

Таким образом, на основе приведенных данных и выполненных расчетов выбираем третий вариант конструкции монолитного перекрытия как удовлетворяющий всем конструктивным требованиям и максимально подходящий под индивидуальные требования устройства внутреннего пространства возводимого здания, после чего проектируем сечение ригеля (рис. 6).

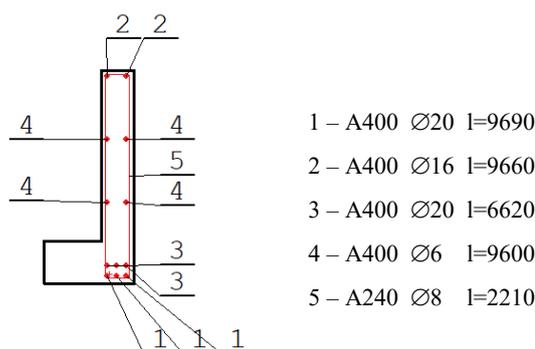


Рис. 6. Чертеж запроектированного сечения ригеля

Вывод: учет потребностей, вытекающих из будущего назначения помещений, перед расчетом конструктивных элементов – в данном случае, ригелей – позволяет использовать их наиболее рациональным образом в оформлении внутреннего пространства и обеспечивает экономичность устройства возводимых конструкций.

#### Список литературы

1. Клевцов В.А. О некоторых проблемах проектирования и строительства зданий из монолитного железобетона// Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей: Сб. докладов. – М., 2004. – С. 2-4.
2. В.Н. Симбиркин. Проектирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий с помощью ПК STARK S// Информационный Вестник Мособлгосэкспертизы . – 2005. – № 3(10). – С . 42-48.
3. Городецкий Д.А., Юсипенко С.В., Батрак Л.Г., Лазарев А.А., Рассказов А.А. МОНОМАХ-САПР. Учебное пособие. Пример расчета и проектирования – электронное издание, 2013г. – 368 с.

УДК 624.072.2

### ХАРАКТЕР ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СЕТКИ ТРИАНГУЛЯЦИИ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ПЕРЕКРЫТИЙ ЗДАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «МОНОМАХ-САПР»

**О. Б. Завьялова, В. В. Куликов**  
Астраханский государственный  
архитектурно-строительный университет  
(г. Астрахань, Россия)

Точность расчета строительных конструкций и их анализ с помощью метода конечных элементов в значительной мере зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов.

**Ключевые слова:** сетка конечных элементов, триангуляция, метод расчета, программа, метод конечных элементов.

The accuracy of the calculation of building structures and their analysis using the finite element method largely depends on the correct choice of types and sizes of finite elements.

**Keywords:** the finite element mesh, triangulation, calculation method, program, finite element method.

Преимуществом анализа строительных конструкций с использованием МКЭ служит универсальность этого метода, которая позволяет производить расчет самых различных по форме величине и характеру работы конструкций с разными свойствами материалов.

Во многих современных программных комплексах предусмотрено как автоматическое разбиение геометрических форм на элементы, так и заданное пользователем. При этом в первом случае программа сама определяет густоту (концентрацию) сетки конечных элементов и характер её нанесения с учетом введенных в неё параметров и ограничений. Во втором же случае проектировщик сам определяет либо максимальный размер элемента, либо количество разбиений каждой линии на границе объекта.

Разбиение конструкций в автоматическом режиме не всегда правильно срабатывает: программа может сообщить, о вытянутости, скрученности или некорректном параметре элемента

строительной конструкции, вследствие чего программа не может продолжить решение. Тогда пользователь может выполнить кропотливую работу по поиску этого элемента и улучшению его формы за счет изменения координат узлов, либо замены автоматической сетки – пользовательской, что более трудоемко. В этом и заключается одна из основных проблем расчета конструкций методом конечных элементов во многих программных комплексах [1].

Форма конечных элементов существенно оказывает влияние на точность. При создании расчётных моделей рекомендуется избегать появления острых углов в плоских КЭ. Наиболее точный результат расчета дают плоские элементы с равными сторонами или близкими к таковым.

Генерация сетки конечных элементов является основным этапом решения задачи по определению напряженно-деформированного состояния конструкций. В ходе его решения возникает ряд противоречивых требований. Метод конечных элементов является приближенным методом, используемым в компьютерных программах для моделирования строительных конструкций. Область, в которой находится решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов) [2].

Плотная сетка позволяет достичь требуемой точности решения задачи, однако чрезмерно густая сетка конечных элементов увеличивает время решения задачи и может приводить к плохой обусловленности матрицы жёсткости, а также приводит к существенной загрузке процессора компьютера (ЭВМ). В случаях расчета протяженных, высотных, крупных зданий со сложными архитектурно-планировочными решениями возрастает шанс ошибки или сбоя расчета МКЭ из-за ограничений мощностей программного обеспечения и характеристик компьютера, вследствие образования большой матрицы КЭ (рис. 1).

