

# ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ И АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ В СИСТЕМЕ

# SCAD Office

## Модели металлокаркасов

**В** этой статье мы рассмотрим подходы к построению расчетных моделей металлокаркасов на примере цеха непрерывной разливки стали. Не вдаваясь глубоко в конструктивные подробности, приведем основные характеристики здания:

1. Здание двухпролетное (25+31,5)х94 м.
2. Высота до низа несущих конструкций покрытия – 38,5 м.
3. Высота по коньку фонаря – 47,6 м.
4. Крановое оборудование – подвесные краны грузоподъемностью 10 тонн и мостовые краны грузоподъемностью 125 и 400 тонн.
5. Часть каркаса здания ниже подкрановых балок состоит из двухветвевых колонн.
6. Подкрановые балки коробчатого сечения.
7. На подкрановые балки опираются продольные фермы, к которым присоединяются поперечные фермы.

Общие виды расчетной модели здания в различных проекциях (в том числе и с отображением сечений элементов) представлены на рис. 1.

Рассмотрим краткое описание расчетной модели, а затем более подробно остановимся на способах моделирования и расчета двухветвевой колонны.

**В настоящее время достаточно остро ощущается недостаток в литературе, посвященной практическим приемам построения расчетных моделей с использованием метода конечных элементов и, соответственно, использованию программных продуктов, реализующих этот метод. С другой стороны, развитие и внедрение средств автоматизации проектирования (в том числе расчетов) с неизбежностью приводит к появлению новых – зачастую оригинальных и неожиданных – подходов к решению, казалось бы, стандартных и давно всем известных задач. Надеемся, эта статья станет далеко не последней в серии материалов, посвященных практическим приемам и технологиям построения расчетных моделей и анализа результатов в среде программного комплекса SCAD Office. Приглашаем к разговору инженеров-практиков, использующих систему SCAD и желающих поделиться или обменяться опытом.**

Модель содержит 11298 узлов, 13701 элемент, 65718 неизвестных и 69 загрузений. Время полного (статика, РСУ, комбинации, эквивалентные напряжения) расчета мультифронтальным методом на компьютере с процессором Pentium IV, 1,8 ГГц и 744 Мб ОЗУ составляет 21,35 мин., при этом выбор РСУ в системе SCAD осуществляется всего за 8 мин., что, на наш взгляд, очень бы-

стро и говорит о продуманности алгоритмов, а также корректности их программной реализации, учитывая достаточно большое количество загрузений. Предвидя вопросы о целесообразности построения пространственных моделей производственных зданий, отметим следующее:

1. Указанная модель строилась поэтапно сверху вниз. Вначале была построена и рассчитана модель

