



УДК 624.01

doi: 10.48612/dnitii/2024\_50\_5-19

## О СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЙ МОДЕЛЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА SCAD ИЗ ТРЕХГРАННОЙ ПРИЗМЫ ПЕРВОГО ПОРЯДКА. ЧАСТЬ 2. h-МЕТОД

М. В. Мозголов

В. В. Костюков

Коломенский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Коломна

### Аннотация

В докомпьютерный период проектирование строительных конструкций зданий и сооружений, а также изучение напряженно-деформированного состояния их оснований, выполнялось при помощи традиционных инженерных методов расчета, основанных на известных аналитических решениях. Аналитические способы позволяют вычислять нормативные усилия, напряжения и перемещения без учета многих особенностей работы строительной системы. Компьютерный анализ на основе метода конечных элементов во многих случаях позволяет это сделать. Расчет можно разделить на три уровня степени детализации, являющиеся ступенями последовательного уточнения напряженно-деформированного состояния. Библиотеки программных комплексов включают в себя линейные, плоские, объемные и специальные конечные элементы.

При изучении сложных конструкций линейные элементы, как правило, применяются на первом уровне, плоские и объемные на втором, объемные, а также комбинации всех типов конечных элементов на третьем. Достоверность полученного результата зависит от типа конечного элемента, вида и плотности сетки конечно-элементного разбиения. Преимуществом треугольных и тетраэдрических конечных элементов является возможность представления сложной геометрии расчетной модели, хотя такие элементы первого порядка к применению нормами не рекомендованы.

Целью работы является изучение сходимости шестиузловой трехгранной призмы первого порядка КЭ № 33 BK SCAD.

В работе рассматриваются два типа моделей шарнирно-опертой балки, отличающиеся между собой пространственным расположением конечных элементов и их размерами, равными: 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 высоты и ширины конструкции.

У шестиузловой прямой трехгранной призмы КЭ № 33 BK SCAD сходимость зависит от пространственного расположения элемента. При хорошей геометрии конечных элементов с коэффициентом формы 1,15 и наихудшем их расположении по отношению к усилиям, для получения результатов напряжений с ошибкой до 5% конечно-элементная сетка должна быть мелкой, равной не более 1/16 характерного размера конструкции. Достоверность деформаций обеспечивается более крупной сеткой конечно-элементного разбиения, равной 1/8.

### Ключевые слова

BK SCAD, верификация, сходимость результата, конечный элемент, напряжения, перемещения, изгибающий момент, твердотельная модель

### Дата поступления в редакцию

05.02.2024

### Дата принятия к печати

15.02.2024

## Введение

В докомпьютерный период проектирование несущих строительных конструкций зданий и сооружений, а также изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) их оснований, выполнялось при помощи традиционных инженерных методов расчета, основанных на известных аналитических решениях. Аналитические способы позволяют вычислять нормативные (номинальные) усилия, напряжения и перемещения. Они не учитывают: концентрацию напряжений; эффекты стеснения деформаций при кручении и изгибе; дефекты и несовершенства форм конструкций; геометрическую и физическую нелинейность; этапность возведения объекта; поведение грунта при нагружении; сложные инженерно-геологические условия; анизотропию свойств материала, его упрочнение и ползучесть; свойства грунта, зависящие от времени - консолидацию и релаксацию; появление, распределение и рассеивание избыточных поровых давлений в грунте и др. [1, 2]. Расчет на компьютере в программных комплексах, основанных на методе конечных элементов (МКЭ) в некоторых случаях позволяет это сделать. В тоже время, имеются и трудности. Так например, при решении геотехнических задач в работе [2] отмечается, что: «Использование МКЭ требует намного больше времени и затрат, чем «традиционные» методы проектирования...; «Традиционные» методы проектирования, не использующие МКЭ, обычно быстрее и дешевле, однако в их основе всегда имеются существенные допущения...; Следует помнить что само по себе использование МКЭ не гарантирует точности результата». Выполнение нормативных требований расчета конструкций обеспечивается изучением грубой расчетной модели, ее уточнение может приводить к менее экономичным решениям, что является парадоксальной ситуацией [3]. В работе [4] исследуется плитная сталежелезобетонная конструкция междуэтажных перекрытий и фундаментов, в опорной зоне которой установлены вертикальные стальные пластины, существенно повышающие несущую способность на продавливание. Отмечается, что близкое к действительному НДС таких конструкций можно получить при помощи решения объемной задачи теории упругости, моделируя бетон и грунтовое основание — объемными, стальные листы — оболочечными, арматуру — стержневыми конечными элементами. Другие способы моделирования, а также применение коэффициентов постели приводят к неверному расчету и могут использоваться только при расчете осадки. Аналогичный вывод при выполнении геотехнических расчетов приведен в [2, с. 172]: «Использование стержневых и/или плитных элементов для моделирования конструкций является распространенным упрощением, которое содержит ошибку».

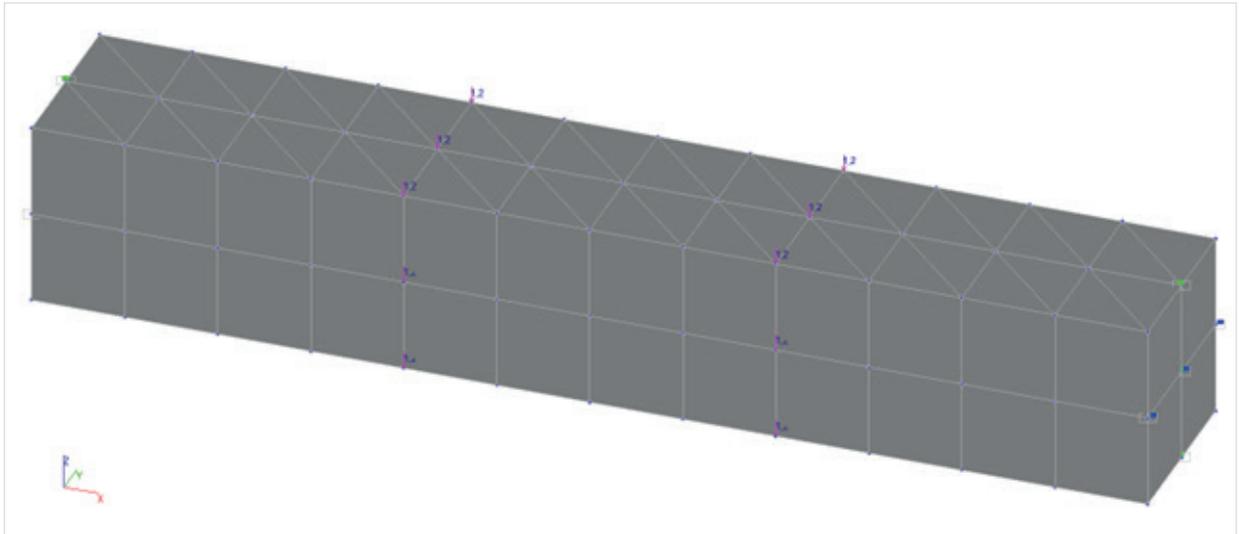
В работе [1, с. 25] представлены данные расчета напряжений в сварных швах стальной конструкции, которые разделены на три уровня степени детализации, являющиеся ступенями последовательного уточнения НДС. Первый уровень — номинальный, второй — конструктивный, третий — локальный. Третий уровень расчета показал, что напряжения в отдельных точках изучаемого узла превышают напряжения первого уровня более, чем в три раза. Возникает вопрос: как это учитывать в соответствии с нормативными требованиями? Уточненный результат часто приводит к менее экономичному решению [3]. Номинальные напряжения получают на моделях, состоящих из одномерных конечных элементов (КЭ). Данный этап расчета удобен на начальной стадии проектирования. Второй уровень детализации моделируется двумерными (пластинчатыми) или трехмерными (объемными) конечными элементами, которые называют еще твердотельными. В этом уровне размер твердотельных элементов ограничивается  $(1 \div 2)t$ , где  $t$  — толщина проката. Третий уровень детализации моделируется объемными конечными элементами, а их размер должен быть значительно меньше толщины проката [1]. Расчеты металлических конструкций со сложными узлами рекомендуется выполнять с использованием объемных конечных элементов в физически нелинейной постановке задачи [5].