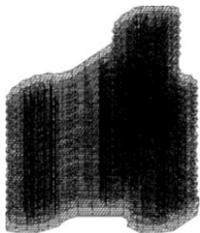


Рис. 1. Отображение сетки КЭ при формировании матрицы жесткости в ПК «Мономах-САПР»

Одним из факторов при составлении матрицы жесткости КЭ является его форма. Выделяется две основных формы плоских КЭ – треугольные и четырехугольные. Равносторонние конечные элементы более предпочтительны по сравнению с элементами, имеющими определенно выраженную неравномерность сторон [3].

В программном комплексе Мономах-САПР применяется три метода триангуляции:

Первый метод – основан на применении треугольной триангуляции (при плоском отображении элементов), а для объемных конструкций их аналогом являются тетраэдры и треугольные призмы.

Второй метод – основывается на применении четырехугольной триангуляции, при этом максимально включаются в конечно-элементную сетку прямоугольные и четырехугольные КЭ (для плоских элементов) и элементов в виде параллелепипедов – для объемных моделей.

Третий метод основан на организации как регулярных, так и нерегулярных включений в местах концентрации напряжений или усилий. При этом методе применяется адаптивная четырехугольная триангуляция.

Шаг является основным параметром при генерации сеток частей здания. Он определяет максимальную длину ребра треугольника или четырехугольника сетки. В настоящее время задание размеров шага триангуляции вызывает затруднения у многих пользователей программного обеспечения. Уменьшение размера конечного элемента приводит к уменьшению погрешности в расчетах, но при этом приводит к возрастанию погрешностей округления и погрешностей, связанных с ухудшением обусловленности при составлении матрицы жесткости [4].

Из опыта расчетов в программных комплексах рекомендуется назначать шаг триангуляции такого размера, чтобы пролет при расчете горизонтальных, и высота при расчете вертикальных конструкций содержал минимум 10 узлов триангуляции [5].

Проведём анализ величины внутренних усилий при варьировании густоты сетки конечных элементов на примере расчета монолитного железобетонного безбалочного перекрытия высотной гостиницы (рис. 2).

Целью данного исследования является определение влияния плотности сетки на величину точности расчета и определение сходимости результатов при сгущении сетки.

Основные параметры модели: пролет продольный 6 м; пролет поперечный 4,5 м; пилоны  $0,8 \times 0,4$  м; толщина плиты 0,2 м; бетон класса В30; арматура А400; колонны имеют жесткое защемление (включена генерация АЖТ). На перекрытие действует собственный вес и распределенная по площади расчетная нагрузка [6].

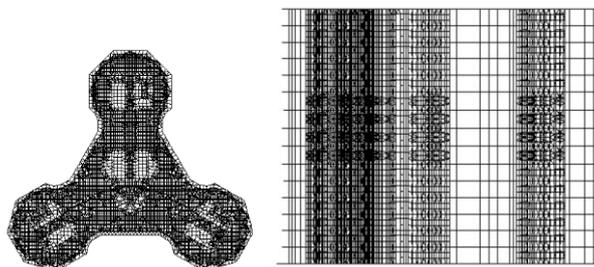


Рис. 2. Шаги узлов триангуляции в горизонтальных и вертикальных элементах

Перекрытие в пределах выбранной ячейки разбито таким образом, чтобы сетка КЭ меньшего размера была кратной сетке большего размера и самому пролету. Делается это с целью совпадения в одних и тех же местах характерных выбранных точек, чтобы проводить анализ действующих в них усилий и проводить подбор армирования (рис. 3). При этом минимальное количество узлов триангуляции вдоль оси X равно рекомендуемому числу 10, что соответствует элементу со стороной 0,6 м.

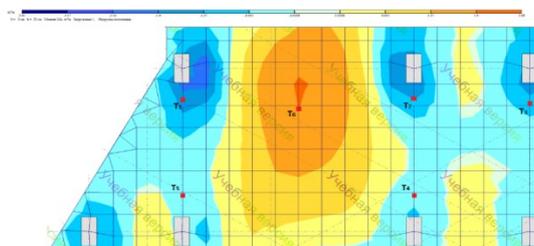


Рис. 3. Мозаика моментов вдоль оси X при шаге триангуляции 0,6 м

Полученные результаты расчетов в программном комплексе заносятся в таблицу для наглядного сравнения полученных результатов.