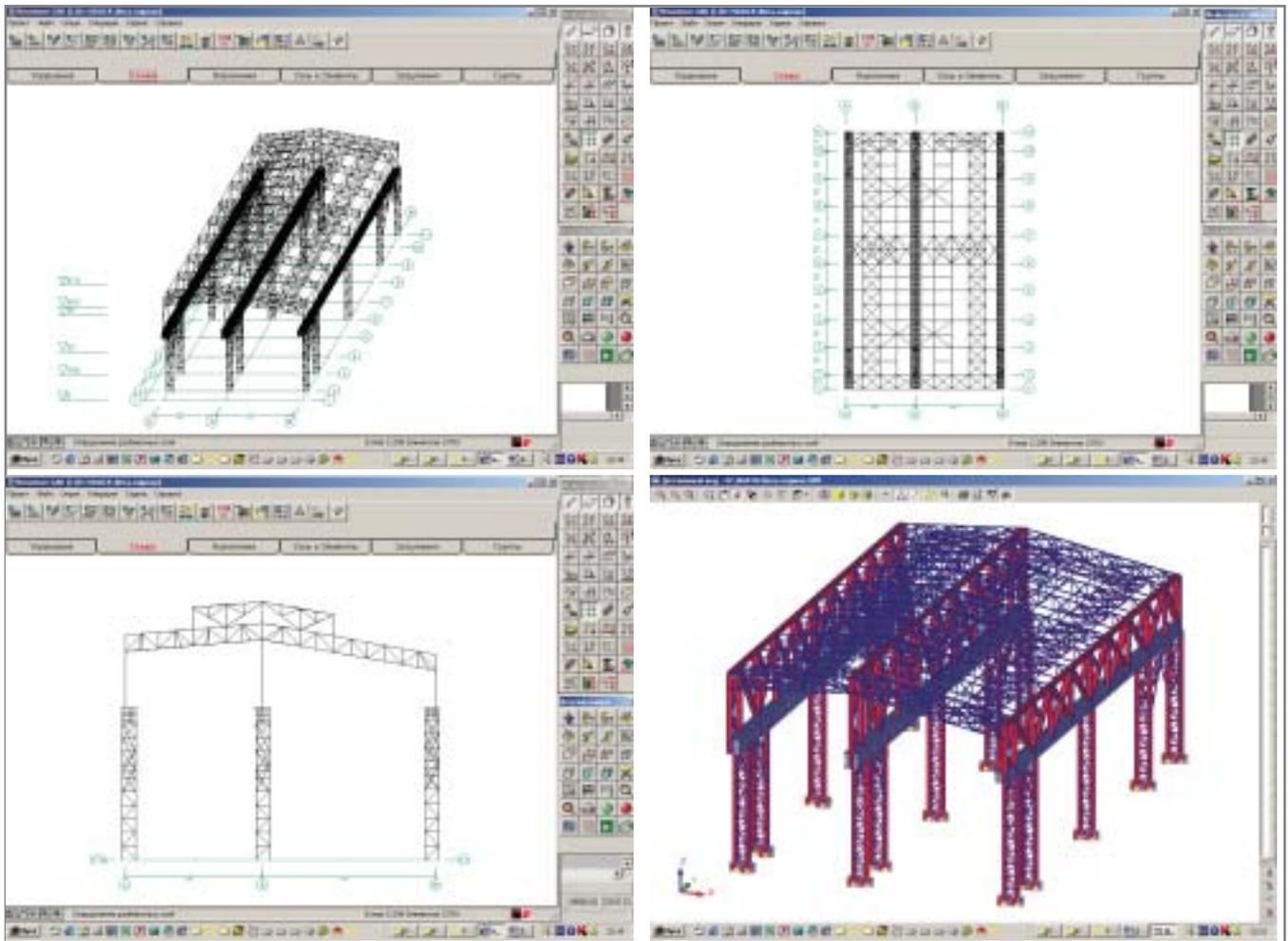


Рис. 1. Общие виды расчетной модели

поперечной фермы покрытия, затем модель поперечной рамы и лишь после этого строилась модель всего здания.

2. Пространственные модели зданий из металлокаркасов имеет смысл применять только при наличии в таком здании кранового оборудования. Модель позволяет учитывать включение в работу всего здания при воздействии тормозных нагрузок (кстати, об этом говорится во многих книгах, посвященных расчетам и проектированию металлических конструкций). На рис. 2 представлена картина деформированного состояния при воздействии тормозной крановой нагрузки на поперечную раму по оси 6 (отчетливо видно включение в работу всего каркаса здания за счет связей по покрытию и жесткости подкрановых балок).
3. При отсутствии крановых нагрузок и воздействии в поперечном