В соответствии с требованиями п.п. 5.3.1 ГОСТ Р 57700.10-2018 [6] при моделировании твердотельными элементами тонкостенных конструкций, количество элементов по толщине должно быть не менее трех. Решение трехмерных задач методом конечных элементов охватывает почти все практические случаи [7]. Для получения наиболее полной информации об объекте исследования конструкцию рекомендуется моделировать целой серией конечно-элементных моделей (КЭМ) (стратов) [8], каждая из которых будет посвящена другой характеристике сооружения или конструкции, при этом парируются возможные ошибки расчетных схем [3]. При таком подходе выполняется верификация моделей, поиск правильного решения [9, 10]. Таким образом, при выполнении расчетов строительных конструкций с использованием МКЭ в моделях необходимо применять разные типы конечных элементов: линейные, плоские, объемные, их сочетания. Плотность сетки конечно-элементного разбиения влияет на уровень изучения НДС конструкции, достоверность полученного результата, возможности ЭВМ справиться с поставленной задачей. При этом от способа разбиения, а также типа конечного элемента зависит скорость сходимости результата [3, 6–17]. Например, в соответствии с п.п. 5.3.3, 5.3.4 [6] использование треугольных и тетраэдральных конечных элементов первого порядка при создании компьютерных моделей не рекомендуется. Модели из объемных КЭ рассматриваются в работах [4, 7, 10, 11, 13, 19–23]. В 1975 г. [7], 1993 г. [17] при применении МКЭ в области твердотельного моделирования отмечается о значительных трудностях, связанных не только с решателями, но и с возможностью компьютеров. На современном этапе развития ЭВМ часть вопросов, касающихся производительности процессоров и компьютерной памяти решено, поэтому как отдельные строительные конструкции, так и их критические зоны эффективно изучать при помощи решения объемной задачи теории упругости [4, 5, 10, 11, 21].

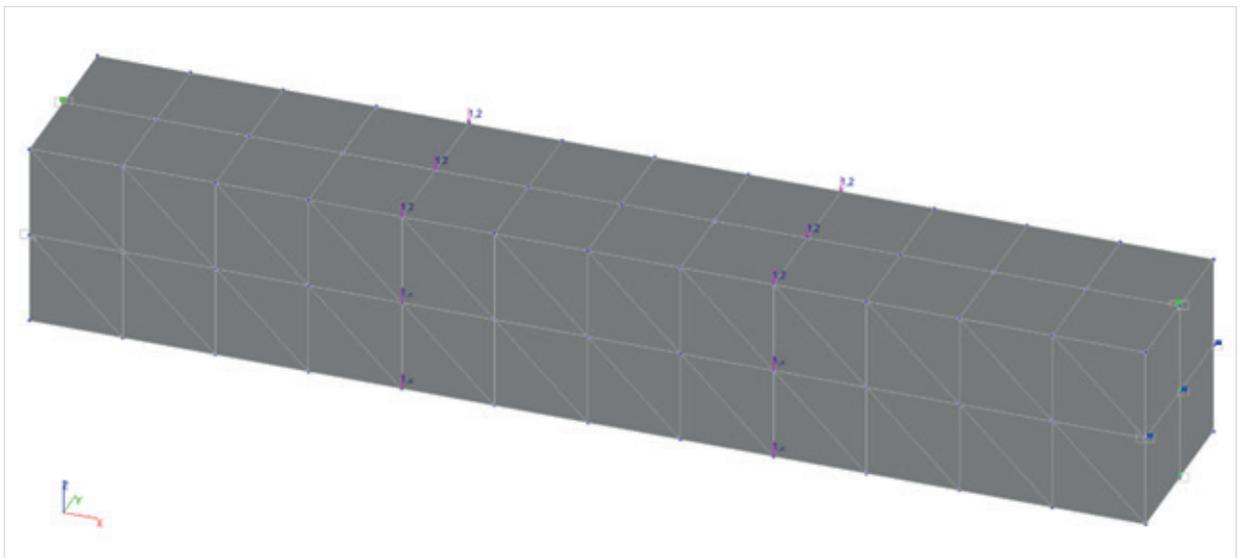
Данная работа является продолжением численного эксперимента по изучению сходимости шестиугольной прямой трехгранной призмы первого порядка КЭ № 33 вычислительного комплекса SCAD по двум ортогональным направлениям [23]. Преимуществом треугольных и тетраэдрических конечных элементов является возможность представления сложной геометрии расчетной модели. Такие элементы больше подходят для автоматических генераторов сетки [2]. Сходимость изучается при помощи  $h$  – метода [3,7,8,14-17] или критерия п.п. 5.4.3 [6]. Условием сходимости является совпадение полученных данных с данными известного аналитического расчета. Анализируются вертикальные перемещения и усилия – изгибающие моменты в середине балки, вычисленные по напряжениям, действующим на гранях конструкции [13].

