

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донской государственный технический университет»

Утверждено на заседании кафедры
технической механики
6 марта 2021 г.

КУРС ЛЕКЦИЙ
СПЕЦКУРС ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ

для самостоятельной работы для обучающихся заочной формы обучения по
программам подготовки: 08.03.01 Все программы ПГС

Авторы:

д.т.н., проф. Панасюк Л.Н.,
К.т.н., доц., Кравченко Г.М.,
К.т.н., доц., Труфанова Е.В.

Ростов-на-Дону
2021

Оглавление

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
<u>1 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (САПР) В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ..</u>	<u>3</u>
1.1 КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ САПР	3
1.2 САПР АРХИТЕКТУРНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	3
1.3 САПР РАСЧЕТОВ НА ПРОЧНОСТЬ	6
1.4 МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	7
1.5 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МКЭ	16
<u>2 ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ МКЭ-КОМПЛЕКСОВ</u>	<u>22</u>
<u>3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</u>	<u>31</u>

1 Системы автоматизированного проектирования (САПР) в строительстве

1.1 Классификация систем САПР

По своему назначению САПР в строительстве подразделяется на :

- архитектурно – планировочные и дизайнерские ИС,
- системы расчета сооружений на прочность, жесткость и устойчивость,
- системы подготовки конструкторской документации,
- системы проектирования внутренних сетей,
- системы подготовки проектно-сметной документации,
- системы подготовки документации на тендер,
- ИС технологии и организации производства.

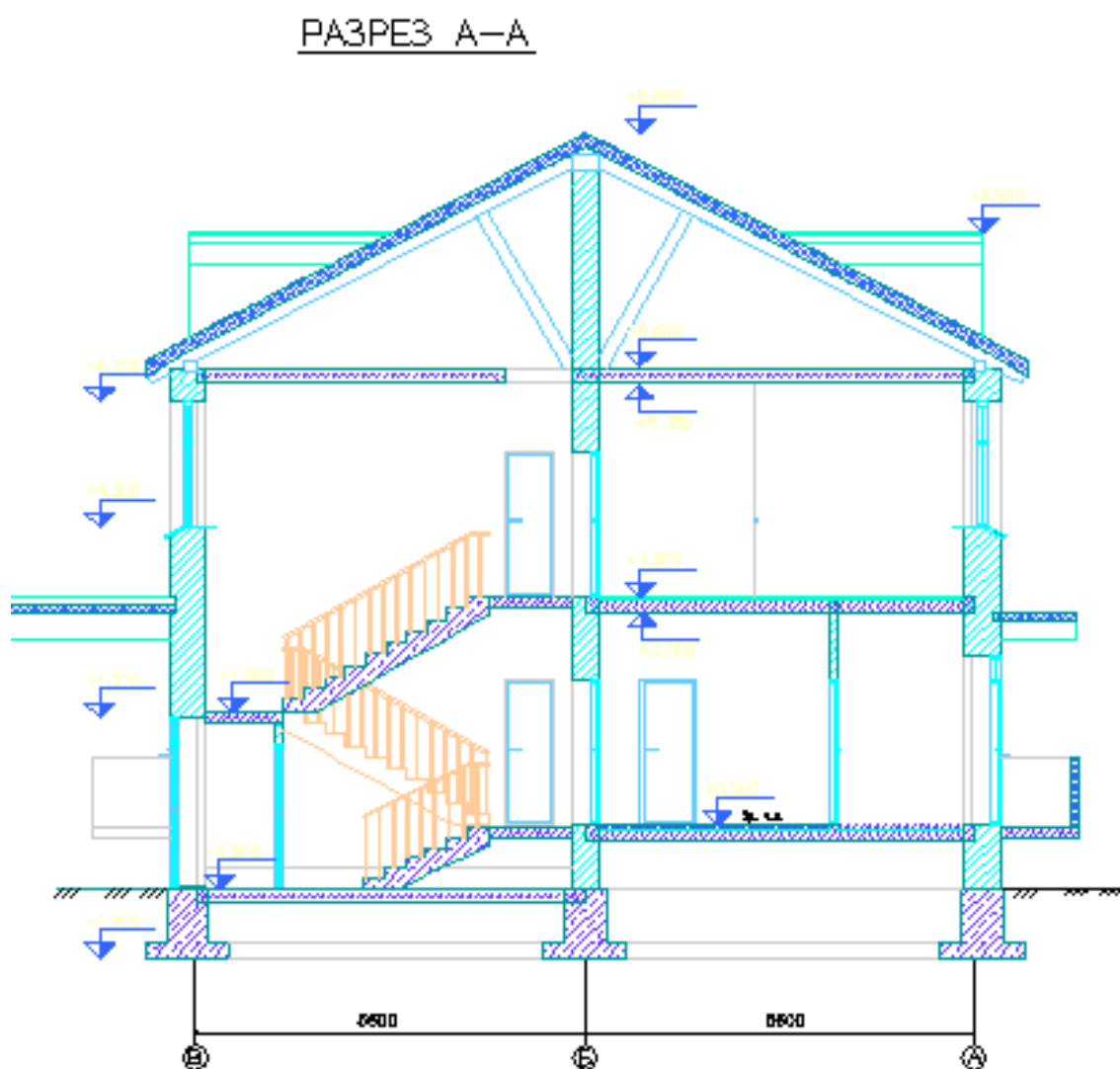
1.2 САПР архитектурного назначения

Архитектурно-планировочное направление САПР достаточно слабо было развито в СССР. Это объяснялось практическим отсутствием качественной материальной базы – графопостроителей, графических дисплеев. К моменту появления более-менее качественных и доступных графических аппаратных средств начали бурно развиваться персональные компьютеры. Поэтому в настоящее время в России используются локализованные версии западных производителей, такие как: ABIS (ABIS KROM, Австрия), speedikon-A (IEZ, Германия), ArchiCAD. Кроме того, наиболее активно используется, пожалуй, система общего назначения AutoCAD, дополненная различными прикладными инструментами для архитектора. Однако использование специализированных систем все-таки предпочтительнее, т.к. они базируются на понятии *компьютерная модель здания* (КМЗ). Здесь пользователь «составляет» модель здания на

компьютере как бы из элементов строительного конструктора – стен, окон, дверей, лестниц, крыши. Непосредственно чертежная документация автоматически составляется программой в заданном пользователе формате. Из одной и той же компьютерной модели можно автоматически построить различную чертежную документацию: - планы помещений, кладочные планы стен, аксонометрические и перспективные проекции и разрезы. Кроме того, программы могут автоматически составить спецификацию помещений, подсчитать требуемый объем материалов и строительных работ. Для примера приведена иллюстрация перспективных проекций многоэтажного жилого здания, автоматически построенная программой speedikon-A по введенным планам этажей.



Из российских разработок наибольший интерес представляет программа ArCon фирмы EuroSoft (Москва). Следует отметить, что в ArCon разработана качественная система фотореалистичной визуализации трехмерных изображений («лучевая трассировка»). Сегодня эта система визуализации интегрирована и в немецкую САПР speedikon-A. На следующее иллюстрации приведен автоматически построенный разрез 2-х этажного здания и фотореалистичное изображение перспективы этого же объекта. Цвета на разрезе определяют толщины и типы линий, которыми они будут выводиться на чертеже.





1.3 САПР расчетов на прочность

Здания и сооружения являются неотъемлемой частью современной действительности. Сегодня, как и тысячи лет назад, невозможно представить себе жизнь и деятельность человека в отрыве от возводимых им зданий. Влияние искусственных сооружений на окружающую среду многообразно. Современные здания и сооружения – сложные объекты, начиненные большим количеством механизмов и систем обеспечения жизнедеятельности и функционального назначения, оказывающих определенное влияние на окружающую среду. Их можно рассматривать с разных планов: архитектурно – художественного, функционального, экологического. Однако во всех случаях красной линией проходит вопрос эксплуатационной надежности, к

которому традиционно относятся требования обеспечения прочности, жесткости и устойчивости объекта.

Опыт массового строительства с начала 60-х годов прошлого века показал, что эксплуатационную надежность зданий и сооружений невозможно рассматривать в отрыве от окружения: грунтового массива, построенных ранее объектов, транспортных и хозяйственных коммуникаций. Ведомственная разобщенность эмпирических исследований не позволяет сегодня не только ответить на множество вопросов в их взаимной связи, но и провести качественное планирование различных текущих работ. Кроме того, экспериментальные исследования различных сложных систем (например, транспортный поток – грунт – фундамент – здание) позволяют построить интегральную информацию, из которой сложно выделить причины и следствия различных эффектов. Наиболее полную картину поведения здания при различных воздействиях можно построить на основе аппарата математического моделирования.

Механико – математическая модель, адекватно отражающая основные особенности сооружения в его взаимосвязи с грунтом основания и рядом находящимися зданиями, позволяет при малых затратах получить адекватную информацию по широкому спектру проблем. Однако построение качественной модели сегодня представляет трудности как теоретического плана (например, построение корректных уравнений состояния определенной среды или контакта разных сред), так и реализации (т.е., методов получения решения сформулированной задачи).

1.4 Метод конечных элементов

Сегодня наиболее распространенным математическим аппаратом для численного моделирования поведения здания в комплексной постановке

«верхнее строение – фундамент - грунт» при различных видах воздействия является *метод конечных элементов* (МКЭ).