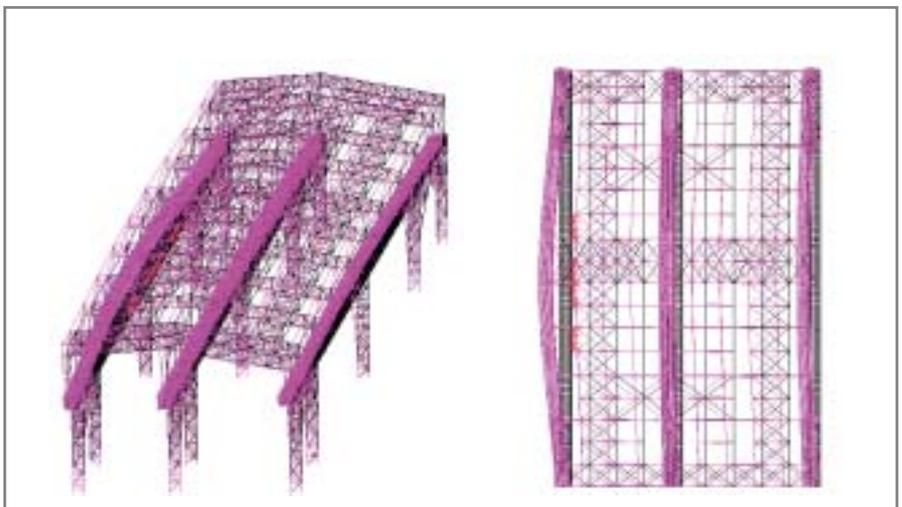


Рис. 2. Картина деформированного состояния здания при воздействии тормозной крановой нагрузки вдоль оси 6

направлении только ветровой нагрузки все рамы работают одинаково. Это позволяет ограничиться расчетом серии плоских моделей, отдельно рядовой рамы,

рамы фахверка и связевого блока в продольном направлении.

Все несущие конструкции, кроме подкрановых балок, смоделированы стержневыми элементами 5-го типа

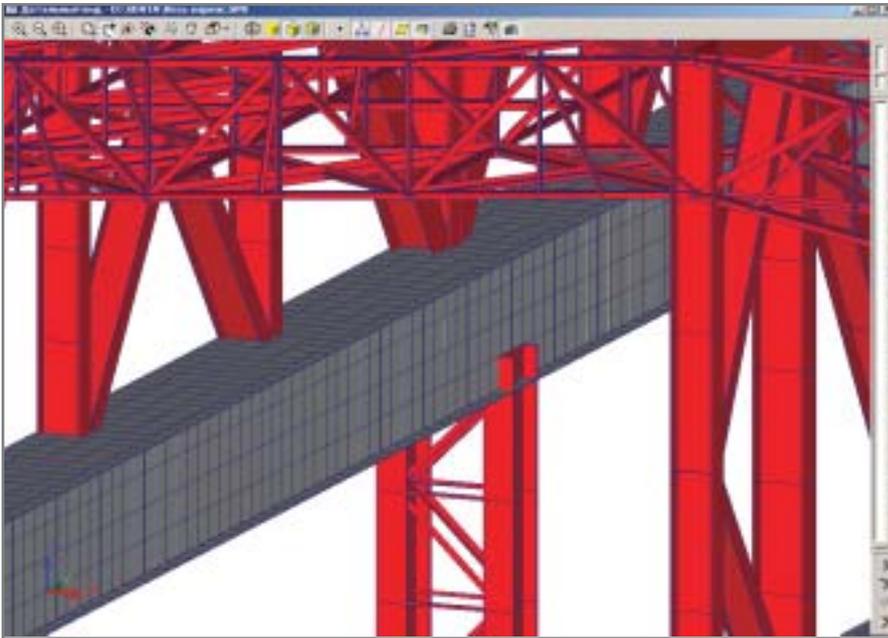


Рис. 3. Зона стыка подкрановой балки с колонной

(пространственные стержни), а решетка колонн — элементами 4-го типа (стержни пространственных ферм). Подкрановые балки смоделированы оболочечными элементами 44-го типа, что позволяет учесть реальные размеры подкрановой балки сечением 2х3 метра из листовой стали толщиной 30 мм. Зона стыка под-

крановой балки с колонной показана на рис. 3.