#### **Материалы и методы исследования**

Рассматривается шарнирно опертая квадратная балка сечением 500×500 мм, длиной 3000 мм, выполненная из бетона класса В 15. Моделирование граничных условий осуществлено по средним линиям опорных граней конструкции. С целью получения больших деформаций и изучения их значений до двух знаков после запятой, жесткость конструкции снижена путем умножения начального модуля упругости бетона на коэффициент редуцирования 0,2. Одинаковое изменение жесткости всех элементов модели не влияет на распределение усилий или напряжений, но влияет на ее деформативность [9]. Сосредоточенные нагрузки по 11 Т, направленные вдоль вертикальной оси Z, равномерно распределены по узлам сечений, расположенных на расстоянии 1,0 м от опор конечно-элементных моделей (рис. 1, 2). При создании моделей, для обеспечения лучшей обусловленности матрицы [14], использовалась функция автоматической перенумерации узлов, предусмотренная в BK SCAD.



**Рис. 1.** Первый тип конечно-элементной модели. Размер стороны призмы 250 мм (1/2 характерного размера балки)



**Рис. 2.** Второй тип конечно-элементной модели. Размер стороны призмы 250 мм (1/2 характерного размера балки)

### **Основная часть**

Изучается два типа конечно-элементных моделей, отличающихся между собой пространственным расположением конечных элементов (**рис. 1, 2**). Модели как по высоте, так и по ширине разбиваются на одинаковое количество конечных элементов: 2, 4, 8, 16, 32. Таким образом, размер ребра призмы равен: 250 мм, 125 мм, 62,5 мм, 31,25 мм, 15,625 мм. Коэффициент формы всех конечных элементов 1,15, что укладывается в рекомендацию [15].

Изучаем поперечное сечение в середине пролета (**рис. 3, 4**). Находим усредненные фибровые напряжения в нижней и верхней зонах конструкции. Вначале усредняем по звезде элементов узла, затем по количеству узлов [3, 13]. Рассчитанные данные представлены в **таблице 1**.

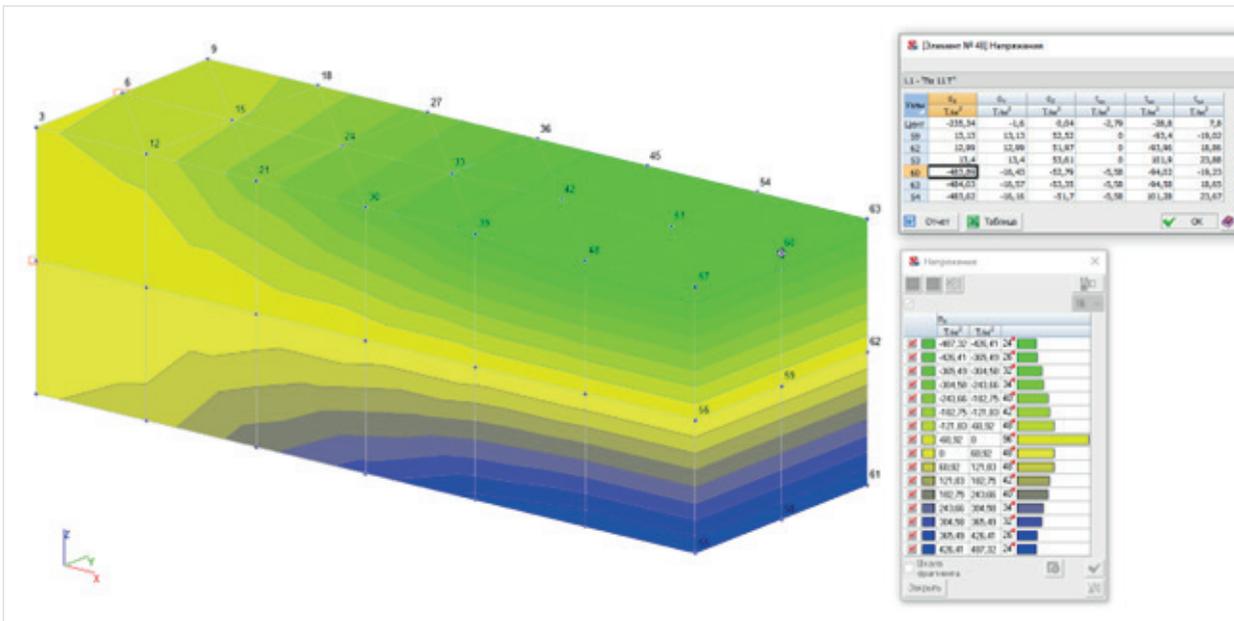


Рис. 3. Модель тип № 1 с размером сторон конечного элемента 250 мм. Поля напряжений  $\sigma_x$ . Напряжения в элементе № 48 верхней зоны балки

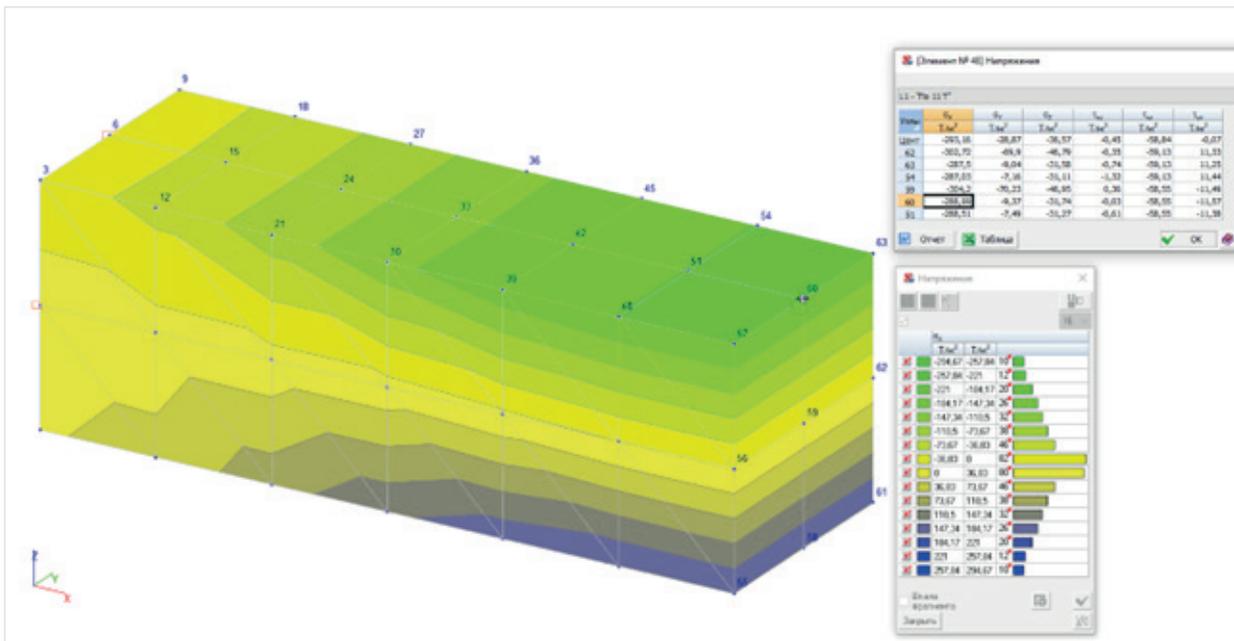


Рис. 4. Модель тип № 2 с размером сторон конечного элемента 250 мм. Поля напряжений  $\sigma_x$ . Напряжения в элементе № 48 верхней зоны балки

Вертикальные перемещения узлов твердотельных моделей с размером сторон конечного элемента 250 мм представлены на рис. 5, 6, с размером сторон 31,25 мм на рис. 7, 8. На рис. 9 представлены прогибы стержневой КЭМ. Теоретические значения прогибов балки  $f_{\max} = 4,59$  мм определены в работе [23].

