

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Ростовский государственный университет путей сообщения»

(ФГБОУ ВО РГУПС)

М.В. Прокопова, Я.С. Рубцова

САПР ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Учебное пособие

Утверждено учебно-методическим советом университета

Ростов-на-Дону

2017

УДК 725 (07) + 0.6

Рецензенты кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой ИПС ж.д. А.А. Ревякин (РГУПС)

доктор технических наук, профессор А.Ю. Прокопов (АСА ДГТУ)

Проконова, М.В., Рубцова Я.С.

САПР зданий и сооружений: учеб. Пособие / М.В. Проконова, Я.С. Рубцова; ФГБОУ ВО РГУПС.– Ростов н/Д, 2017. – с.: ил.– Библиогр.: с. 68-69.

В учебном пособии рассматриваются методы компьютерного моделирования строительных конструкций и современные системы автоматизированного проектирования, используемые в строительстве.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения направления подготовки 08.03.01 «Строительство».

Одобрено к изданию кафедрой «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог».

© Проконова М.В., Рубцова Я.С., 2017
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Основы архитектурного проектирования гражданских зданий.....	5
1.1 Классификация гражданских зданий	5
1.2 Требования, предъявляемые к зданиям.....	10
1.5 Композиционные основы проектирования.....	16
2 Конструктивные решения.....	17
3 Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения	24
4 Разработка проекта гражданского здания.....	30
4.1 Правила подсчета общей, полезной и расчетной площадей, строительного объема, площади застройки и этажности здания.....	30
4.2 Принципы проектирования жилых зданий.....	33
4.3 Принципы проектирования общественных зданий.....	38
5 Требования к выполнению курсового проекта по дисциплине «Архитектура зданий».....	54
6 Варианты заданий курсового проекта	55
Библиографический список.....	68

ВВЕДЕНИЕ

Один из общих законов развития науки состоит в том, что потребности развития общества часто ставят перед ней задачи, несколько превышающие ее возможности. Расширение возможностей приложения математики обусловило математизацию других разделов науки: химии, экономики, биологии, геологии, географии, психологии, медицины и конкретных разделов техники. Процесс математизации состоит в построении математических моделей процессов и явлений и разработке методов их исследования. В других разделах науки, например в физике или механике, построение математических моделей для описания различных явлений природы и изучение этих моделей с целью объяснения старых или предсказания новых эффектов явлений являются традиционными.

Применение ЭВМ и расширение математического образования резко увеличило возможности в направлении построения и исследования математических моделей. Все чаще результаты расчетов позволяют обнаруживать и предсказывать ранее никогда не наблюдавшиеся явления; это дает основания говорить о математическом эксперименте.

Инженера, в том числе строителя, математика интересует не сама по себе, а как средство решения задач проектирования или исследования, т.е. решение реальной задачи: поведение грунтов под сооружением, устойчивость строительной конструкции, прочность сейсмостойкого сооружения и т.д.

Одним из способов решения является эксперимент. Построить здание и сооружение и измерять интересующую характеристику. Если характеристика оказалась неудачной, то необходимо изменить проект и построить новое сооружение и т.д. Ясно, что получим достоверный ответ, но слишком медленным и дорогим способом.

Другой способ – математический анализ конструкции или явления. Но такой анализ применяется не к реальным явлениям, а к некоторым математическим моделям этих явлений.

Современные методы математического моделирования и мощные ЭВМ дали возможность решать сложные задачи в кратчайшее время, о которых в прошлом столетии могли только мечтать.

Целью изучения дисциплин «САПР зданий» и «САПР сооружений» является получение навыков построения математических моделей зданий и сооружений, анализа полученных результатов, применение их в проектировании конструкций. Для реализации поставленных целей в ФГБОУ ВО РГУПС имеется лицензионное программное обеспечение: ПК «Лири», ПК «StructureCAD», ПК STARK ES.