МКЭ позволяет рассматривать области со сложной топологией при разнообразных граничных условиях. Основная идея метода конечных элементов, как и всех сеточных (например, метода конечных разностей) и большинства прямых методов (Рунге, Бундса - Галеркина и т.п.), состоит в переходе от бесконечной системы дифференциальных уравнений в частных производных с граничными условиями к конечной системе алгебраических уравнений относительно конечного числа неизвестных, так или иначе отнесенных к пространственной сетке либо к системе базисных функций. Можно сказать, что метод конечных элементов в определенном смысле является синтезом сеточных и прямых методов, т.к. при использовании способа формирования коэффициентов системы уравнений, адекватного прямым методам, методика построения базисных функций основана на сеточном подходе. Благодаря этому метод сохраняет основные преимущества прямых методов (как то: возможность применения как исходной системы дифференциальных уравнений, так и соответствующих вариационных принципов, возможность интегрирования по всей пространственной области) и, вместе с тем, использует гибкие возможности сеточных методов для учета реальной геометрии рассчитываемого объекта и его фрагментов и граничных условий. Узлы сетки принадлежат рассматриваемой пространственной области и ее границе. После замены исходной пространственной области некоторой сеткой с конкретными параметрами аппроксимации говорят о **дискретизации** расчетной области.

В большинстве случаев при построении системы разрешающих уравнений используются приближенные зависимости для аппроксимации основных функций между соседними узлами сетки. Чем гуще пространственная сетка, чем меньше расстояние между ее узлами, тем выше

точность аппроксимации функций, тем точнее приближенное решение. Однако чем больше узлов сетки, тем выше порядок системы алгебраических уравнений, тем выше трудоемкость и время расчета и тем больше требуется ресурсов памяти компьютера для хранения массивов данных. Поэтому при использовании метода конечных элементов необходим компромисс при назначении дискретизации пространственной области. Сетка должна быть достаточно густой для получения приемлемого по точности решения, и вместе с тем ее размерность не должна превысить некоторого предельного значения, после которого использование этой дискретизации становится невозможным из-за высокой размерности системы. Сгущение обычно проводится не для всей сетки в целом, а в отдельных фрагментах, в которых поведение решения существенно зависит от степени дискретизации. Обычно это области, в окрестности которых приложена нагрузка, имеются границы зон с различными физико-механическими характеристиками (например, граница бетон - грунт), имеются различные геометрические особенности (углы, полости, отверстия и т.п.).

Метод конечных элементов основное развитие получил с середины нынешнего века. Первоначально два различных подхода - инженерный и математический - позднее слились в один общий, что имело огромное значение для его дальнейшего быстрого развития и широкого применения.

В настоящее время при решении задач статики используются три основных подхода МКЭ:

- **Прямой** - используется при решении относительно простых задач, имеет четкий иллюстративный характер,
- **Вариационный подход** (или метод Ритца в форме МКЭ) - основан на принципе стационарности некоторого функционала. Обычно используются функционалы Лагранжа, Кастильяно, Хеллингера - Рейснера, Ху - Васидзу. При решении инженерных задач

строительной механики наиболее часто используется вариационный принцип Лагранжа с перемещениями узлов сетки в качестве основных неизвестных.

- **Подход резидуума** (или метод Бубнова-Галеркина в форме МКЭ) представляет собой общий вид аппроксимации, базирующийся на дифференциальных уравнениях рассматриваемой задачи. Применяется обычно при решении таких задач, в которых трудно сформулировать вариационный принцип или такового не существует.

При решении задач механики грунтов, оснований и фундаментов методом конечных элементов рассматривается область конечных размеров. Как правило, расчетная область грунта представляется в виде параллелепипеда, размеры которого в плане больше, чем фрагмент фундаментной части здания, а по глубине захватывают деформируемый слой грунта. Это необходимо для снижения погрешности в окрестности конструкции здания, которая является следствием краевых эффектов. Грани параллелепипеда (кроме уровня дневной поверхности) закрепляются от перемещений. Наиболее густая сетка элементов составляется для области в окрестности фундаментной конструкции. На определенном расстоянии от нее размеры конечных элементов можно увеличить для снижения трудоемкости. Выбор размеров расчетной области и элементов проводится путем выполнения поверочных расчетов. Вначале проводится серия расчетов по увеличению размеров области до стабилизации решения, затем для области с назначенными размерами проводится сгущение сетки конечных элементов. Объем поверочных расчетов (т.е. быстрота нахождения приемлемой конечно-элементной модели) зависит от опыта и интуиции расчетчика.

Учитывая, что сетка конечных элементов связана не только с основанием и фундаментами, но и с верхним строением, можно сказать, что размерность задачи здесь будет весьма высокой. Размерность задачи существенно увеличивается из-за того, что необходимо сгущать сетку в области трещин, усиления и т.п. Однако пространственная задача обуславливает резкое увеличение порядка системы разрешающих уравнений. Следствием увеличения порядка является невозможность проведения расчетов на приемлемой по густоте сетке конечных элементов на современных компьютерах. Многие авторы используют достаточно эмоциональный термин «*проклятие размерности*».

Традиционные формы МКЭ предполагают формирование глобальной матрицы жесткости системы и ее последующее решение. Порядок систем уравнений в реальных задачах измеряется сотнями тысяч и миллионами неизвестных. Снижение порядка глобальной матрицы с помощью так называемого «суперэлементного» подхода далеко не всегда позволяет обойти ограничения на размерность задачи. Дело в том, что подходу «суперэлементов» по отношению к традиционному МКЭ присущи два недостатка. Первый заключается в ухудшении обусловленности матрицы жесткости ансамбля суперэлементов, что приводит к снижению точности решения. Второй связан с резким увеличением ширины ленты матрицы жесткости ансамбля суперэлементов. При этом теряются преимущества снижения порядка системы уравнений, так как зачастую для хранения матрицы меньшего порядка с увеличенной шириной ленты требуется больше ресурсов оперативной и внешней памяти компьютера, чем для стандартной матрицы жесткости.

Решение реальных нестационарных задач строительной механики в пространственной постановке практически невозможно традиционными методами. При решении нестационарных задач используются методы

«продолжения по параметру времени», иначе – шаговые методы решения нестационарных задач. Временной сегмент разбивается на ряд отрезков. По специальным формулам, уникальным для каждого метода, осуществляют переход от параметров НДС в начальный момент к первой точке временного разбиения. Затем производят аналогичный переход ко второй точке, используя в качестве начальных значения в первой точке и т.д. Количество шагов по времени может быть достаточно большим, и в пределах каждого шага решается задача, по трудоемкости и внешнему виду соответствующая некой квазистатической задаче. В результате общая трудоемкость процесса резко увеличивается.

Качественный скачок вычислительной техники и программных средств по расчету строительных конструкций методом конечных элементов (МКЭ) за последнее десятилетие привел к определенной революции в методах расчета. Если ранее основным недостатком расчетов была низкая точность определения усилий простейшими методами, не учитывающими взаимную работу отдельных конструктивных элементов, то сегодня можно моделировать достаточно сложные объекты с учетом взаимосвязи их отдельных фрагментов.

Потребности проектных, научно – исследовательских и промышленных организаций, в универсальных, достаточно быстрых и удобных для пользователя программах послужила импульсом к разработке различными фирмами пакетов прикладных программ конечно – элементногo анализа. К ним можно отнести известные продукты ANSYS и DesignSpace фирмы Ansys Corporation; Cosmos/DesignStar, Cosmos/Works фирмы Structural Research & Analysis Corporation; DesignWorks фирмы CADSI; АПИМ WinMachine Центра программного и научного обеспечения АПИМ; NASTRAN (NAsa STRuctural Analysis – анализ конструкций национального комитета

США по авионавтике и космическим исследованиям). Из программных средств, адаптированных к российским СНиП, известны комплексы StarKON фирмы EuroSOFT (Москва), Лира и Мономах производства НИИАСС (Киев). Из комплексов, в которых решается задача предельного равновесия в статической и динамической постановках с учетом реологии материала, определение «безопасного времени» функционирования конструкции или отдельного процесса воздействия на нее, известны комплексы «КЛЕН», «ПОЛЮС», «МИНОР» (РГСУ).

В комплексе StarKON впервые, пожалуй, решена задача комплексного проектирования по схеме «архитектурный проект» - «расчет» - «конструирование» - «выдача рабочих чертежей конструкций». В качестве архитектурного используется комплекс «speedikon» фирмы IEZ GmbH, работающий на платформах известных CAD – программ (AutoCAD, MicroStation). В качестве программы для расчета и определения/проверки сечений и армирования используется STARK ES. Комплекс может работать в совместно с программой ввода позиций ProFET. После расчета можно выполнять конструирование с автоматизированной подготовкой рабочих чертежей в системе AutoCAD.

Следует отметить, что широкое внедрение программных МКЭ-комплексов привело к упрощенному отношению к прочностным расчетам. Многие руководители придерживаются принципа: «Есть компьютер, программа – нажми кнопку и получи результат». Может быть, когда-нибудь вычислительная техника и программные средства и достигнут подобного уровня. Однако и сегодня использование современных программных и аппаратных средств не снижает требований к уровню подготовки специалиста.