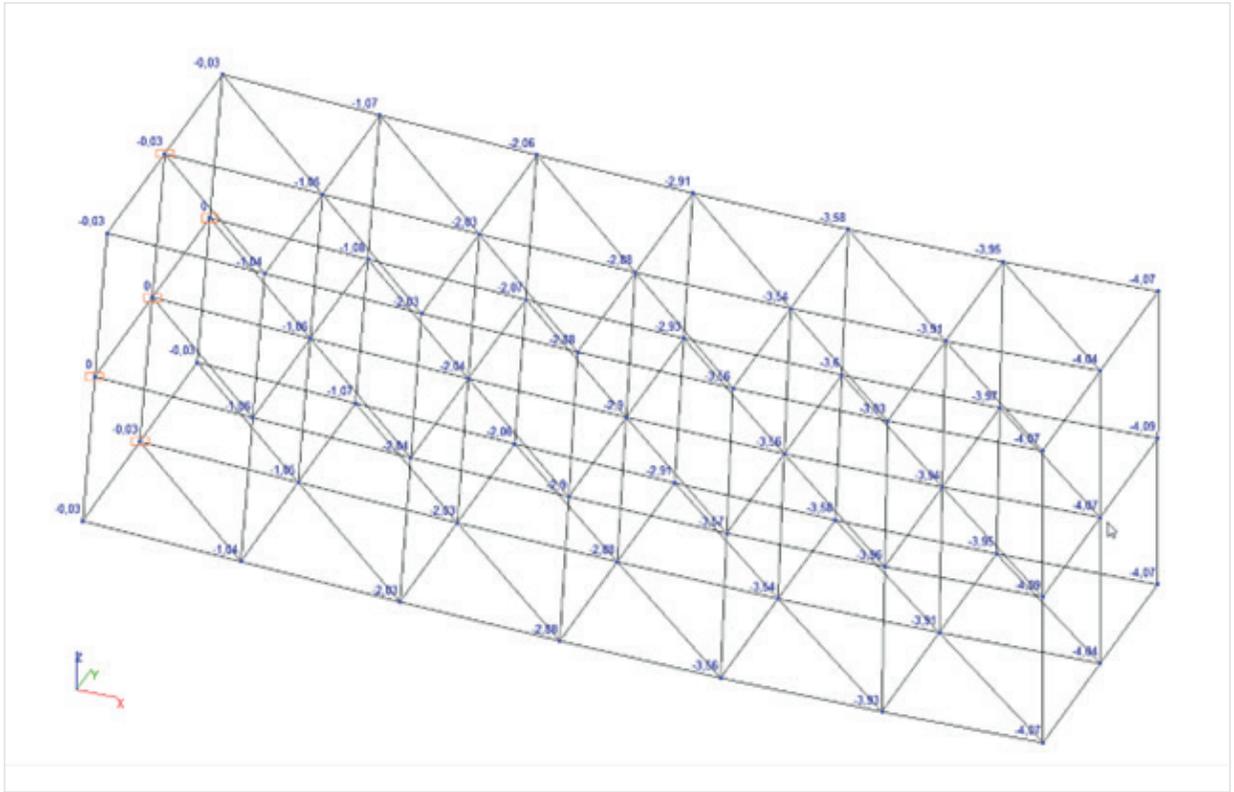


Рис. 5. Модель тип № 1 с размером сторон конечного элемента 250 мм. Вертикальные перемещения узлов,  $f_{\max} = 4,07$  мм. Показана левая половина конструкции

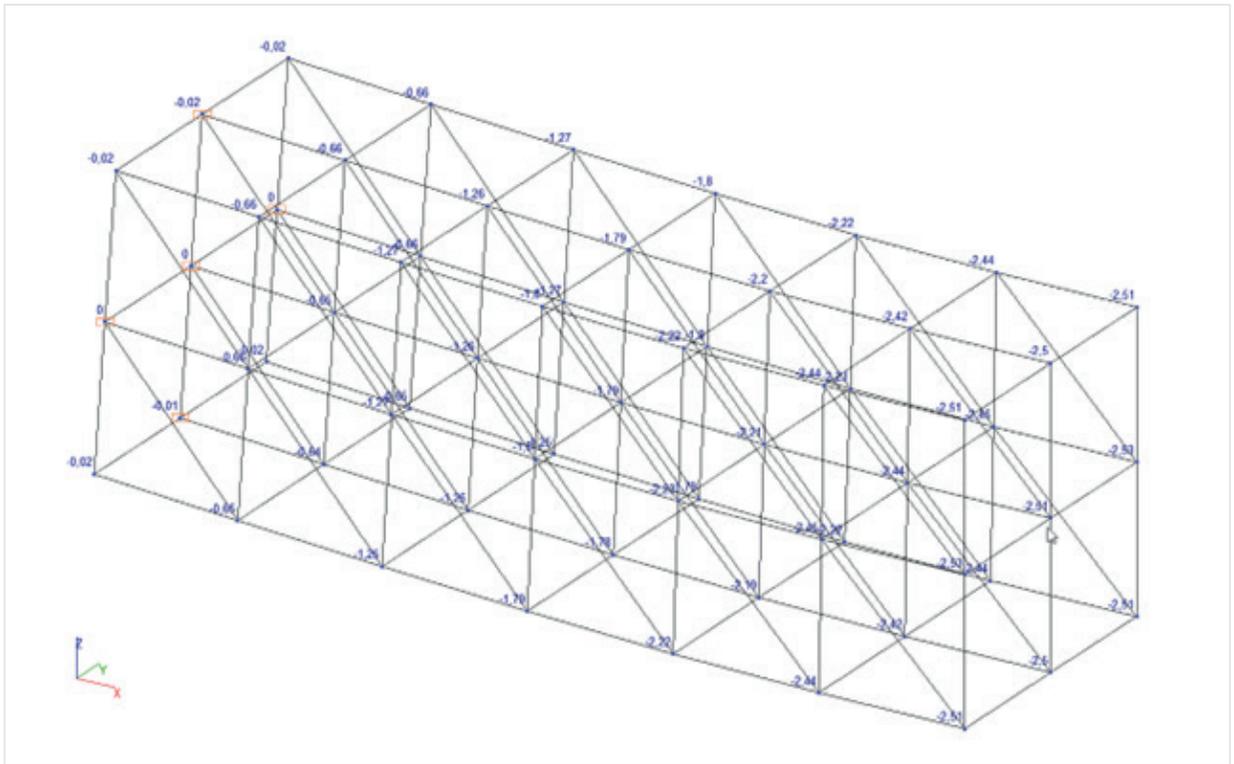


Рис. 6. Модель тип № 2 с размером сторон конечного элемента 250 мм. Вертикальные перемещения узлов,  $f_{\max} = 2,51$  мм. Показана левая половина конструкции