В процессе изучения данной дисциплины обучающийся должен:

Знать (обладать знаниями на минимальном уровне)

- основные положения автоматизированного проектирования и реконструкции зданий и сооружений;
- программные средства реализации информационных технологий.

Уметь (обладать умениями на базовом уровне)

- использовать возможности вычислительной техники и программного обеспечения;
- разрабатывать конструктивные решения зданий с использованием профессиональных отечественных информационных систем.

Владеть (овладеть умениями на высоком уровне)

- методами практического использования современных компьютеров для обработки информации и основами численных методов решения инженерных задач;
- навыками расчета элементов строительных конструкций и сооружений на прочность, жесткость, устойчивость;
- основами современных методов проектирования конструктивных элементов зданий и сооружений;
- основными методами математического моделирования строительных объектов на базе стандартных пакетов автоматизации;
- основными методами работы на персональной электронно-вычислительной машине (ПЭВМ) с прикладными программными средствами;
- методами математического анализа, современными средствами вычислительной техники и программного обеспечения при проектировании и расчетах транспортных сооружений.

1 Основы компьютерного моделирования строительных конструкций

1.1 Общие сведения

Модели и моделирование используются человечеством давно. С помощью моделей и модельных отношений развились разговорные языки, письменность, графика. Наскальные изображения наших предков, затем картины и книги – это модельные, информационные формы передачи знаний об окружающем мире последующим поколениям. Модели применяются при изучении сложных явлений, процессов, конструировании новых сооружений. Хорошо построенная модель, как правило, доступнее для исследования, нежели реальный объект. Более того, некоторые объекты вообще не могут быть изучены непосредственным образом: недопустимы, например, эксперименты с экономикой страны в познавательных целях; принципиально неосуществимы эксперименты с прошлым или, скажем, с планетами Солнечной системы и т. п.

Модель позволяет научиться правильно работать с объектом, апробируя различные варианты управления на его модели. Экспериментировать в этих целях с реальным объектом в лучшем случае бывает неудобно, а зачастую просто вредно или вообще невозможно в силу ряда причин (большой продолжительности эксперимента во времени, риска привести объект в нежелательное и необратимое состояние и т. п.)

Модель – это материальный или мысленно представляемый объект, замещающий в процессе изучения объект-оригинал, и сохраняющий значимые для данного исследования типичные его черты. Основным достоинством моделей является возможность экспериментировать путем легкого вмешательства с целью изменения (варьирования) сравнительно ограниченного числа входных переменных и быстрого получения выходных результатов. Процесс построения модели называется моделированием.

Другими словами, **моделирование** – это процесс изучения строения и свойств оригинала с помощью модели.

Смысл *моделирования* заключается в том, чтобы по результатам опытов на модели можно было судить о явлениях, происходящих в натурном объекте.

В основе моделирования лежат информационные процессы, поскольку само создание модели базируется на информации о реальном объекте или процессе.

Модель является представлением действительности. Но модель не может быть полностью тождественной натурному объекту, ибо в этом случае она не выполняла бы своей основной функции и представляла бы собой лишь копию сложного реального объекта. Поэтому при моделировании неизбежна определенная степень упрощения, хотя и стремятся, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функционирования натурного объекта.

1.2 История развития моделирования

Еще в 1970 году известным математиком А.Н. Колмогоровым давался прогноз, что с *«развитием современной вычислительной техники будет во многих случаях разумно изучение реальных явлений весте, избегая промежуточный этап их стилизации в духе математики бесконечного и непрерывного, переходя прямо к дискретным моделям»*. Сейчас уже можно с уверенностью сказать, что этот прогноз сбылся, так как появилось большое количество разнообразных математических систем, основанных на принципе мелкозернистого параллелизма, и, самое главное, появились программные и аппаратные комплексы, способные моделировать работу таких систем.

Рубеж конца XX - начала XXI веков, связанный с бурным развитием информационных технологий, ознаменовался появлением принципиально нового подхода в архитектурно-строительном проектировании, заключающемся в создании компьютерной модели нового здания, несущей в себе все сведения о будущем объекте.