Следует заметить, что в данном случае такой подход оказывается наиболее эффективным, поскольку позволяет напрямую анализировать напряжения в оболочках, используя различные теории прочности. Возможность вывода напряжений в MS Excel обеспечивает очень быстрый поиск наиболее нагруженных элементов. Полученная с помощью SCAD цветографичес-

кая картина распределения нормальных напряжений в подкрановой балке представлена на рис. 4. Классический для строителей подход — моделирование стержнями — вызывает затруднения как при построении расчетной модели, адекватной реальности, так и при анализе результатов: к напряжениям приходится переходить "вручную", через M, N, Q, что не только неудобно, но и сопряжено с риском совершения ошибок. Несколько отступая от рассматриваемой модели, отметим также, что использование оболочечных элементов позволяет с помощью модуля устойчивости, реализованного в системе SCAD, решать задачи потери устойчивости плоской формы изгиба сечений любой формы. Подобный расчет через формулы СНиП практически невозможен ввиду отсутствия данных по коэффициенту  $\phi_b$ .

Перейдем к рассмотрению модели двухветвевой колонны поперечной рамы, изображенной на рис. 5, и возможностям ее расчета с помощью системы SCAD.

Прежде чем выбрать способ построения расчетной модели в SCAD, необходимо определиться со следующими вопросами:

- Какие виды проверок следует выполнить при расчете того или иного элемента конструкции?
- Какие виды проверок могут быть автоматически реализованы в системе SCAD?<sup>1</sup>
- Какие виды проверок придется выполнять "вручную" или с помощью программ, работающих по

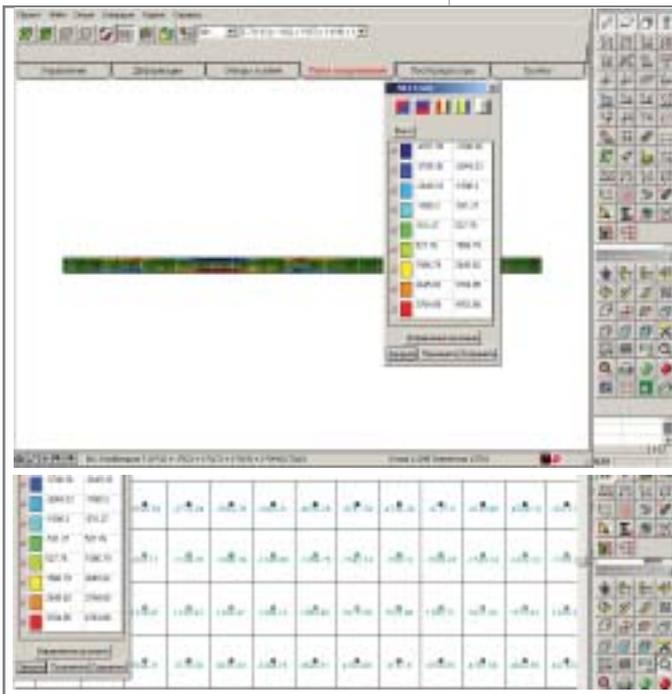
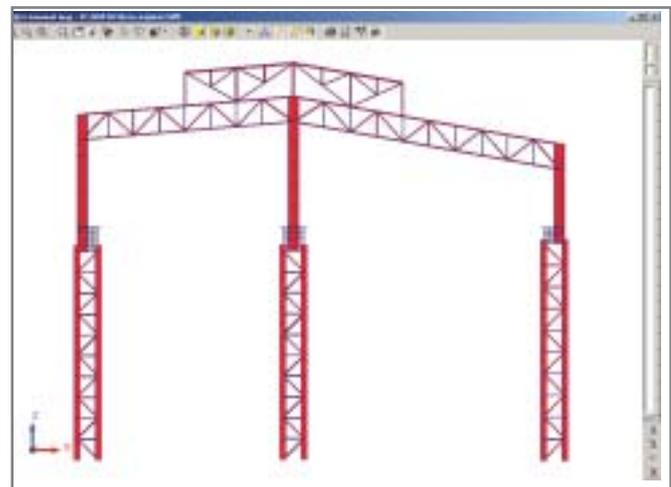
Рис. 4. Фрагмент цветowego изображения напряжений  $N_x$  в стенке балки в центрах конечных элементов

Рис. 5. Поперечная рама каркаса

<sup>1</sup>Для этого нужно внимательно ознакомиться с главой 17 Руководства пользователя, где четко прописан набор проверок по СНиП II-23-81\*, реализуемых в модуле проверки несущей способности стальных сечений.