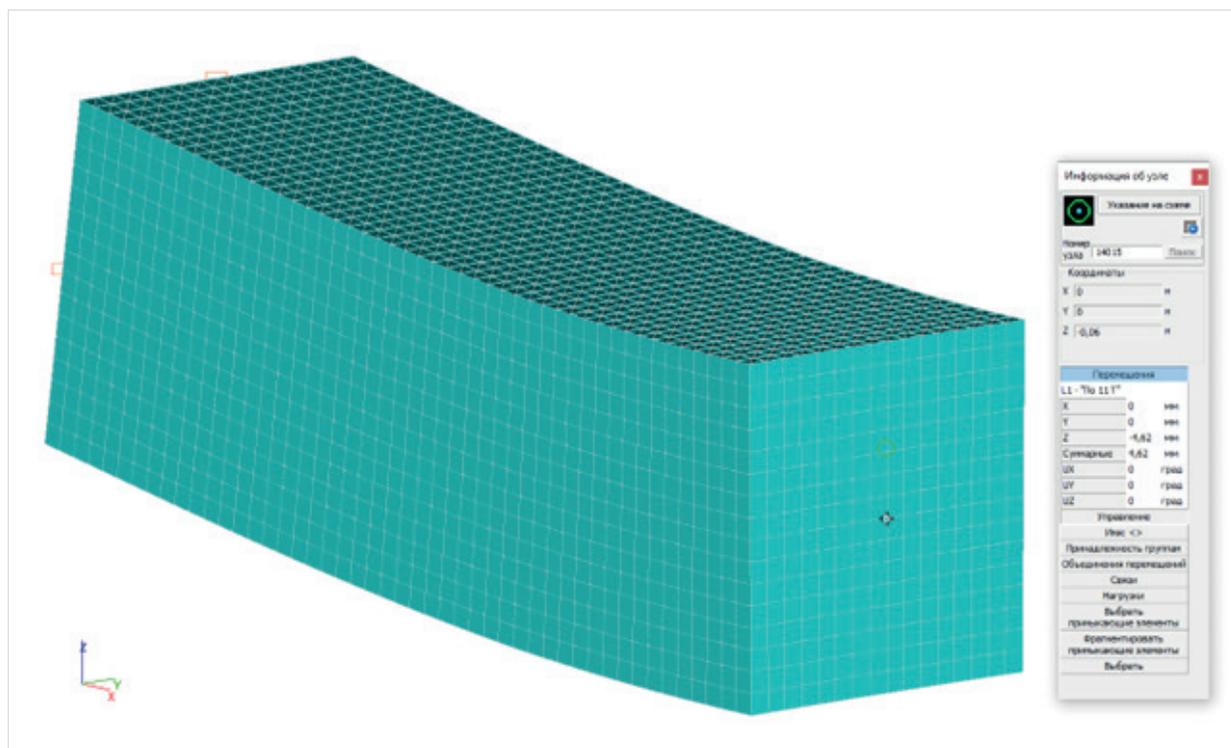


Рис. 7. Модель тип № 1 с размером сторон конечного элемента 31,25 мм. Прогиб  $f_{\max} = 4,62$  мм. Показана левая половина конструкции

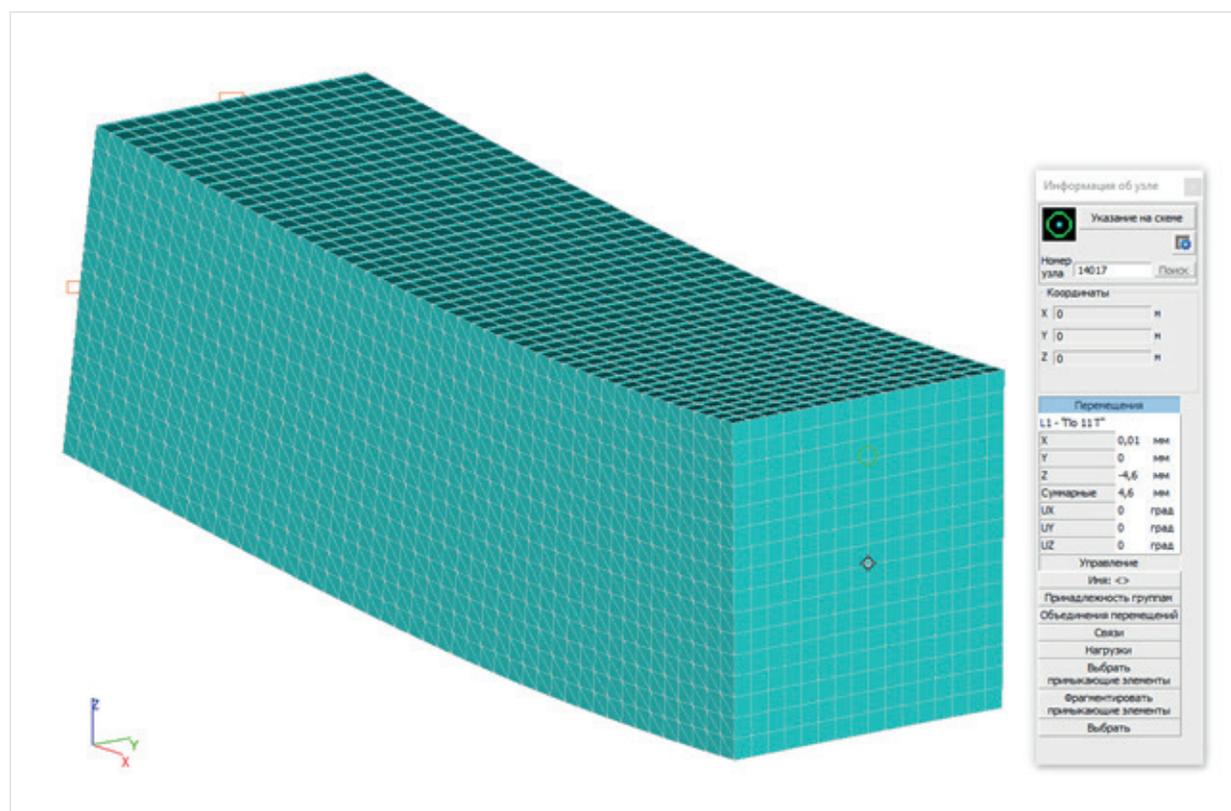


Рис. 8. Модель тип № 2 с размером сторон конечного элемента 31,25 мм. Прогиб  $f_{\max} = 4,6$  мм. Показана левая половина конструкции

