной в каждом узле фундаментной плиты. При расчете плит основания пружинки распределяются равномерно по площади плиты. Деформации пружинки происходят независимо друг от друга, следовательно, модель не учитывает распределительную способность грунта. Для исправления недостатков простейшей модели Винклера было разработано множество ее модификаций – с двумя или тремя коэффициентами постели. В отечественной практике наиболее распространена модель Пастернака с двумя коэффициентами постели. [4]. Однако в современных расчетных комплексах имеет место также моделирование основания объемными конечными элементами. В настоящее время возможности вычислительных комплексов позволяют это сделать. При таком подходе нет необходимости использовать коэффициенты постели.

Анализ напряженно-деформированного состояния системы сооружение – основание выполнялся методом конечных элементов в проектно-вычислительном комплексе Structure CAD 11.5 для одного температурного блока здания бора.

Анализировались три конечноэлементные модели здания Узла бора:

- модель на жестком основании;
- модель на упругом основании (с использованием коэффициентов постели, C_1 и C_2);
- модель на упругом основании (с использованием объемных конечных элементов).

Модель на жестком основании (рис.1). В расчетном комплексе Structure CAD 11.5 жесткое основание было реализовано за счет запрета перемещений и поворотов относительно осей X , Y и Z узлов фундаментной плиты.

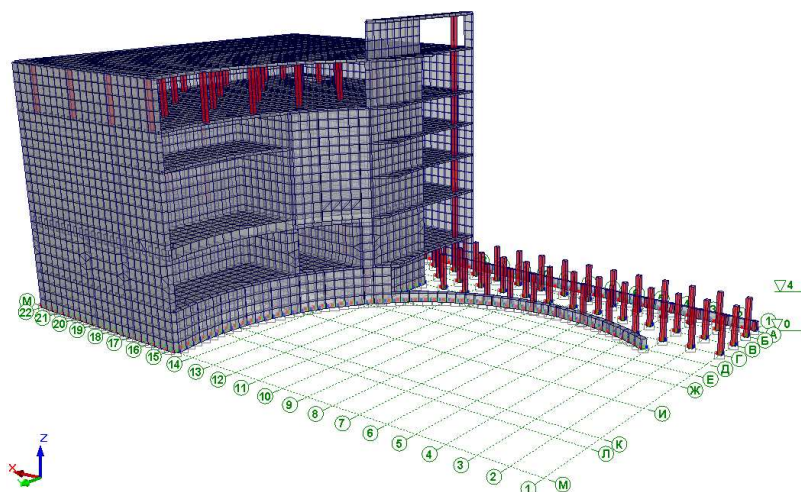


Рис. 1. Модель на жестком основании

Модель на упругом основании (с использованием коэффициентов постели, C_1 и C_2 , модель Пастернака) (рис. 2). В данной модели на основании геологических данных, приведенных в таблице 1, были рассчитаны коэффициенты постели C_1 и C_2 (C_1 – коэффициент сжатия, измеряемый в $\text{кг}/\text{см}^3$ или $\text{т}/\text{м}^3$, связывающий интенсивность вертикального отпора грунта с его осадкой);

Таблица 1

Характеристики грунтов основания здания Узла бора

№ ИГЭ	Инженерно-геологический элемент (ИГЭ)	Характеристики			
		Толщина, (м)	Коэффициент Пуассона, ν	Модуль деформации E , (МПа)	
1	Глины	2	0.37	23	
2	Неогеновые отложения сарматского яруса – глины с линзами разномерных песков	2	0.45	18	
3	Элювиальные грунты, продукты выветривания гранитов – каолины и дресва	Каолин	6	0.27	40
		Гранит	–	–	–