Еще десятилетие назад расчет методом конечных элементов был доступен узкому кругу специалистов, достаточно досконально знавших и основы метода, и основные его «подводные камни» не только на уровне пользователя программных средств, но и на уровне программиста. Сегодня же интерфейс большинства МКЭ-комплексов удобен в такой степени, что эти программы могут использовать большинство проектировщиков, изучивших основы работы с Windows. При этом создается достаточно опасная иллюзорность того, что использовать МКЭ в расчетах может любой проектировщик, владеющий СНиП и компьютером. Но все дело в том, что знание СНиП (норм, определяющих внешние воздействия и методы назначения или проверки сечений по известным внутренним усилиям) недостаточно для качественного определения этих усилий даже с помощью имеющихся в распоряжении программных средств. На уровне обучения основы МКЭ только начинают давать в строительных ВУЗах (последние 10 - 15 лет), поэтому большинство проектировщиков просто не владеют основами метода.

Наиболее существенным «подводным камнем» метода является то, что МКЭ - приближенный метод. Приближенность метода определяется двумя факторами: качеством конечноэлементной модели (непосредственно погрешность метода и использованных типов КЭ – так называемое качество дискретизации модели), и качеством самой модели. Под этим понимается то, какими механико-математическими моделями моделировали те или иные конструктивные элементы и как учтено их сопряжение. Например, один и тот же элемент можно моделировать стержнем с определенными параметрами сечения (площадь, моменты инерции и т.п.), либо комбинацией пластин (здесь количество интегральных параметров меньше —только толщины элементов), либо трехмерной моделью. Плиту также можно моделировать либо оболочками различных постановок (тонкая плита, Рейснера, Власова),

либо объемной трехмерной моделью. Также существует множество различных моделей (постановок) для грунтового основания. Наиболее общими являются объемные постановки, т.к. в них не используются упрощающие гипотезы, априори определяющие характер деформирования системы. Все остальные упрощающие гипотезы заранее закладывают неустранимую погрешность расчета не только по числам, но и по качественному описанию процесса. Однако сегодня использование только объемных постановок практически невозможно. Поэтому пользователь, создавая исходную модель, должен достаточно ясно представлять погрешности, закладываемые им на стадии формулировки модели. Отметим, что в современных программных комплексах имеются средства построения модели на уровне конструктивных терминов, доступных конструктору и проектировщику, как то: *стены, колонны, балки* и т.д. Используя только эти средства при построении модели без анализа их сущности пользователь получает иллюзорную уверенность в том, что им построена достаточно корректная модель системы.

Не меньшее значение имеет и качество перехода при аппроксимации модели конечными элементами. Точность результатов существенно зависит от принятой конечно-элементной аппроксимации. Стандартными способами проверки качества является серия расчетов при разных степенях сгущения сетки в целом или в отдельных ее фрагментах. Достаточную опасность представляет тот факт, что сходимость результатов по напряжениям и усилиям более медленная, чем по перемещениям. Поэтому анализ качества конечно-элементной модели необходимо проводить не только по перемещениям, но и по усилиям. Некачественная сетка может давать недопустимую погрешность (в два и более раз), поэтому создание качественной сетки – достаточно трудоемкий процесс, требующий

определенной квалификации пользователя именно на уровне применения МКЭ.

Поэтому для уверенного использования метода необходимо иметь специальные знания и о его сути, и об основных постановках теории упругости (хотя бы теории упругости для линейных задач).

Достаточно ясно, что пользователь, научившийся вводить в компьютер текст, еще не является писателем или поэтом. Для этого необходимы специальные знания и талант. Уровень развития МКЭ и программных средств сегодня предъявляет аналогичные требования к расчетчику. Одного *механистического* владения программой не достаточно для решения реальной задачи, построение ее качественной модели – сложный творческий процесс.

1.5 Краткое описание программного комплекса МКЭ

Программный комплекс «КЛЕН» базируется на *агрегатном* принципе (или принцип *декомпозиции*) построения САПР. Основанный на использовании абстракций принцип декомпозиции применяется для разбиения программ на компоненты, которые затем объединяются для решения основной задачи. При этом использован частный тип абстрагирования – абстракция через спецификацию, т.е. в возможности серией разных алгоритмов получить конечный искомый результат.

При трансформации спецификаций в структуру системы существуют два подхода. Основное разделение проведено в *ориентированном на обработку* подходе, когда проведено разделение комплекса на ряд агрегатов на основе модульного подхода. Вместе с тем как внутри отдельных модулей, так и для связи данных между модулями, использована *ориентированная на данные* методология. А именно, использована концепция *объектно-ориентированного* программирования.

Обеспечение дружественного пользователю интерфейса достигнуто за счет использования возможностей визуального программирования и программирования, управляемого событиями. Ввод исходной информации осуществляется в интерактивном графическом режиме, когда пользователь «вычерчивает» схему конструкции с помощью системных указателей, а дополнительные текстовые и числовые данные вводятся в табличной форме. Процессы ввода и коррекции исходной информации не разделены между собой – в любой момент можно вводить новый фрагмент конструкции или исправлять ранее введенный блок.

Вывод результатов осуществляется в трех формах:

- графической (деформированные схемы, поля напряжений и перемещений в виде изолиний, графиков изменения параметров напряженно–деформированного состояния по временным и пространственным координатам),
- текстовой (табличная форма значений основных расчетных характеристик),
- интерфейс со стандартными программами Microsoft Office, т.е. переброска результатов расчета в программы Excel и Word, что позволяет пользователю использовать возможности этих программ для дополнительной обработки результатов.

В соответствии с предложенным алгоритмом комплекс разбит на ряд агрегатов, выполняющих полный расчет по отдельным логически завершенным этапам.

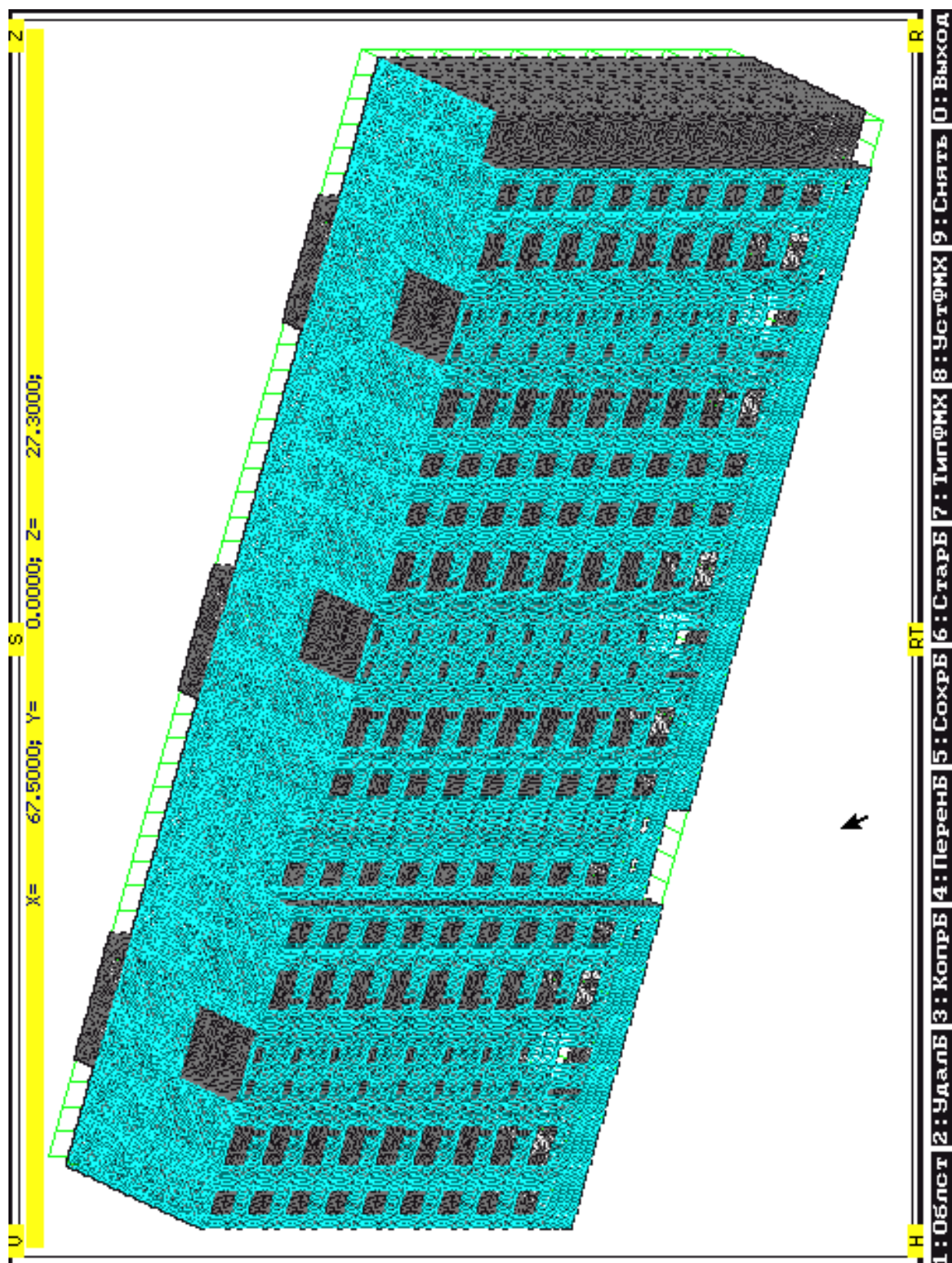
Основными являются следующие агрегаты:

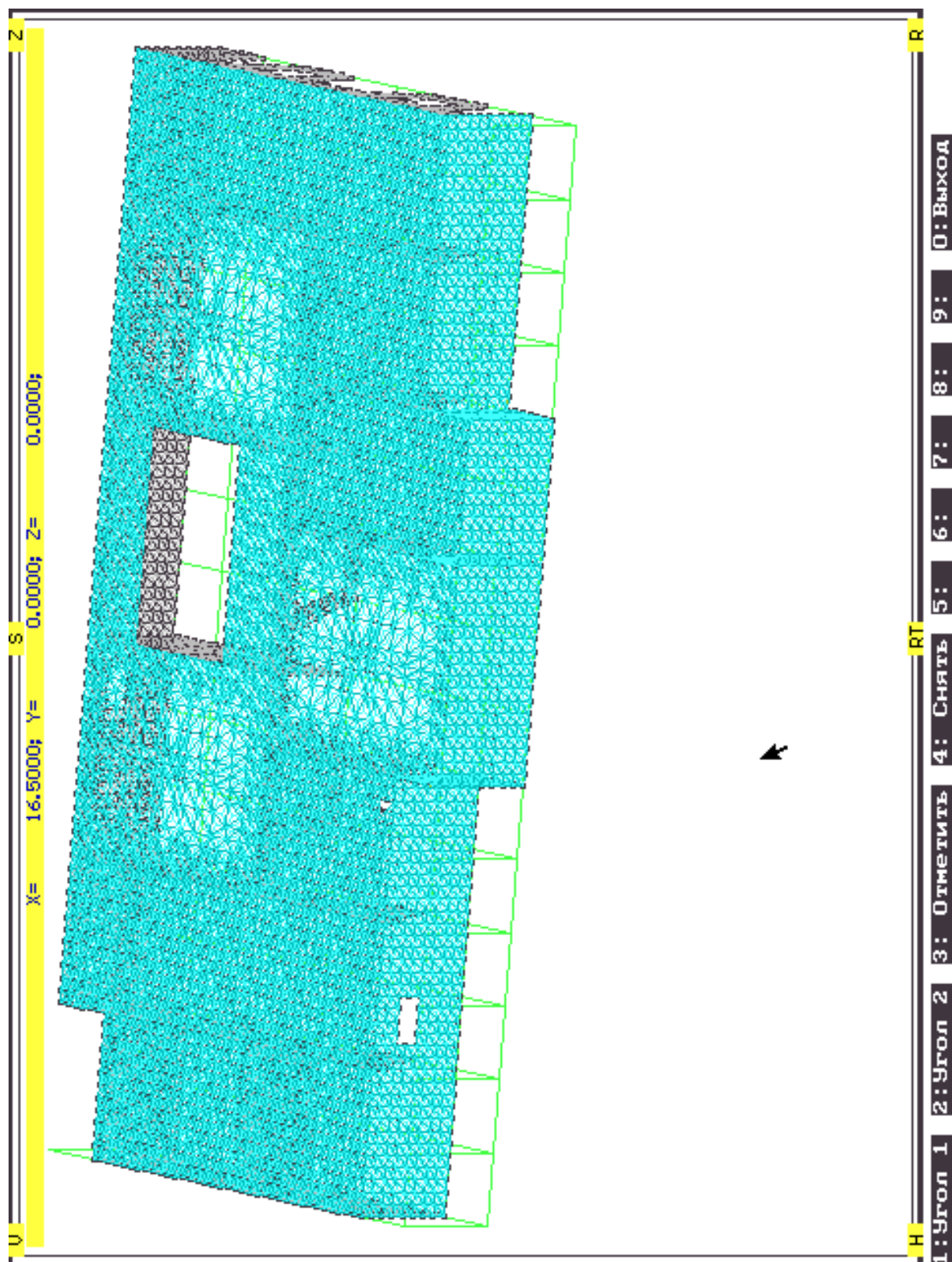
- ввод, коррекция и тестирование на наличие ошибок исходной информации,

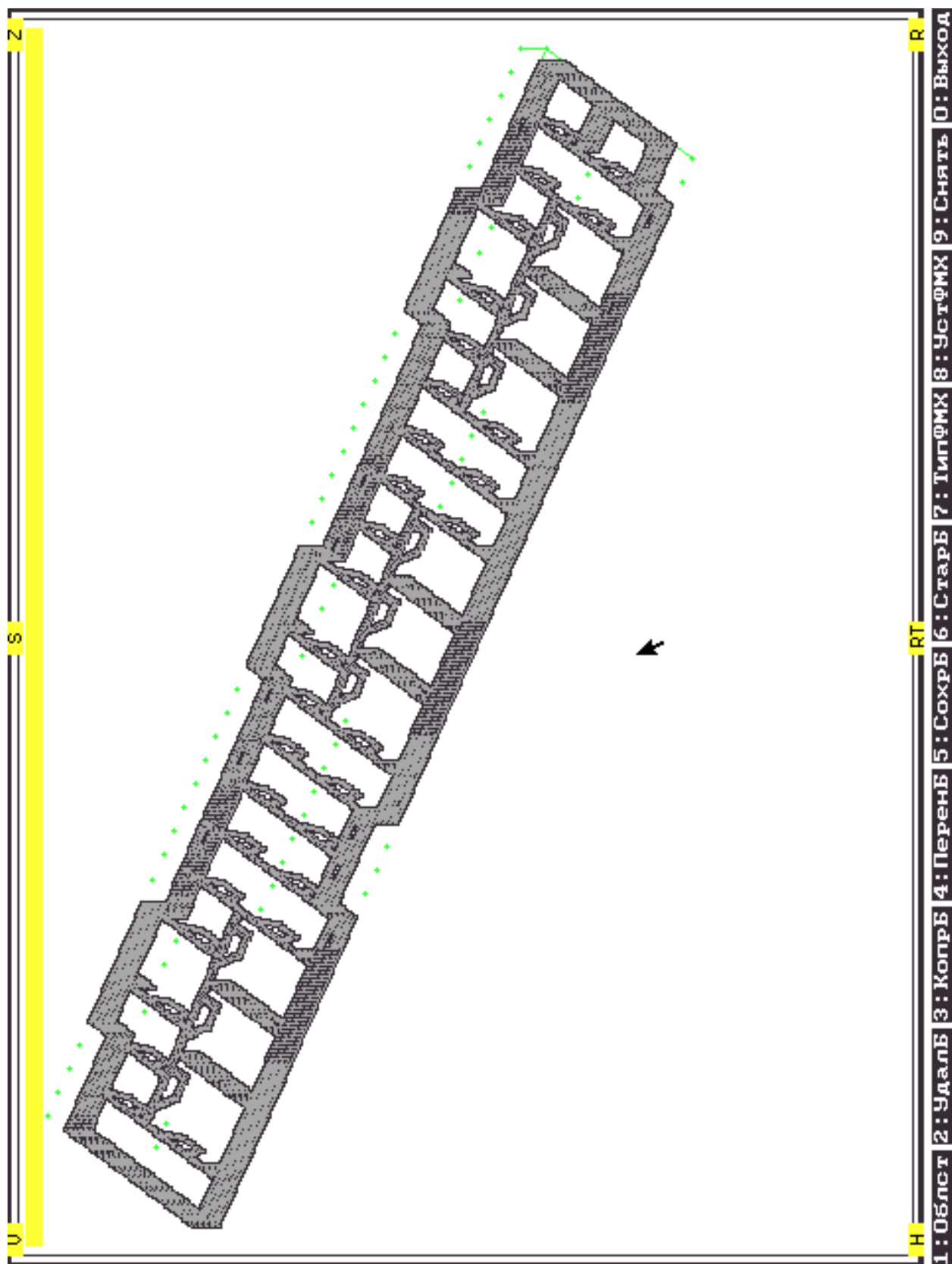
- статический расчет конструкций при различных этапах выравнивания,
- блок определения наиболее неблагоприятных состояний в различных фрагментах конструкции,
- эволюционный расчет на длительное воздействие с учетом накопления невосполнимых деформаций,
- тестовый динамический расчет при образовании линии отрыва,
- блок анализа результатов, который разбит на фрагменты анализа результатов от статических воздействий и с учетом длительного воздействия.

После получения основных результатов от расчета на базовые статические воздействия пользователь определяет группу их возможных сочетаний. Количество введенных групп определяет множество приведенных квазистатических нагрузок. В процессе проведения расчетов на длительное воздействие кроме групп нагрузок задается сочетание погодно – климатических факторов, т.е. закон изменения во времени зависящих от влажности параметров состояния. Для влажности предусмотрено задание ее изменения в течение года. Задание климатических факторов производится в табличных формах, поэтому можно задать произвольный характер их изменения, а не только часто используемые гармонические законы, которые не всегда адекватно отражают картину изменения температуры и влажности во времени. Это является дополнительным фактором, позволяющим приблизить модель к реальным условиям эксплуатации.