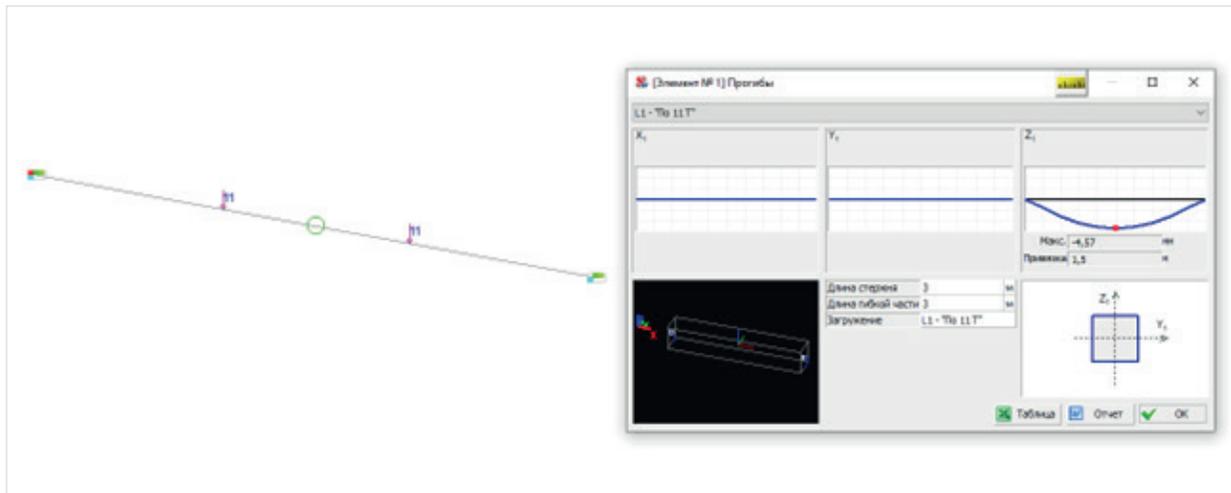


Рис. 9. Стержневая модель. Тип КЭ № 6 (стержень со сдвиговой жесткостью). Прогиб  $f_{\max} = 4,57$  мм

Таблица 1

Усредненные фибровые значения напряжений в конечных элементах поперечного сечения балок в середине пролета по верхним и нижним граням

№ типа модели (размер КЭ)	Напряжения	
	$\sigma_{\text{хbt,max}}$ , [Т/м <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\text{хbc,max}}$ , [Т/м <sup>2</sup> ]
№ 1 (250 мм)	486,6	- 486,6
№ 1 (125 мм)	520,1	- 520,1
№ 1 (62,5 мм)	527,8	- 527,8
№ 1 (31,25 мм)	528,8	- 528,8
№ 1 (15,625 мм)	528,7	- 528,7
№ 2 (250 мм)	184,5	- 184,5
№ 2 (125 мм)	358,7	- 358,7
№ 2 (62,5 мм)	457,5	- 457,5
№ 2 (31,25 мм)	506,2	- 506,2
№ 2 (15,625 мм)	514,9	- 514,9

Таблица 2

## Значения изгибающих моментов и прогибов моделей

№ типа модели (размер КЭ)	Изгибающий момент $M_y, Tм$	Отклонение изгибающего момента от теоретического значения, %	Прогиб середины, мм	Отклонение прогиба от теоретического значения, %
№ 1 (250 мм)	10,14	-7,82	4,07	-11,3
№ 1 (125 мм)	10,84	-1,45	4,45	-3,05
№ 1 (62,5 мм)	11,0	0	4,57	-0,44
№ 1 (31,25 мм)	11,01	+0,09	4,62	+0,65
№ 1 (15,625 мм)	11,01	+0,09	4,65	+1,3
№ 2 (250 мм)	3,84	-65,1	2,51	-45,32
№ 2 (125 мм)	7,47	-32,1	3,78	-17,65
№ 2 (62,5 мм)	9,53	-13,36	4,37	-4,8
№ 2 (31,25 мм)	10,55	-4,1	4,6	+0,21
№ 2 (15,625 мм)	10,73	-2,45	4,62	+0,65

Изгибающий момент в рассматриваемом поперечном сечении, вычисляем по формуле [4, 23]:

$$M_y = I_y \times \frac{\sigma_{x_{bt}, \max} - \sigma_{x_{bc}, \max}}{h}, \quad (1)$$

Момент инерции  $I_y$  определен в работе [23].

Модель тип № 1 (250 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{486,6 + 486,6}{0,5} = 10,14 \text{ Тм}. \quad (2)$$

Модель тип № 1 (125 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{520,1 + 520,1}{0,5} = 10,84 \text{ Тм}. \quad (3)$$

Модель тип № 1 (62,5 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{527,8+527,8}{0,5} = 11,0 \text{ ТМ.} \quad (4)$$

Модель тип № 1 (31,25 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{528,8+528,8}{0,5} = 11,01 \text{ ТМ.} \quad (5)$$

Модель тип № 1 (15,625 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{528,7+528,7}{0,5} = 11,01 \text{ ТМ.} \quad (6)$$

Модель тип № 2 (250 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{184,5+184,5}{0,5} = 3,84 \text{ ТМ.} \quad (7)$$

Модель тип № 2 (125 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{358,7+358,7}{0,5} = 7,47 \text{ ТМ.} \quad (8)$$

Модель тип № 2 (62,5 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{457,5+457,5}{0,5} = 9,53 \text{ ТМ.} \quad (9)$$

Модель тип № 2 (31,25 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{506,2+506,2}{0,5} = 10,55 \text{ ТМ.} \quad (10)$$

Модель тип № 2 (15,625 мм).

$$M_y = \frac{520833,3333}{10^8} \times \frac{514,9+514,9}{0,5} = 10,73 \text{ ТМ.} \quad (11)$$

Графики сходимости по изгибающему моменту и прогибу представлены на **рис. 10, 11**.