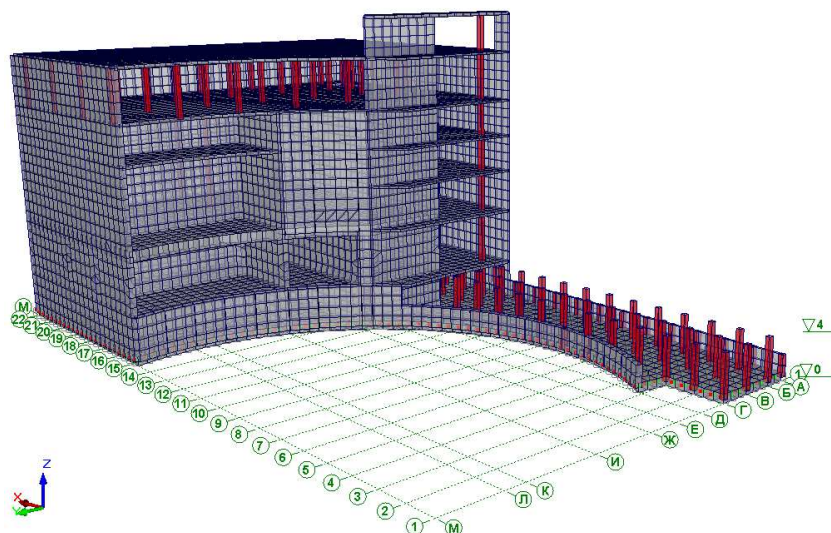


Рис. 2. Модель на упругом основании (с использованием коэффициентов постели C_1 и C_2)

C_2 – коэффициент сдвига, измеряемый в кг/см или т/м, дает возможность выразить интенсивность вертикальной силы сдвига) [4].

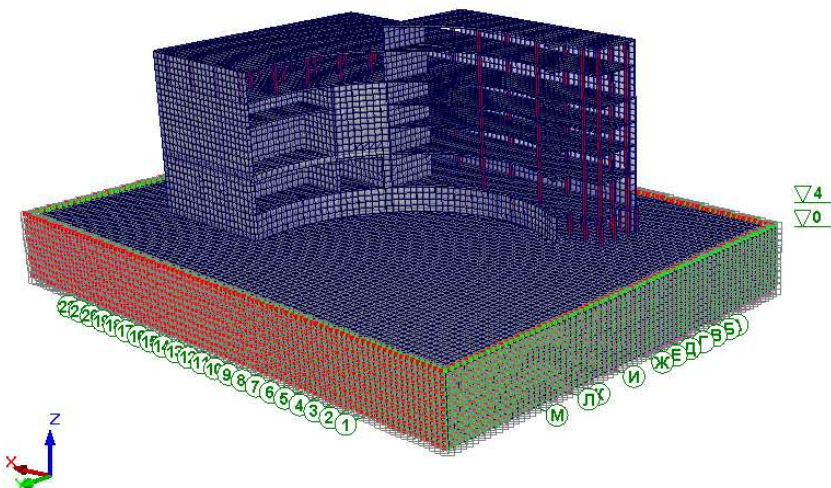


Рис. 3. Модель на упругом основании (с использованием объемных $KЭ$)

Модель на упругом основании (с использованием объемных конечных элементов) (рис. 3). В этой модели грунтовое основание создано по схеме линейно-деформируемого слоя конечной толщины [2]. Суть модели заключается во введении в схему лишь верхних сжимаемых слоев, ниже которых грунт считается несжимаемым. В данном анализе такая схема имеет место, т. к. согласно геологическим данным на отметке -10 м залегает гранит.

В связи с тем, что в рамках проводимого анализа больший интерес вызывает НДС конструкций, а не распределение напряжений в упругом слое грунта основания, возникает необходимость ограничивать размеры слоя в плане, пренебрегая работой той части упругого основания, которая находится на достаточном удалении от края конструкции. Существует эмпирическое правило, которое говорит о том, что достаточно включить в расчетную схему упругий слой, находящийся с каждой стороны от края конструкции на расстоянии $L = H \dots 1,5 H$, где H – высота сжимаемой толщи [5].

Статический расчет модели был выполнен в линейной постановке. Теоретической основой расчетного комплекса SCAD 11.5 является метод конечных элементов в форме метода перемещений [5]. В результате расчета были получены следующие параметры: перемещения, усилия, напряжения.

При анализе результатов расчета была выявлена наиболее неблагоприятная комбинация нагрузок, в которую вошли: постоянные нагрузки, нагрузки от резервуаров, наполненных борным раствором, ветровая, снеговая и эксплуатационная нагрузки. Вероятность

одновременного действия нагрузок была учтена коэффициентами сочетаний [3]. Экстремальные значения параметров, полученных с учетом данной комбинации, приведены в табличной форме.