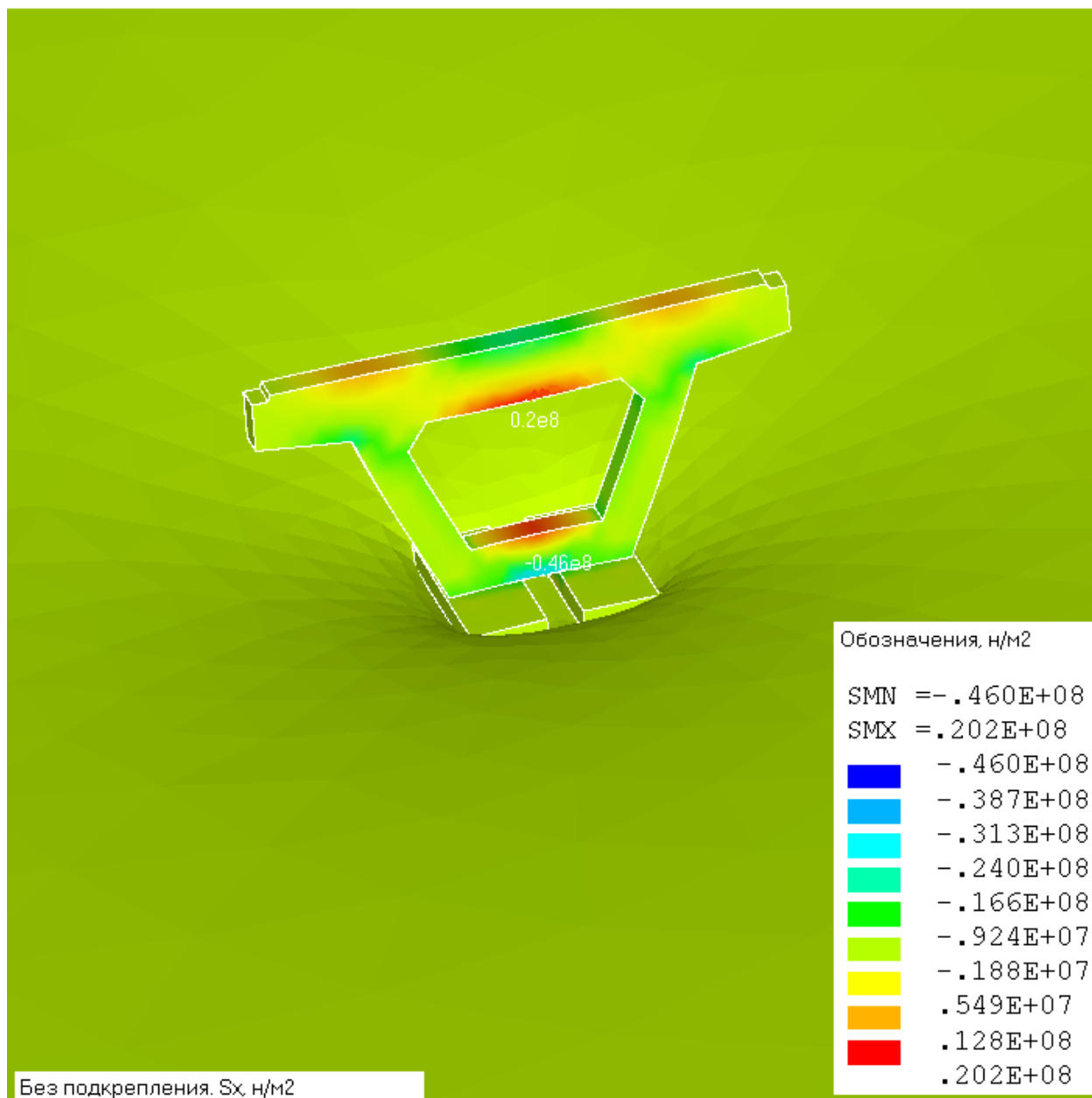
На следующих иллюстрациях показана МКЭ-модель 9-и этажного здания и ее фрагменты, подготовленные в комплексе КЛЕН.



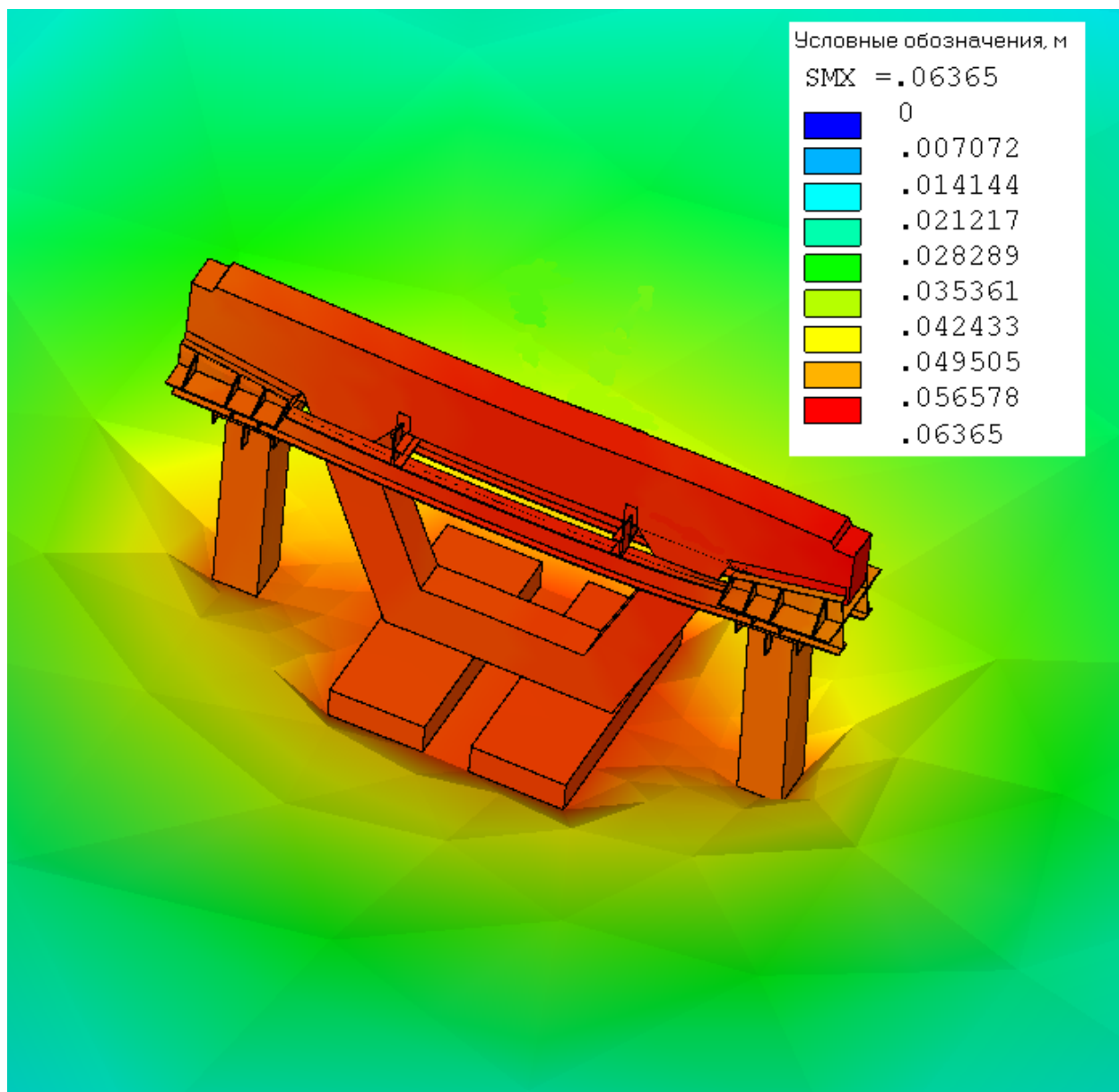




2 Примеры использования программных МКЭ-комплексов

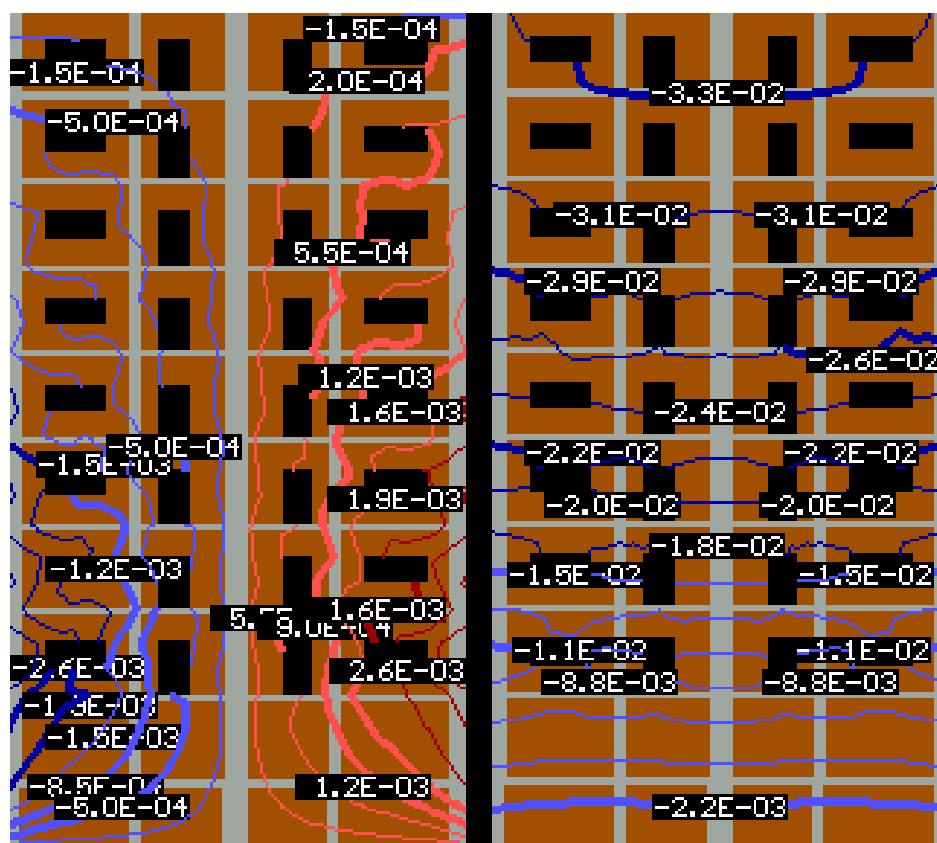


Пример расчета конструктивного элемента цоколя, опирающегося на свайный ростверк – комплекс ANSYS