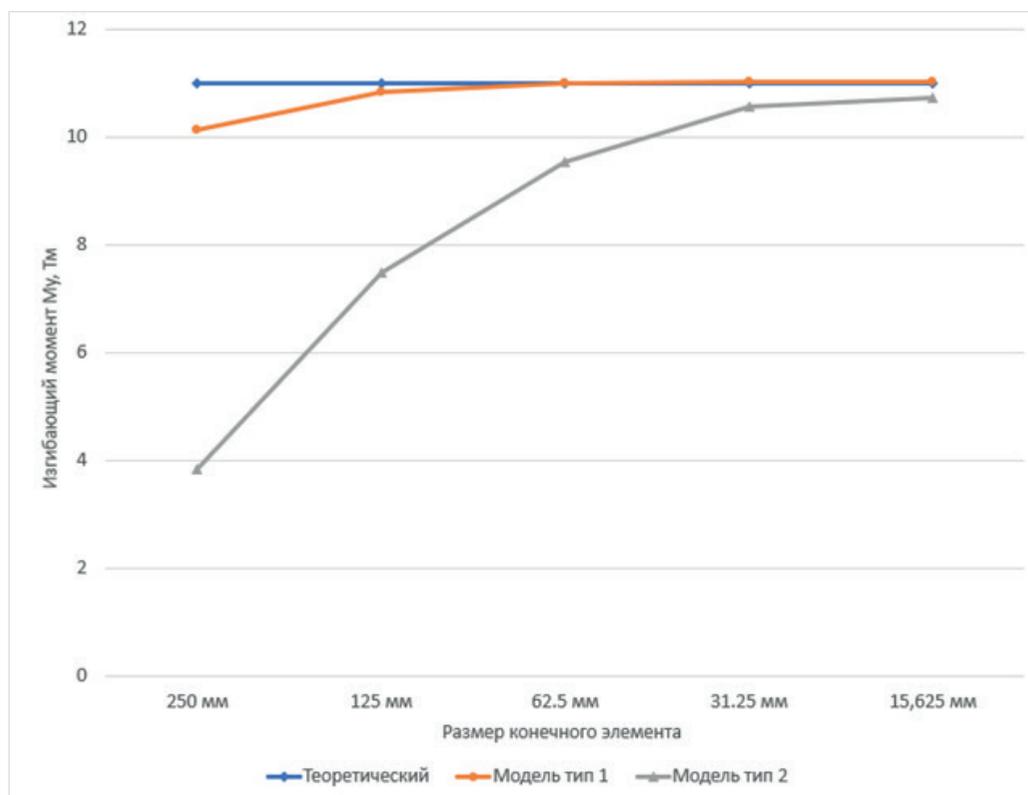


Рис. 10. График сходимости изгибающего момента

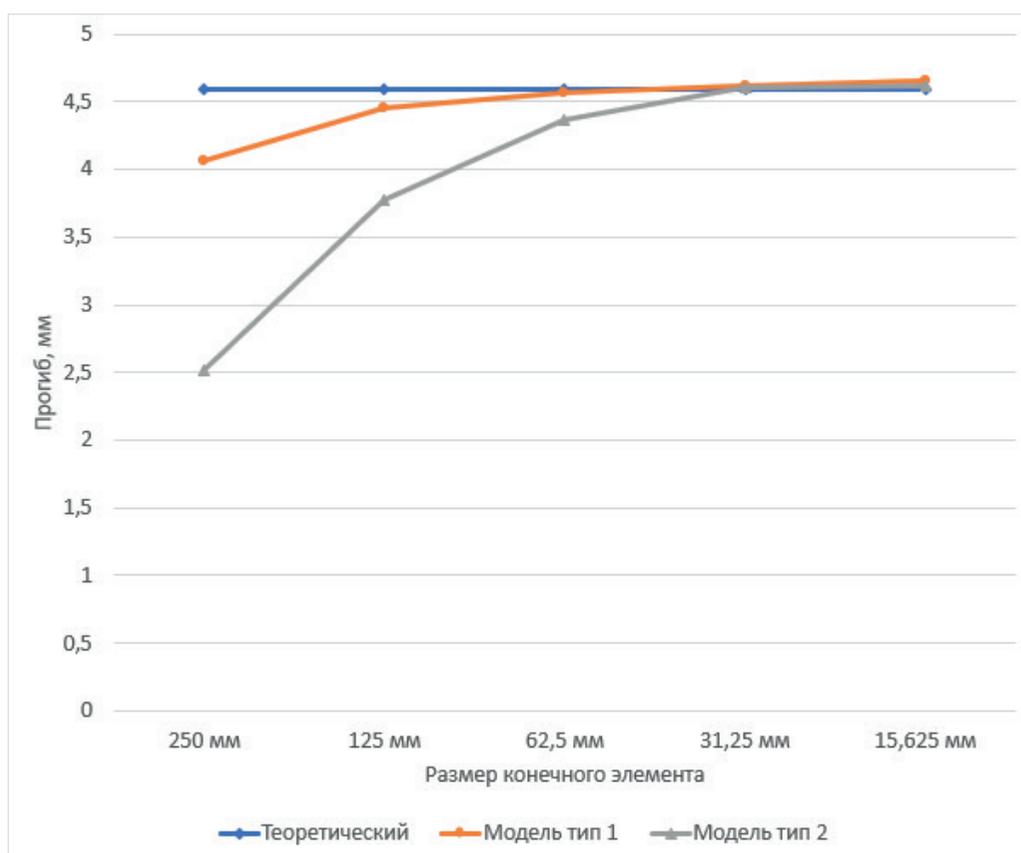


Рис. 11. График сходимости прогиба

Проведенный численный эксперимент на твердотельных моделях балок вычислительного комплекса SCAD, выполненных из объемного конечного элемента первого порядка — шестиузловых прямых трехгранных призм КЭ № 33 показал, что при хорошей геометрии конечных элементов с коэффициентом формы 1,15 и наихудшем их расположении по отношению к потокам усилий, а это может встретиться при сложном напряженно-деформированном состоянии конструкции, для получения результатов напряжений с необходимой точностью (ошибкой до 5%) конечно-элементная сетка должна быть мелкой, равной не более 1/16 характерного размера конструкции, что подтверждает рекомендацию  $ch/L = 1/20$  работы [24]. Аналогичные выводы приводятся в работах [3, 15] при изучении сходимости плоских конечных элементов (плит и оболочек) на моделях перекрытий, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой.

Характерным размером балок при изучении их сложного НДС методом конечных элементов с применением объемных тел является высота и ширина конструкции.

Для трехгранной призмы первого порядка КЭ № 33 BK SCAD приближение к правильному решению как по изгибающему моменту, так и по прогибу идет по нижней границе, что характерно для МКЭ в перемещениях [17].