Таблица 2

Абсолютные значения перемещений в узлах

Фактор	Тип основания			№ узла
	Жесткое	Упругое, С1, С2	Упругое, объемные КЭ	
X, мм	3.541	4.489	8.63	6 088
Y, мм	3.859	5.498	8.97	11 576
Z, мм	46.263	50.98	79,639	8 889
Ux, рад	8.699	8.647	9.543	8 567
Uy, рад	6.383	6.231	7.416	5 556
Uz,рад	0.217	0.213	0.233	11 320

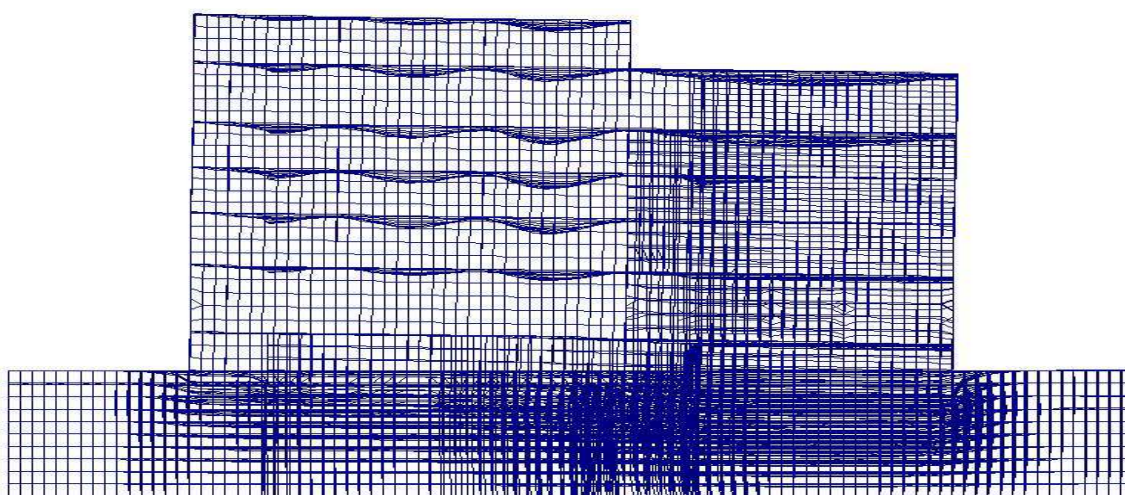


Рис. 4. Деформированная схема конструкции на основании из объемных КЭ

Величины экстремальных перемещений узлов конструкции (табл. 2), полученные по трем вышеописанным моделям, находятся в пределах 40 – 80 мм. Очевидно, что минимальные перемещения наблюдаются в модели с жестким основанием. Увеличение перемещений происходит с включением в модель упругого основания. Значения перемещений в модели с жестким основанием и моделью Пастернака имеют приблизительно одинаковый порядок. Однако в модели с основанием из объемных конечных элементов величины перемещений резко возрастают. Следовательно, основание из объемных конечных элементов имеет большую податливость. Несмотря на трудоемкость моделирования, по сравнению с моделью Пастернака, модель основания из объемных КЭ позволяет более наглядно определить поведение конструкции с учетом заданных геологических условий (рис. 4).

Значения экстремальных усилий в колоннах конструкции (табл. 3), в зависимости от модели основания, практически не отличаются (~1 – 2 %). Таким образом, учет основания не оказывает значительного влияния на продольные силы, изгибающие моменты и поперечные силы, возникающие в сечениях элементов конструкции.

Абсолютные значения усилий в колоннах

Фактор	Тип основания			№ элемента
	Жесткое	Упругое, С1, С2	Упругое, объемные КЭ	
N, т	304.685	305.947	303.58	9 811
My, тм	53.185	52.062	52.571	9 798
Qz, т	21.535	21.059	21.275	9 801
Mz, тм	77.703	77.222	77.231	9 804
Qu, т	27.83	27.672	27.67	9 809

Анализ экстремальных значений напряжений (табл. 4), полученных в результате расчета, показал, что при переходе от жесткого основания к упругому происходит значительное возрастание напряжений (~60 %). Это объясняется тем, что при учете основания в элементах конструкции возникают дополнительные напряжения от неравномерной осадки здания. Происходит перераспределение напряжений. Для модели на жестком основании возникновение этих напряжений исключено.

В случае моделирования основания посредством коэффициентов постели и объемными конечными элементами возникает дополнительный фактор R_z , который характеризует реактивный отпор грунтового основания. Для основания с коэффициентами постели $R_z = 23.883$ (т/м²), а для основания из объемных конечных элементов $R_z = 37.276$ (т/м²).

Для определения адекватности того или иного способа учета основания в расчетном комплексе SCAD 11.5 необходимы экспериментальные данные о деформациях грунтового основания.