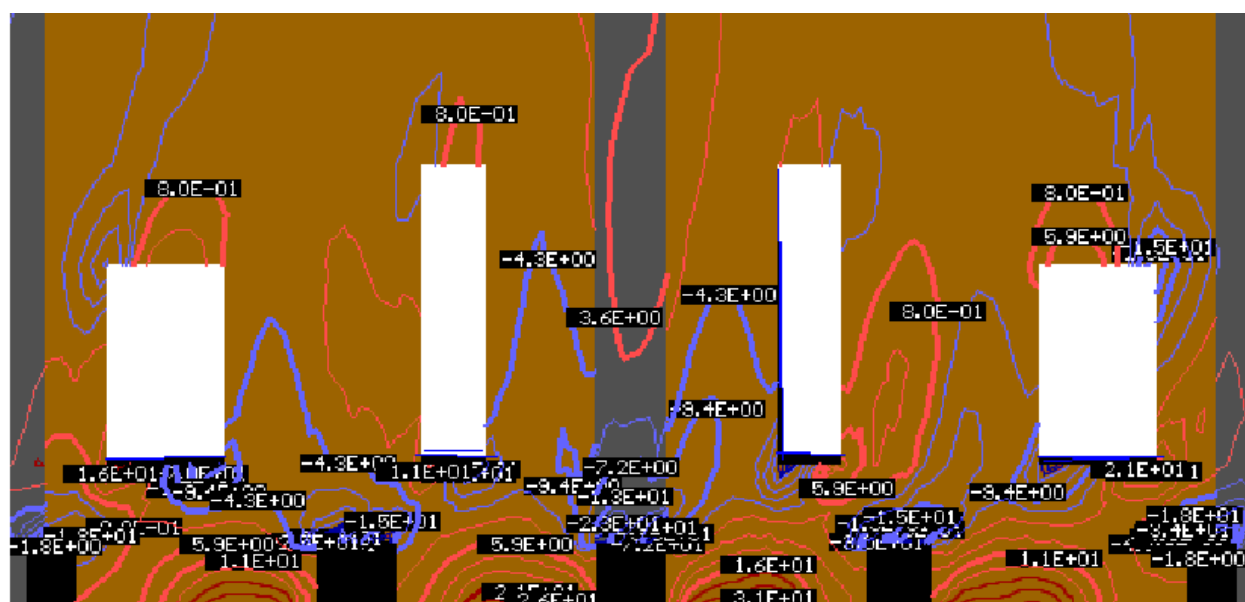


С подкреплением - суммарные перемещения, м

Пример расчета конструктивного элемента цоколя при разработке проекта усиления – комплекс ANSYS

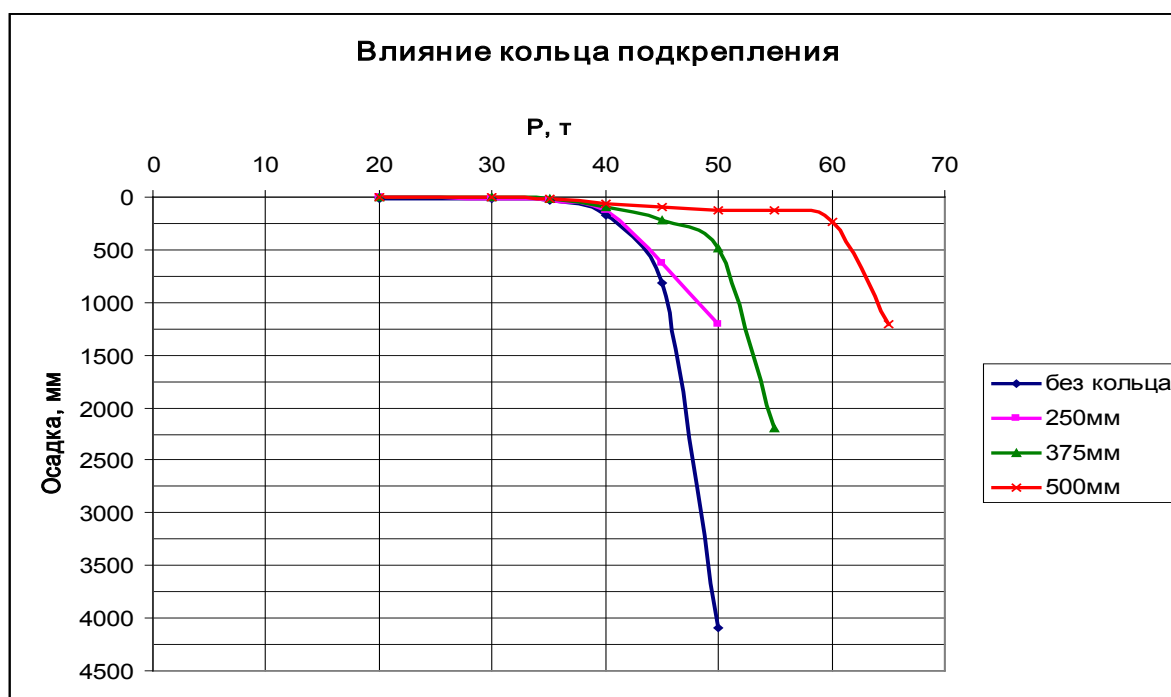
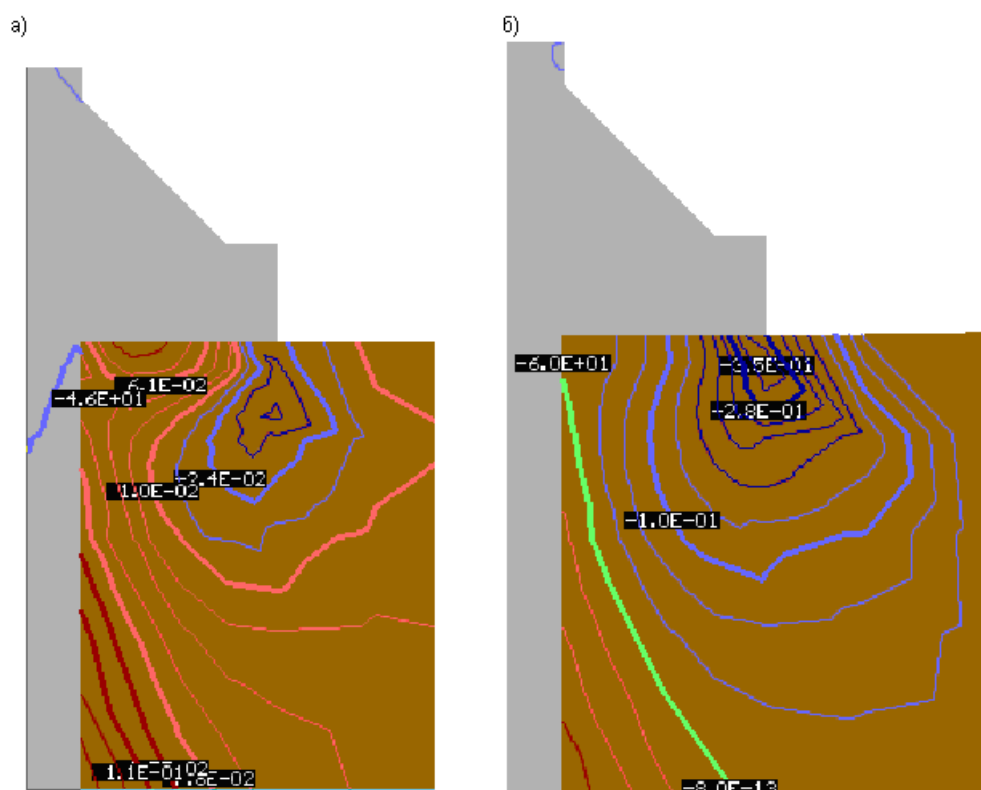


Горизонтальные Вертикальные
Ось 1. Проектное состояние. Изолинии перемещений (см).