Это стало естественной реакцией человека на кардинально изменившуюся информационную насыщенность окружающей нас жизни. В современных условиях стало невозможно эффективно обрабатывать прежними средствами хлынувший на проектировщиков огромный (и неуклонно возрастающий) поток «информации для размышления», предваряющей и сопровождающей само проектирование.

Причем поток этой информации не прекращается даже после того, как здание уже спроектировано и построено, поскольку новый объект вступает в стадию эксплуатации, происходит его взаимодействие с другими объектами и окружающей средой, то есть начинается, говоря современным языком, активная фаза «жизненного цикла» здания.

Так что возникшая в результате реакции на сложившееся положение концепция **информационного моделирования здания** – это намного больше, чем просто новый метод в проектировании.

Это также принципиально иной подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания, к управлению жизненным циклом объекта, включая его экономическую составляющую, к управлению окружающей нас рукотворной средой обитания.

Это – изменившееся отношение к зданиям и сооружениям вообще.

Наконец, это новый взгляд на окружающий мир и переосмысление способов воздействия человека на этот мир.

Подход к проектированию зданий через их информационное моделирование предполагает прежде всего сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми ее взаимосвязями и зависимостями, когда здание и все, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый объект.

Правильное определение этих взаимосвязей, а также точная классифика-

ция, хорошо организованное структурирование и достоверность используемых данных – залог успеха информационного моделирования.

Если внимательно приглядеться, то нетрудно увидеть, что при такой концепции принципиальные решения по проектированию снова остаются в руках человека, а компьютер опять выполняет лишь порученную ему техническую функцию по обработке информации.

Но главное отличие нового подхода от прежних методов проектирования заключается в том, что возникающий объем этой технической работы, выполняемой компьютером, носит принципиально иной характер, и человеку самому с ним уже не справиться.

Новый подход к проектированию объектов получил название **Информационное моделирование зданий** или сокращенно **ВІМ** (от принятого в английском языке термина Building Information Modeling).

Термин **ВІМ** появился в лексиконе специалистов сравнительно недавно, хотя сама концепция компьютерного моделирования с максимальным учетом всей информации об объекте начала формироваться и приобретать конкретные очертания намного раньше. С конца XX века такой подход в проектировании постепенно «вызрел» внутри бурно развивающихся САД-технологий.

Понятие *Информационной модели здания* была впервые предложено профессором Технологического института Джорджии Чаком Истманом (Chuck Eastman) в 1975 году в журнале Американского Института Архитекторов (AIA) под рабочим названием «*Building Description System*» (Система описания здания).

В конце 1970х – начале 1980х эта концепция развивалась параллельно в Старом и Новом Свете, причем в США чаще всего употреблялся термин «*Building Product Model*», а в Европе (особенно в Финляндии) – «*Product Information Model*». При этом оба раза слово Product подчеркивало первоочередную ориентацию внимания исследователей на объект проектирования, а не на процесс. Можно предположить, что несложное лингвистическое объединение этих двух названий и привело к рождению «*Building Information Model*».

Параллельно в разработке подходов к информационному моделированию зданий европейцами в середине 1980х применялись немецкий термин «*Bauinformatik*» и голландский «*Gebouwmodel*», которые в переводе также соответствовали английскому «*Building Model*» или «*Building Information Model*».

Эти лингвистические сближения терминологии сопровождались и выработкой единого наполнения используемых понятий, что в итоге и привело к первому появлению в научной литературе в 1992 году термина «*Building Information Model*» в его нынешнем содержании.

Чуть раньше, в 1986 году, англичанин Роберт Эйш (Robert Aish), в то время – создатель программы RUCAPS, затем в течение длительного периода – сотрудник Bentley Systemes, недавно перешедший в Autodesk, в своей статье впервые использовал термин «*Building Modeling*» в его нынешнем понимании как информационного моделирования зданий.