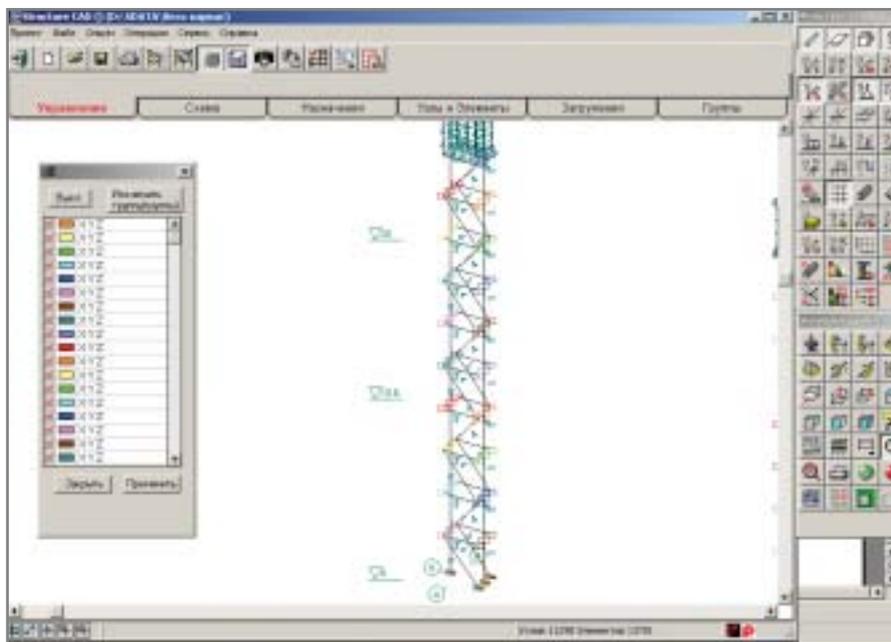


Рис. 6. Фрагмент расчетной модели колонны

принципу инженерного калькулятора (например, "Кристалл"), и какие для этого понадобятся исходные данные?

Только получив ответ на все эти вопросы, следует приступать к построению расчетной модели или серии моделей, каждая из которых учитывает особенности рассчитываемого элемента конструкции.

Сначала подробнее рассмотрим устройство модели двухветвевой колонны, а затем покажем, какие виды проверок эта модель закрывает автоматически, и проведем сравнение с классическим подходом, представленным во всех учебниках по металлоконструкциям. На рис. 6 показан фрагмент модели с отображением типов конечных элементов, закреплений и объединений перемещений в узлах (к сожалению, рамки журнальной статьи не позволяют рассмотреть порядок построения такой модели).

Модель устроена следующим образом:

1. Колонна смоделирована не в виде одного стержня, а так, как она выглядит в реальности: в виде двух ветвей и решетки.
2. Ветви колонны смоделированы стержневыми элементами 5-го типа с расстоянием между ними, равным расстоянию между центрами тяжести ветвей (2,5 м). При этом обе ветви представлены в виде сварных двутавров, задан-

ных параметрическим способом назначения жесткостных характеристик. В реальности внешняя ветвь имеет сечение швеллера, но ее пришлось задавать эквивалентным по площади двутавром, поскольку в системе не реализована автоматическая проверка прочности параметрически заданных швеллеров.

3. Решетка смоделирована стержневыми элементами 4-го типа (элементы пространственной фермы). При этом наличие в узлах элементов 4-го типа только поступательных степеней свободы автоматически обеспечивает шарнирное присоединение элементов решетки к элементам ветвей. Следует отметить, что для

моделирования решетки вполне возможно использовать и элементы 5-го типа, но при этом придется задавать шарниры в узлах элементов решетки.