Таблица 1

Значения моментов от величины сетки КЭ

Размер сетки КЭ	Значение момента ( $тс^*м$ ) в узле №:					
	0,6 м – рекомендуемый	-1,29	-0,98	-0,81	-0,63	-0,55
0,5 м	-1,36	-1,17	-0,92	-0,71	-0,59	+1,64
0,4 м	-1,47	-1,28	-1,08	-0,84	-0,63	+1,68
0,3 м	-1,53	-1,53	-1,18	-0,95	-0,71	+1,71
0,25 м	-1,56	-1,56	-1,21	-0,98	-0,74	+1,73
Разница значений (прирост момента относительно первого)	35,43%	59,18%	49,38%	55,56%	34,54%	15,19%

Из полученных результатов видно, что значения изгибающих моментов вдоль оси X при уменьшении величины ячейки конечных элементов вдвое (с 0,6 до 0,3 м) значительно возрастают, достигая в отдельных сечениях прироста около 60%. При этом моменты в разных точках изменяются на разные величины, что свидетельствует о нелинейной зависимости изменения величин (рис. 4).

Аналогичное сравнение проводится для значений поперечных сил, но действующих уже вдоль оси Y. Это делается для того, чтобы убедиться, что зависимость действует независимо от направления сетки КЭ (рис. 5).

Полученные результаты показывают, что значения поперечных сил в выбранных характерных точках также возрастают, при этом разница достигает 40–50% (рис. 6).

Ввиду того, что введение сетки триангуляции с малыми размерами ячеек сильно усложняет решение задачи и в несколько раз увеличивает время на её решение, то наиболее рациональным вариантом будет расчет конструкции всего здания с применением увеличенной сетки КЭ для перекрытий, и нормальной сеткой для вертикальных элементов. Применение плотной сетки триангуляции с уменьшенными размерами ячеек рациональней выполнять для отдельно взятого

перекрытия, производя расчет в дополнительной программе «Плита» ПК Мономах-САПР. Преимущество применение уменьшенной сетки конечных элементов заключается в детальной проработке отдельных частей перекрытия (усилений зон продавливания плиты, кромок технологических и конструктивных проемов, консольных частей).

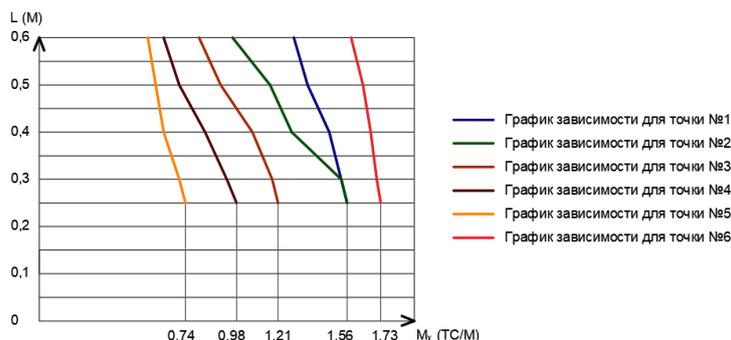


Рис.4. График зависимости величины изгибающего момента от размера сетки

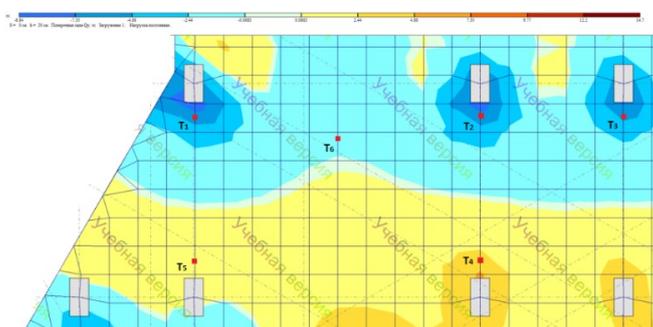


Рис.5. Мозаика поперечных сил вдоль оси Y при шаге триангуляции 0,6 м

Таблица 2

Значения поперечных сил от величины сетки КЭ

Размер сетки КЭ	Значение поперечной силы (тс) в точке №:					
	0,6 м	-3,66	-3,78	-3,58	+3,54	+1,32
0,5 м	-3,89	-4,06	-3,82	+3,78	+1,56	-0,22
0,4 м	-4,17	-4,34	-4,07	+3,99	+1,73	+0,05
0,3 м	-4,36	-4,58	-4,32	+4,15	+1,85	+0,21
0,25 м	-4,42	-4,62	-4,38	+4,19	+1,91	+0,25
Разница значений (прирост поперечной силы относительно первого значения)	25,17%	24,34%	26,81%	19,49%	44,7%	47,26%