Тогда же впервые сформулированы основные принципы этого информа-

ционного подхода в проектировании: трехмерное моделирование; автоматическое получение чертежей; интеллектуальная параметризация объектов; соответствующие объектам базы данных; распределение процесса строительства по временным этапам и т.д.

Роберт Эйш проиллюстрировал новый подход в проектировании примером успешного применения комплекса моделирования зданий RUCAPS при реконструкции «Терминала 3» лондонского аэропорта Хитроу. По всей видимости, этот опыт 25-летней давности - первый случай использования технологии BIM в мировой проектно-строительной практике.

Результатом развития компьютерного проектирования является то обстоятельство, что на сегодняшний день работа на основе САД-технологий представляется достаточно организованной и отлаженной.

Сейчас, спустя примерно 25 лет после своего появления, формат файлов DWG, создаваемых пакетом AutoCAD, занял место неофициального, но общепризнанного стандарта работы с проектом в САД-программах и уже начал жить независимой от своего создателя жизнью.

То же относится и к формату DXF, разработанному Autodesk для осуществления обмена данными между различными САД-программами и другими, в том числе вычислительными, комплексами.

Теперь практически все САД-программы могут принимать и сохранять информацию в этих форматах, хотя их собственные «родные» форматы файлов порой существенно отличаются от последних.

Таким образом, форматы файлов, создаваемых пакетом AutoCAD, стали неким «унификатором» информации для САД-программ, причем это исторически определилось самой логикой естественного развития автоматизированного проектирования в мире.

Что касается BIM, то в наши дни форма, содержание и способы работы по информационному моделированию зданий всецело определяются используемым архитекторами (проектировщиками) программным обеспечением, которого сейчас для BIM уже немало.

Поскольку повсеместное внедрение технологии BIM в мировую проектную практику в настоящее время находится (по историческим меркам) на своей начальной стадии, еще не выработан единый стандарт для файлов программных систем, создающих информационные модели зданий, или обмена данными между ними, хотя такое понимание назревает и попытки разработки единых «правил игры» уже предпринимаются.

Примерно с 2002 года благодаря стараниям многих авторов и энтузиастов нового подхода в проектировании концепцию «*Building Information Model*» ввели в употребление и ведущие разработчики программного обеспечения, сделав это понятие одним из ключевых в своей терминологии.

В дальнейшем, в результате деятельности таких компаний, как в первую очередь Autodesk, аббревиатура BIM прочно вошла в лексикон специалистов по компьютерным технологиям проектирования и получила широчайшее распространение, и ее теперь знает весь мир.

Исторически сложилось, что некоторые разработчики компьютерных программ, относящихся к информационному моделированию зданий, кроме общепринятой, пользуются еще и своей собственной терминологией.

Например, компания Graphisoft, создатель широко распространенного пакета ArchiCAD, ввела понятие **VB** (Virtual Building) – виртуальное здание, которое в сущности перекликается с BIM.

1.3 Виды моделирования

Различают **материальное** и **идеальное** моделирование. Материальное моделирование, в свою очередь, делится на физическое и аналоговое моделирование.

Физическим принято называть моделирование, при котором реальному объекту противопоставляется его увеличенная или уменьшенная копия, допускающая исследование (как правило, в лабораторных условиях) с помощью последующего перенесения свойств изучаемых процессов и явлений с модели на объект на основе теории подобия. Примерами моделей такого рода служат: в астрономии – планетарий, в архитектуре – макеты зданий, в самолетостроении – модели летательных аппаратов и т. п.

Аналоговое моделирование основано на аналогии процессов и явлений, имеющих различную физическую природу, но одинаково описываемых формально (одними и теми же математическими уравнениями).

От материального моделирования принципиально отличается **идеальное моделирование**, которое основано не на материальной аналогии объекта и модели, а на аналогии идеальной, мыслимой. Основным типом идеального моделирования является знаковое моделирование.