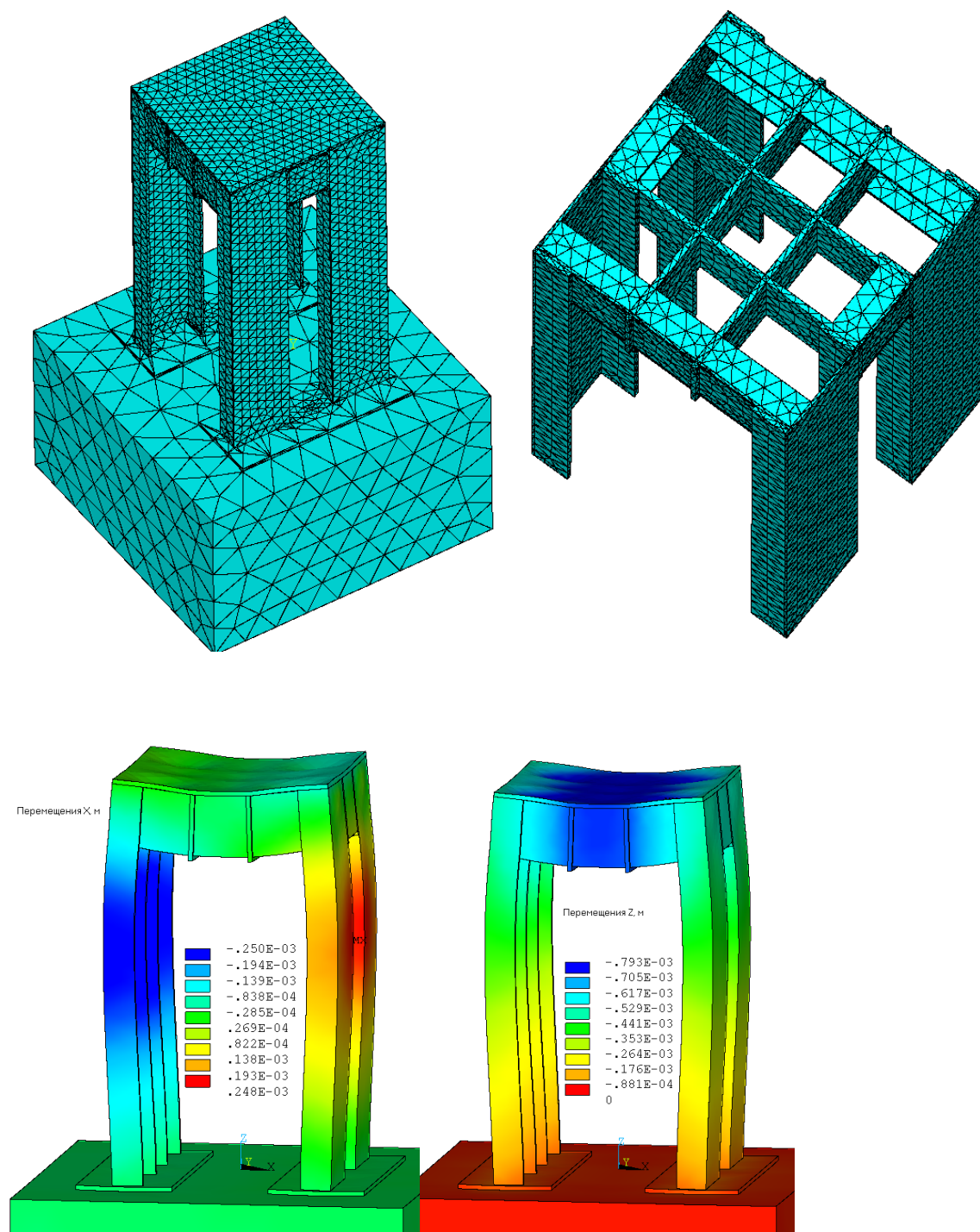


Опираение на домкраты. Горизонтальные напряжения (кг / см²). Фрагмент цоколя.

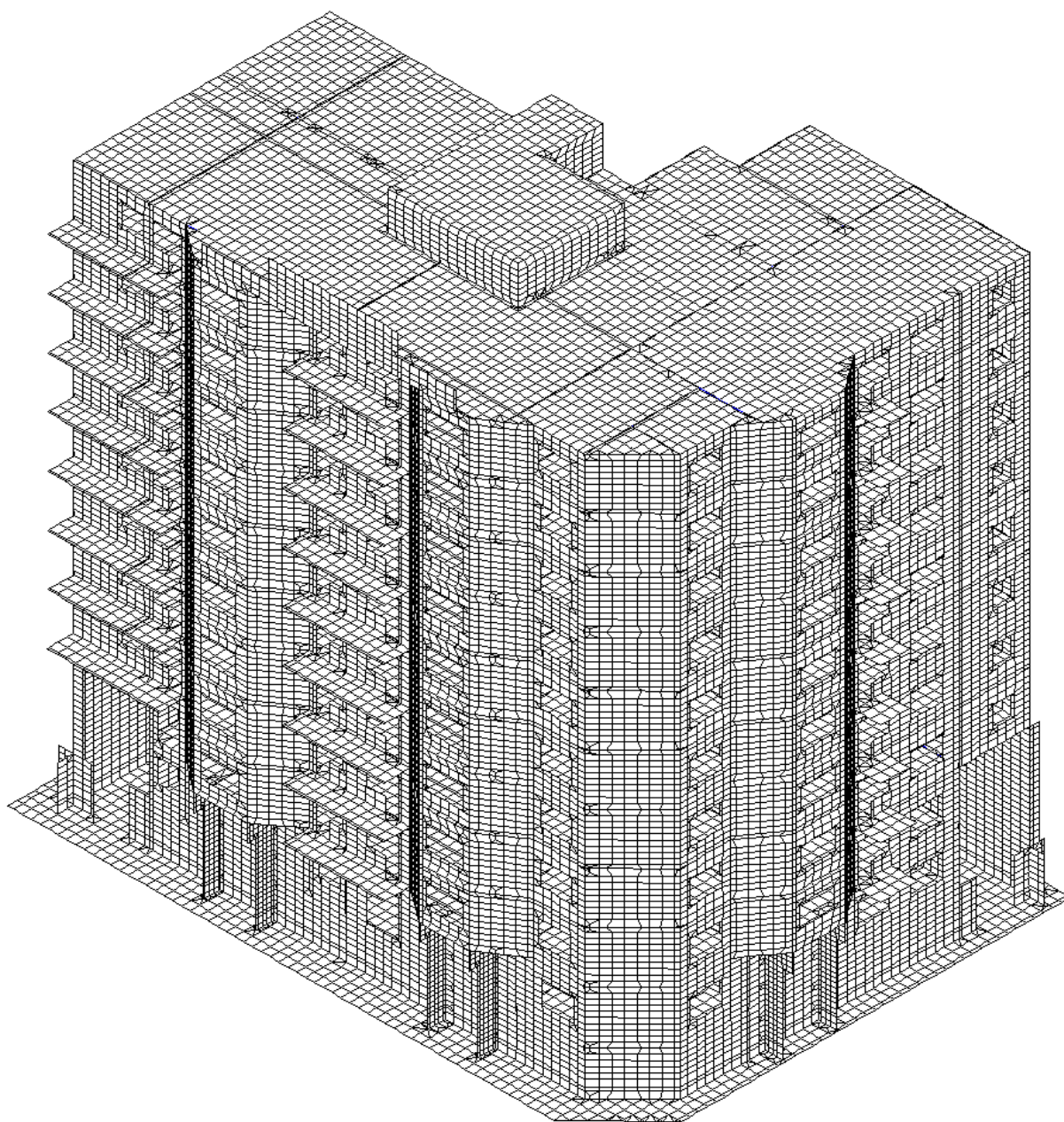
Пример расчета несущих стен здания при подготовке проекта устранения ренов – комплекс ПОЛЮС



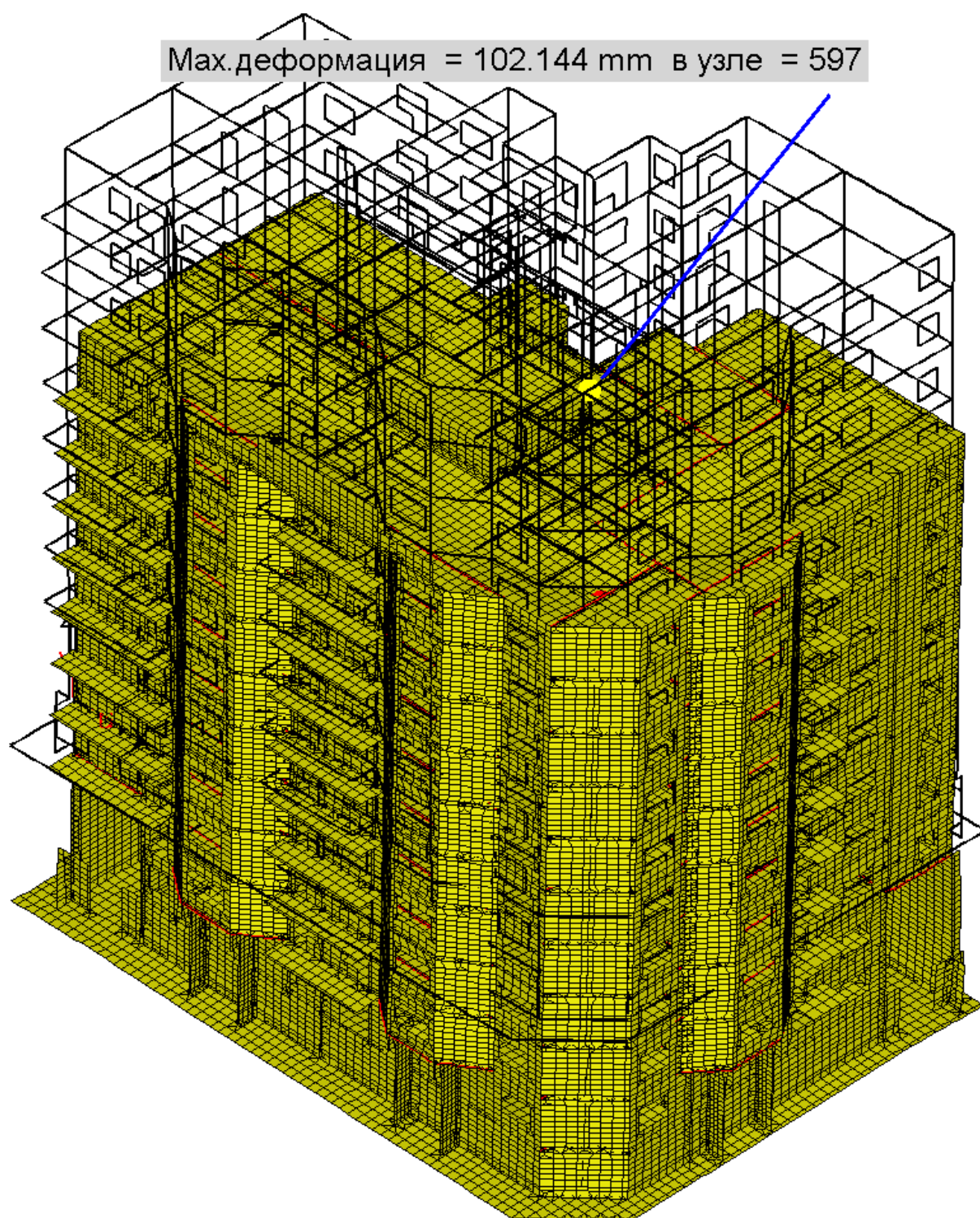
Пример расчета ростверка сваи при подготовке проекта усиления фундаментов- комплекс ПОЛЮС