4. Из соображений наглядности построения и визуализации модели элементы решетки разнесены от элементов ветвей на некоторое условное расстояние, принятое в данной модели равным фактическому расстоянию от оси колонны до оси решетки. Для обеспечения совместности деформаций узлы решетки объединены в группы объединения перемещений по поступательным степеням свободы. Решетка выполнена из уголка, заданного в расчетной модели путем выбора из сортамента металлопроката.
5. В модели, использованной для расчета на прочность и устойчивость, нижние узлы ветвей и решетки закреплены по всем направлениям.
6. Для расчета нагрузок на фундаменты в виде  $M$ ,  $N$ ,  $Q$  от всей колонны приходится использовать еще одну модель, в которой добавляются два горизонтальных элемента (на рис. 7 это элементы № 13723 и 13724) и один вертикальный (элемент № 13729 на рис. 7), расположенный строго по центру тяжести всей колонны с жесткостью заведомо большей, чем жесткость колонны. Среди инженеров, использующих такой подход при моделировании двухветвевых колонн, этот вертикальный элемент получил название "пенёк".

В таблице представлен требуемый перечень проверок для двухветвевой

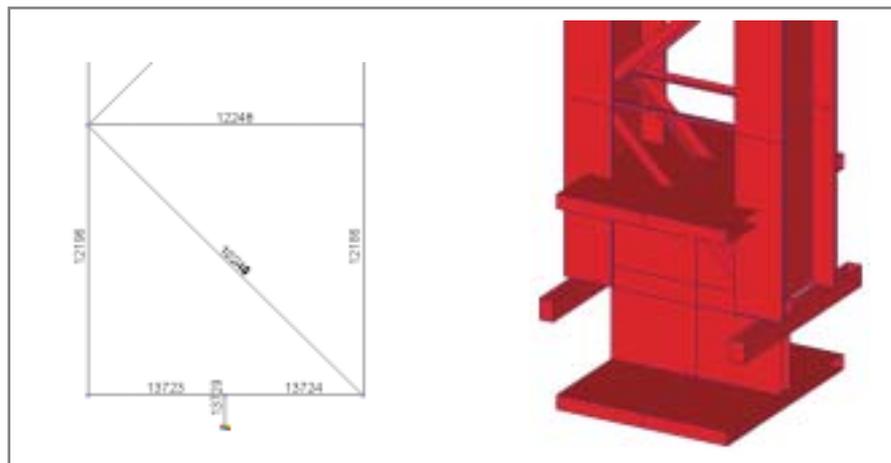


Рис. 7. Фрагмент расчетной модели колонны для получения нагрузок на фундаменты

## Сравнение степени автоматизации при различных способах построения расчетных моделей

Вид работ или проверки	Степень автоматизации расчета при использовании модели № 1	Степень автоматизации расчета при использовании модели № 2
1 Задание жесткостных характеристик элементов	Полная автоматизация путем выбора сечения из каталога металлопроката или задания с помощью параметрических сечений	Расчет приведенных жесткостных характеристик "вручную" или с помощью конструктора сечений, с последующим их численным заданием
2 Проверка по деформациям	Полная автоматизация	Полная автоматизация
3 Проверка прочности, устойчивости ветвей между узлами решетки и устойчивости всей колонны из плоскости изгиба	Полная автоматизация	Получение РСУ в виде М, N, Q с последующей "ручной" проверкой прочности и устойчивости
4 Проверка прочности и устойчивости элементов решетки от действующих нагрузок	Полная автоматизация	Получение РСУ в виде М, N, Q с последующим "ручным" расчетом усилий в элементах решетки и "ручной" проверкой их прочности и устойчивости
5 Проверка предельной гибкости ветвей и элементов решетки	Полная автоматизация	Полностью "ручной" расчет или расчет с использованием программы "Кристалл"
6 Проверка прочности решетки на Q <sub>н</sub> в соответствии с п. 5.8 СНиП II-23-81*	Полностью "ручной" расчет	Полностью "ручной" расчет
7 Проверка общей устойчивости двухветвевой колонны в плоскости изгиба как целого стержня	Полностью "ручной" расчет по значениям РСУ, полученным при расчете нагрузок на фундаменты, и расчетной длине, рассчитанной по СНиП	Полностью "ручной" расчет по значениям РСУ и расчетной длине, рассчитанной по СНиП