Знаковым называется моделирование, использующее в качестве моделей знаковые преобразования какого-либо вида: схемы, графики, чертежи, формулы, наборы символов.

Важнейшим видом знакового моделирования является *математическое моделирование*, при котором исследование объекта осуществляется посредством модели, сформулированной на языке математики. Классическим примером математического моделирования является описание и исследование законов механики Ньютона средствами математики.

По степени полноты изучаемого объекта модели подразделяются на полные, неполные и приближенные. В основе *полных* моделей лежит полное подобие, которое проявляется как во времени, так и в пространстве. Полные модели существуют только в производственно-экспериментальном методе.

Для *неполных* моделей характерно моделирование и соблюдение требований подобия для ограниченного числа характеристик объекта. В основе *приближенного моделирования* лежит подобие, при котором некоторые стороны функционирования натурального объекта не моделируются совсем. В этом случае используют те характеристики процесса, которые известны, или исключают из рассмотрения характеристики, влияние которых незначительно. Степень при-

ближения в каждом конкретном случае моделирования устанавливают при сопоставительном анализе и сравнении получаемых результатов исследований модели с данными измерений в натуре для отобранных контрольных точек.

Для построения моделей используют два принципа: **дедуктивный** (от общего к частному) и **индуктивный** (от частного к общему). При первом подходе рассматривается частный случай общеизвестной фундаментальной модели, которая приспособляется к условиям моделируемого объекта с учетом конкретных обстоятельств. Второй способ предполагает выдвижение гипотез, декомпозицию сложного объекта, анализ, а затем синтез. Здесь широко используется подобие, поиск аналогий, умозаключение с целью формирования каких-либо закономерностей в виде предположений о поведении системы. Ниже представлена схема процесса моделирования.



Технология моделирования требует от исследователя умения корректно формулировать проблемы и задачи, прогнозировать результаты, проводить разумные оценки, выделять главные и второстепенные факторы для построения моделей, находить аналогии и выражать их на языке математики.

В материальных моделях, используемых в строительстве, существенные свойства натурального объекта представлены самими этими свойствами, но, как правило, в ином масштабе, поэтому их называют *моделями геометрического подобия*. Наглядные модели внешне похожи на реальный объект, но отличаются от него размерами, представляя собой образы или копии этого объекта.

Реальные вещи можно изобразить наглядно в виде трехмерной модели: глобус, модель горной машины или ее узла, макет подземного сооружения и т.п. Эти же объекты можно изобразить в виде двухмерных моделей: фотография, эскиз, план, чертеж. Наглядные модели служат для того, чтобы создать четкий зрительный образ объекта или процесса.

В наглядных физических моделях, называемых *моделями физического подобия*, воспроизводят физические процессы, протекающие в натурном объекте. С помощью методов теории подобия размерные физические величины объединяют в безразмерные комбинации. Благодаря введению безразмерных комбинаций число аргументов сокращается, что упрощает исследование физического процесса.

Понятие подобия распространяется на любые физические процессы. Обязательной предпосылкой подобия физических явлений должно быть *геометрическое подобие*. Большинство физических процессов, подлежащих изучению в горном деле, описывается условиями подобия, которые могут быть разделены на три группы: механические (силовые), гидромеханические и тепловые.

В основе *механического* подобия лежит общий закон подобия Ньютона. Понятие подобия физических явлений применимо только к явлениям одного и того же рода, которые качественно одинаковы и аналитически описываются одинаковыми уравнениями как по форме, так и по содержанию.

В современном мире все шире применяется процесс *компьютерного моделирования*, подразумевающий использование вычислительной техники для проведения экспериментов с моделью.

Компьютерная модель – это модель реального процесса или явления, реализованная компьютерными средствами. Если состояние системы меняется со временем, то модели называют динамическими, в противном случае – статическими.