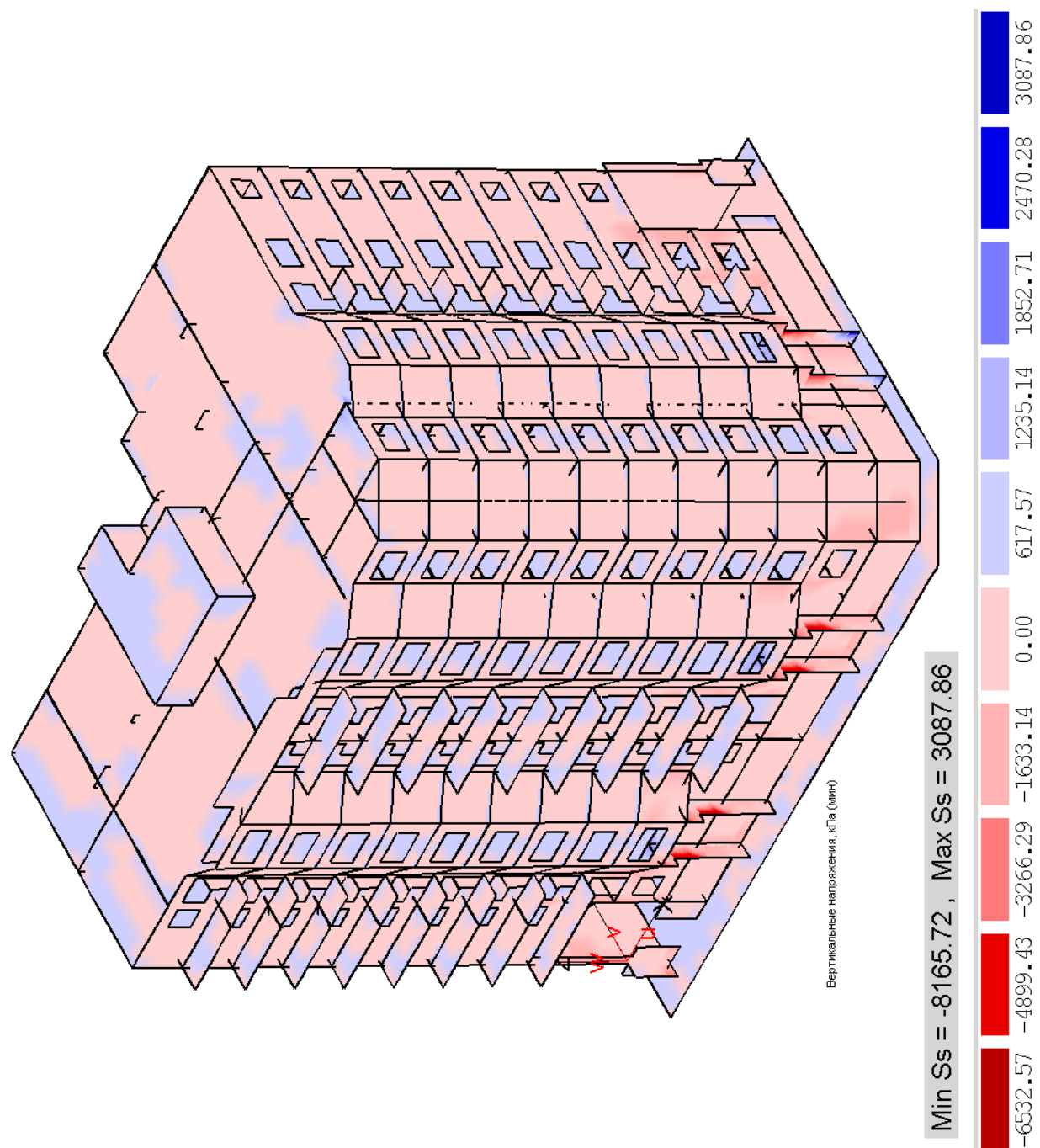
Пример модели и некоторые результаты расчета вспомогательного домкратного столика



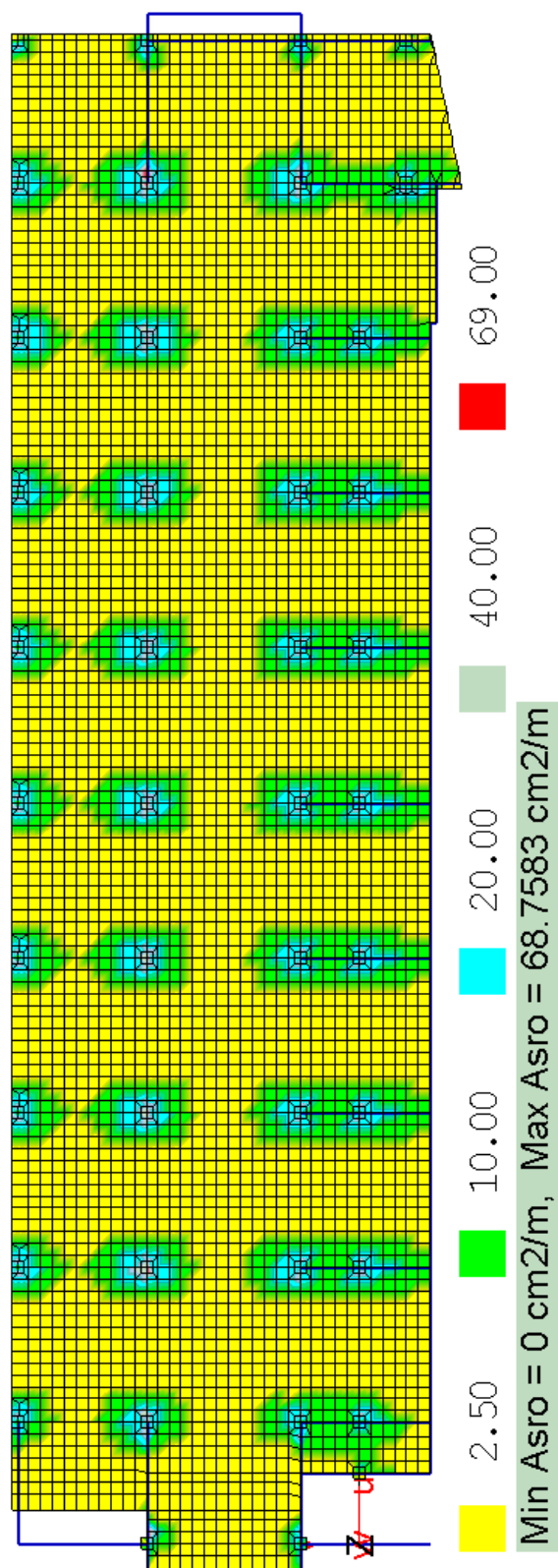
Пример расчетной схемы жилого здания – комплекс ProFEt&Stark



Пример результатов расчета – деформации здания - комплекс ProFEt&Stark



Пример результатов расчета – вертикальные напряжения - комплекс ProFEt&Stark



Пример расчета горизонтальной (верхней) арматуры монолитной плиты перекрытия – вертикальные напряжения - комплекс ProFEt&Stark

3 Контрольные вопросы

- Классификация систем САПР в строительстве,
- Системы САПР архитектурного назначения,
- Особенности специализированных архитектурных САПР,
- Возможности специализированных архитектурных САПР,
- САПР общего назначения,
- Отличие САПР общего назначения и специализированных САПР,
- Системы САПР расчетов на прочность, жесткость и устойчивость,
- Основные положения метода конечных элементов,
- Основные подходы МКЭ,
- Основные погрешности при использовании МКЭ,
- Основные программные МКЭ – комплексы,
- Какие аппаратные ресурсы влияют на точность получения результатов МКЭ?
- Возможности специализированных МКЭ-комплексов в строительстве.