колонны и сопоставлена степень автоматизации работ при подходе к моделированию, описанном в этой статье, и при классическом подходе к построению модели в виде стержня с приведенными жесткостными характеристиками. Сравнимые модели показаны на рис. 8.

Вывод напрашивается сам собой. При грамотном подходе к разработке технологий создания расчетных моделей в системе SCAD возможно существенное сокращение сроков выполнения расчетов и повышение их

достоверности. Под грамотным подходом здесь следует понимать более полное и продуманное использование возможностей, предоставляемых программным комплексом...

Мы почти ничего не сказали об интеграции системы в общий процесс проектирования и взаимодействии SCAD с другими системами (в первую очередь – с программами геометрического моделирования). Эта проблема, на наш взгляд, очень актуальна и вполне может стать темой одной из следующих статей.

*Андрей Теплых,  
ведущий конструктор  
инжинирингового центра  
ЗАО «Группа компаний  
"Электрощит-ТМ-Самара"»  
E-mail: ATeplih@electroshield.ru  
Тел.: (8462) 76-8831*

*Анатолий Маляренко,  
директор ООО "СКАД СОФТ"  
E-mail: scad-soft@mtu-net.ru  
Тел.: (095) 267-4076*

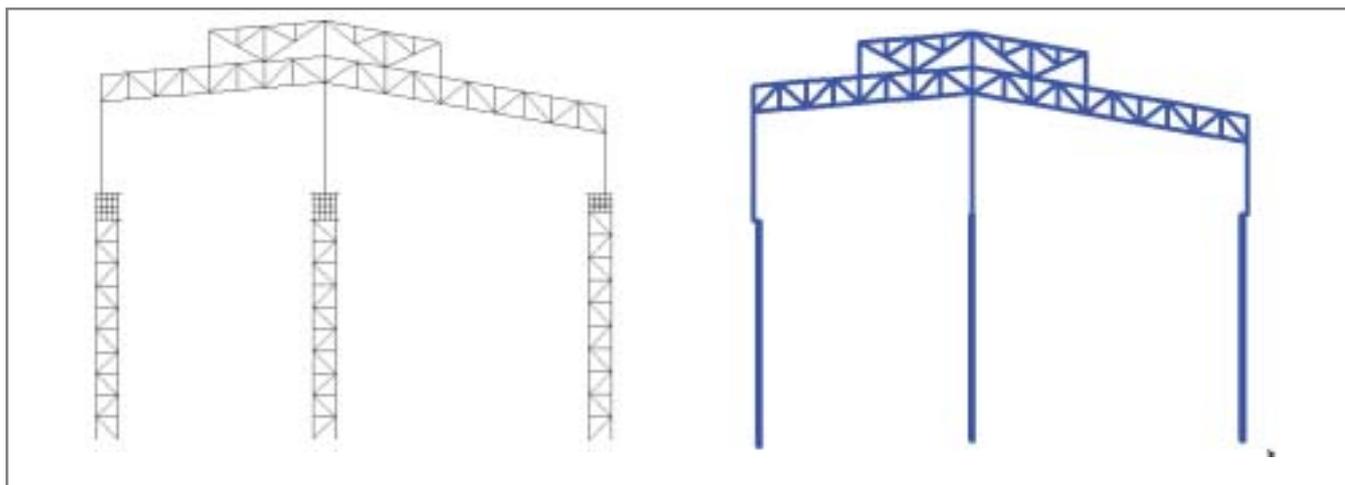


Рис. 8. Две модели для расчета колонн. Модель № 1 (слева) представлена в этой статье; модель № 2 – классическая