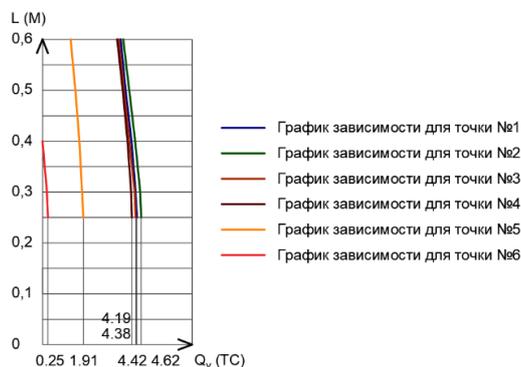


Рис. 6. График зависимости величины поперечной силы от размера сетки

Выводы. Точность расчета строительных конструкций с помощью метода конечных элементов в значительной мере зависит от правильного выбора типов и размеров КЭ. Создание конечно-элементной модели непосредственно в программном комплексе Мономах является довольно простым, полуавтоматическим процессом. Возможность импорта готовой схемы из графических

программ значительно упрощает процесс построения расчетной схемы здания, особенно при сложной конфигурации несущих элементов.

В ходе проведенных исследований было выяснено, что выбор плотности сетки при расчете перекрытия оказывает заметное влияние на точность расчета методом конечных элементов. При сгущении сетки результаты численного расчета уточняют значения усилий в некоторых областях, увеличивая их значения более чем в полтора раза. На практике применение более точных расчетов элементов строительных конструкций поможет более правильно подобрать значения армирования в железобетонных конструкциях. Реальное же применение методов точного расчета во-первых, не дадут существенного выигрыша в стоимости строительных элементов, так как значения нагрузок при задании исходных данных подвергаются уточнению многочисленными коэффициентами запаса, что увеличивает расчетные значения армирования, во-вторых, значительно затруднят изготовление, сборку и монтаж армирующего скелета здания, за счет введения большего количества типоразмеров элементов, что в свою очередь увеличивает сроки производства работ и затраты на них.

#### Список литературы

1. Барабаш М. С., Палиенко О. И., Медведенко Д. В. Программный комплекс САПФИР – основа BIM-технологий. М.: АСВ, 2012. 56 с.
  2. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможностей анализа. М., 2007. 595 с.
  3. ПК «ЛИРА-САПР» 2016. Проектирование и расчет строительных конструкций. URL: [liraland.ru/lira/](http://liraland.ru/lira/)
  4. Русаков А. И. Учет размера конечного элемента оболочки при расчете арматуры монолитных плит перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 8. С. 57–60.
  5. Гольшев К. И. Рекомендации по усилению монолитных железобетонных конструкций: справ. пособие. Киев: Будивельник, 1985. С. 314–317.
  6. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 2012.
  7. Шимановский А. О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики: учеб. – метод. Пособие для студентов технических специальностей / А. О. Шимановский, А. В. Путято; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 61с.
  8. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона / А. С. Городецкий [и др.]. – Киев: издательство «Факт», 2004. – 106 с.
- УДК 624.072.2

## РАСЧЁТ БАЛОК ТРИБУН ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАСЧЁТНОЙ СХЕМЫ В ПРОЦЕССЕ ВОЗВЕДЕНИЯ

*Д. Д. Виноградов, О. Б. Завьялова*  
*Астраханский государственный*  
*архитектурно-строительный университет*  
*(г. Астрахань, Россия)*

Расчёт сооружений с учётом изменения расчетной схемы в процессе возведения позволяет более точно показать действительную работу элементов. Приведен пример изменения расчетной схемы балки трибун стадиона в процессе её монтажа.

**Ключевые слова:** расчёт, анализ, изменение расчётной схемы.

The calculation of structures, taking into account changes in the design scheme during the construction process, allows you to more accurately show the actual operation of the elements. An example of a change in the design scheme of the stadium stands during the installation process is given.

**Keywords:** calculation, analysis, change in the design scheme.

В последние годы учёные и проектировщики стали уделять большое внимание учёту истории возведения зданий и сооружений, так как в процессе строительства реальная работа конструкций может сильно отличаться от принятой в расчётной схеме. Особенно важную роль здесь играет изменение условий опирания несущих конструкций в ходе выполнения монтажных работ. Разработчики ведущих программных комплексов, применяемых в России (SCAD, STARK, ЛИРА), предлагают использование специальных программ, учитывающих последовательность монтажа. Однако применение этих программ пока не вошло в опыт проектирования, в основном, из-за недопонимания сути проблемы.

Рассмотрим пример. При расчёте балок трибун зрелищных сооружений проектировщики, как правило, принимают расчётную схему этой конструкции в виде многопролётной неразрезной балки, находящейся под действием равномерно распределённой нагрузки. Между тем, неразрезной эта балка будет только при условии ванной сварки верхней арматуры балок смежных