Таблица 4

Абсолютные значения напряжений в пластинчатых конечных элементах

Фактор	Тип основания			№ элемента
	Жесткое	Упругое, С1, С2	Упругое, объемные КЭ	
NX, т/м ²	288.016	327.681	372.847	9 709
NY, т/м ²	286.714	326.08	374.159	7 509
MX, тм/м	46.77	60.322	58.479	4 529
MY, тм/м	47.315	66.422	65.344	4 542
QX, т/м	126.464	124.434	125.146	4 483
QY, т/м	73.236	76.871	86.474	4 496

Выводы. Сравнение результатов статического расчета здания Узла бора показало, что учет геологических особенностей основания является определяющим фактором при анализе НДС конструкции. Особое влияние этот фактор оказывает на перемещения узлов конструкции и напряжения в конструктивных элементах.

Анализируя способы учета основания, можно сделать вывод, что модель с использованием коэффициентов постели отличается простотой реализации, в то время как модель конструкции с основанием из объемных конечных элементов более трудоемка, но позволяет посредством деформированных схем с определенной точностью спрогнозировать поведение конструкции в реальных геологических условиях с заданными нагрузками.

Следовательно, учет основания при моделировании железобетонных конструкций имеет место быть и является важнейшим фактором, влияющим на НДС конструкции.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К. : Факт, 2005. – 344 с.

2. **Герсеванов Н. М.** Основы динамики грунтовой массы / Н. М. Герсеванов. – М., изд. 1931. – 504 с.
3. ДБН В.1.2.-2:2006. Нагрузки и воздействия. – К. : Минстрой Украины, 2006. – 78 с.
4. **Пастернак П. Л.** Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. – Л. : Типогр. № 2 Гос. изд. по строит. и архитект., 1954. – 54 с.
5. **Перельмутер А. В., Сливкер В. И.** Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 600 с.
6. Нормы проектирования атомных станций. ПНАЭ Г-5-006-87 / Госатомнадзор СССР. – М. : 1988. – 39 с.
7. **John W. Bull**, Soil-structure interaction: numerical analysis and modeling, 1994. – 324 p.

УДК 624.048

Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции с учетом основания / Ю. А. Кожанов, А. Г. Ефименко, В. А. Загильский, А. П. Якубенко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2013. – № 8. – С. 42 – 47. – рис. 4. – табл. 4 – Библиогр.: (7 назв).

На примере здания для хранения запасов борного раствора (Узел бора) Южно-Украинской атомной электростанции рассматривается проблема определения и анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций от статических воздействий, с учетом совместной работы сооружения с основанием. Особое внимание уделено способам учета основания в расчетном комплексе «Structure CAD 11.5».

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, конечноэлементная модель, объемные конечные элементы, коэффициенты постели, SCAD 11.5.

Аналіз напружено-деформованого стану залізобетонної конструкції з урахуванням основи / Ю. О. Кожанов, А. Г. Єфіменко, В. А. Загільський, А. П. Якубенко // Вісник Придніпровської академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 8. – С. 42 – 47. – рис. 4. – табл. 4 – Бібліогр.: (7 назв).

На прикладі будівлі для зберігання запасів борного розчину (Вузол бору) Південно-Української атомної електростанції розглядається проблема визначення та аналізу напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій від статичних впливів, з урахуванням спільної роботи споруди з основою. Особливу увагу приділено способам урахування основи в розрахунковому комплексі «Structure CAD 11.5».

Ключові слова: напружено-деформований стан, кінцевоелементна модель, об'ємні кінцеві елементи, коефіцієнти постелі, SCAD 11.5.

Analysis of the stress-strain state of the reinforced concrete structure with the subgrade / Y. A. Kozhanov, A. G. Efimenko, V. A. Zagilsky, A. P. Yakubenko // Visnyk of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2013. – № 8. – P. 42 – 47. – pic. 4. – tabl. 4. – Bibliogr.: (7 names).

On the example of a building for storing boron solution (Node boron) South Ukrainian nuclear power plant, the problem of identifying and analyzing the stress-strain state of concrete structures from static effects on the joint construction of the subgrade is considering. Particular attention is paid to the methods of considering subgrade in calculation complex «Structure CAD 11.5».

Key words: stress-strain state, finite element model, three-dimensional finite elements, the coefficients of the bed, SCAD 11.5.