### **Выводы**

1. У шестиузловой прямой трехгранной призмы КЭ № 33 BK SCAD сходимость зависит от пространственного расположения элемента. При наихудшем расположении конечных элементов по отношению к потокам усилий для получения результатов напряжений с необходимой точностью (ошибкой до 5%) конечно-элементная сетка должна быть мелкой, равной не более 1/16 характерного размера конструкции. Достоверность деформаций обеспечивается более крупной сеткой конечно-элементного разбиения, равной 1/8. Данные цифры верны при хорошей геометрии конечных элементов с коэффициентом формы 1,15.
2. При большем коэффициенте формы трехгранных призм первого порядка КЭ № 33 BK SCAD следует ожидать ухудшения сходимости решения.
3. Характерным размером балок при изучении их сложного напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов с применением объемных тел является высота и ширина конструкции.
4. Следующим этапом численного изучения сходимости трехгранных призм BK SCAD может быть моделирование конструкций конечными элементами второго порядка, с использованием пятнадцатиузловой трехгранной призмы КЭ № 35.

### **Библиографический список**

1. Соколов С. А. Критерии работоспособности металлических конструкций машин. Проектирование с применением МКЭ. СПб.: Страта, 2023. 202 с.
2. Мельников Р. В. Использование метода конечных элементов в геотехнике. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 188 с.
3. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ДМК Пресс, 2007. 600 с.

4. Пекин Д. А. Плитная сталежелезобетонная конструкция. М.: АСВ, 2010. 440 с.
5. Еремеев П. Г. Современные конструкции покрытий над трибунами стадионов. М.: Издательство АСВ, 2015. 236 с.
6. ГОСТ Р 57700.10-2018 Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. Москва; Стандартинформ; 2018.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Перевод с английского под редакцией Б.Е. Победри. М.: МИР, 1975. 541 с.
8. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
9. Мозголов М. В., Козлова Е. В. Верификация моделей SCAD железобетонного кессонного перекрытия на основе аналитического метода расчета, учитывающего пролеты и жесткость конструкции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. №2. С. 29 – 40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40.
10. Мозголов М. В., Козлова Е. В. Верификация стержневой и твердотельной моделей вычислительного комплекса SCAD расчета железобетонного кессонного перекрытия // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. №6. С. 35 – 47. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-35-47
11. Мозголов М. В., Козлова Е. В. Модель комплекса SCAD из объемных конечных элементов: расчет железобетонных кессонных перекрытий. Вестник НИЦ «Строительство». 2023; 37 (2): 18 – 36. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-18-36](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-18-36)
12. Мозголов М. В. Об ошибках примера расчета железобетонной кессонной панели перекрытия в справочнике проектировщика. Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 3. С. 13 – 22. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.02.
13. Мозголов М. В., Костюков В. В. О выборе места действия напряжений при анализе усилий в твердотельной модели вычислительного комплекса SCAD. Системные технологии. 2023. № 3 (48). С. 122 – 129. doi: 10.55287/22275398-2023-3-122
14. Городецкий А. С., Барабаш М. С., Сидоров В. Н. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. М.: АСВ, 2016. 337 с.
15. Перельмутер А. В. Беседы о строительной механике. М.: Издательство SCAD Soft, Издательский дом АСВ, 2016. 304 с.
16. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Фиалко С. Ю., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD ++. М.: Изд-во «СКАД СОФТ», 2015. 848 с.
17. Секулович М. Метод конечных элементов. Перевод с сербского Ю. Н. Зуева. Под редакцией В. Ш. Барбакадзе. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.
18. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2019. 464 с.
19. Никитин К. Е., Кирсанов О. А. Сравнительное исследование конечно-элементных методик расчета ребристых железобетонных перекрытий. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. 18(3). 242 – 254. DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254

20. *Кашеварова Г. Г., Труфанов Н. А.* Численное моделирование деформирования и разрушения системы «здание – фундамент – основание». Екатеринбург – Пермь: УрО РАН, 2005. 225 с.

21. *Сокуров А. З.* Продавливание плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: АО «НИЦ «Строительство», НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. 2015. 155 с.

22. *Филимонова Е. С.* Анализ рекомендуемой методики расчета для монолитных плит перекрытия с различными типами пустотообразователей по системе Sobiax. Молодой ученый. Международный научный журнал. С. 109 – 112. № 20(415)/2022.

23. *Мозголов М. В., Костюков В. В., Сидоренко Д. А.* О сходимости решений моделей вычислительного комплекса SCAD из трехгранной призмы первого порядка. Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 144 – 153. doi: 10.55287/22275398\_2023\_4\_144

24. *Вовкушевский А. В., Шойхет Б. А.* Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов. М.: Энергия, 1981. 136 с.

---

## ON THE CONVERGENCE OF SOLUTIONS OF MODELS OF THE SCAD COMPUTER COMPLEX FROM A FIRST ORDER TRIHEDRAL PRISM. PART 2. h-METHOD

**M. V. Mozgolov**

**V. V. Kostyukov**

Kolomna Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Moscow Polytechnic University”, Kolomna

---

### Abstract

In the pre-computer period, the design of building structures of buildings and structures, as well as the study of the stress-strain state of their foundations, was carried out using traditional engineering calculation methods based on well-known analytical solutions. Analytical methods make it possible to calculate standard forces, stresses and displacements without taking into account many features of the operation of the building system. Computer analysis based on the finite element method allows this to be done in many cases. The calculation can be divided into three levels of detail, which are stages of sequential refinement of the stress-strain state. Libraries of software systems include linear, planar, volumetric and special finite elements. When studying complex structures, linear elements are usually used at the first level, flat and volumetric at the second, volumetric, as well as combinations of all types of finite elements at the third. The reliability of the obtained result depends on the type of finite element, the type and density of the mesh of the finite element partition. The advantage of triangular and tetrahedral finite elements is the ability to represent the complex geometry of the calculation model, although such first-order elements are not recommended for use by the standards.

### The Keywords

*VC SCAD, verification, result convergence, finite element, stress, displacement, bending moment, solid model*

### Date of receipt in edition

05.02.2024

### Date of acceptance for printing

15.02.2024

The purpose of the work is to study the convergence of a six-node trihedral prism of the first order FE No. 33 VK SCAD.

The work considers two types of hinged-supported beam models, differing in the spatial arrangement of the finite elements and their sizes, equal to:  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$  of the height and width of the structure.

For a six-node straight triangular prism FE No. 33 VK SCAD, the convergence depends on the spatial location of the element. With good geometry of the finite elements with a shape factor of 1.15 and their worst location with respect to the forces, in order to obtain stress results with an error of up to 5%, the finite element mesh should be fine, equal to no more than  $1/16$  of the characteristic size of the structure. The reliability of the deformations is ensured by a larger finite element mesh equal to  $1/8$ .

**Ссылка для цитирования:**

М. В. Мозголов, В. В. Костюков. О сходимости решений моделей вычислительного комплекса SCAD из трехгранной призмы первого порядка. Часть 2. h-метод. — Системные технологии. — 2024. — № 1 (50). — С. 5–19.