Процессы в системе могут протекать по-разному в зависимости от условий, в которых находится система. Следить за поведением реальной системы при различных условиях бывает трудно, а иногда и невозможно. В таких случаях, построив модель, можно многократно возвращаться к начальному состоянию и наблюдать за ее поведением. Этот метод исследования систем называется *имитационным* моделированием.

Моделирование событий реального мира может производиться многими способами. Явления макромира достаточно хорошо описываются моделями, построенными на математике бесконечного и непрерывного. События же, происходящие в микромире, плохо поддаются описанию подобным способом и требуют применения других принципов моделирования.

1.4 Технологии BIM

BIM (*Building Information Modeling* или *Building Information Model*) – информационное моделирование здания или информационная модель здания.

Информационное моделирование здания – это подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания (к управлению жизненным циклом объекта), который предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми её взаимосвязями и зависимостями, когда здание и всё, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый объект.

Трёхмерная модель здания, либо другого строительного объекта, связанная с информационной базой данных, в которой каждому элементу модели можно присвоить дополнительные атрибуты. Особенность такого подхода заключается в том, что строительный объект проектируется фактически как единое целое. И изменение какого-либо одного из его параметров влечёт за собой автоматическое изменение остальных связанных с ним параметров и объектов, вплоть до чертежей, визуализаций, спецификаций и календарного графика.

Информационная модель здания (BIM) (Building Information Model) – это:

- хорошо скоординированная, согласованная и взаимосвязанная,
- поддающаяся расчетам и анализу,
- имеющая геометрическую привязку,
- пригодная к компьютерному использованию,

- допускающая необходимые обновления числовая информация о проектируемом или уже существующем объекте, которая может использоваться для:
 1. принятия конкретных проектных решений,
 2. создания высококачественной проектной документации,
 3. предсказания эксплуатационных качеств объекта,
 4. составления смет и строительных планов,
 5. заказа и изготовления материалов и оборудования,
 6. управления возведением здания,
 7. управления и эксплуатации самого здания и средств технического оснащения в течение всего жизненного цикла,
 8. управления зданием как объектом коммерческой деятельности,
 9. проектирования и управления реконструкцией или ремонтом здания,
 10. сноса и утилизации здания,
 11. иных связанных со зданием целей.

Схематически информация, относящаяся к BIM, поступающая в модель и получаемая из модели, показана на рис.1.1.



Рис. 1.1. Основная информация, проходящая через BIM и имеющая к BIM непосредственное отношение

Иными словами, BIM – это вся имеющая числовое описание и нужным образом организованная информация об объекте, используемая как на стадии

проектирования и строительства здания, так и в период его эксплуатации и даже сноса.

Аббревиатура BIM может использоваться как для обозначения непосредственно самой информационной модели здания, так и для процесса информационного моделирования, при этом, как правило, никаких недоразумений не возникает.

1.5 Практическая польза от информационной модели здания

Применение информационной модели здания существенно облегчает работу с объектом и имеет массу преимуществ перед прежними формами проектирования.

Прежде всего, оно позволяет в виртуальном режиме собрать воедино, подобрать по предназначению, рассчитать, состыковать и согласовать создаваемые разными специалистами и организациями компоненты и системы будущего сооружения, «на кончике пера» заранее проверить их жизнеспособность, функциональную пригодность и эксплуатационные качества, а также избежать самого неприятного для проектировщиков - внутренних нестыковок (коллизий) (рис.1.2).

В отличие от традиционных систем компьютерного проектирования, создающих геометрические образы, результатом информационного моделирования здания обычно является объектно-ориентированная цифровая модель как всего объекта, так и процесса его строительства.

Чаще всего работа по созданию информационной модели здания ведется как бы в два этапа.

Сначала разрабатываются некие блоки (семейства) – первичные элементы проектирования, соответствующие как строительным изделиям (окна, двери, плиты перекрытий и т.п.), так и элементам оснащения (отопительные и осветительные приборы, лифты и т.п.) и многому другому, что имеет непосредственное отношение к зданию, но производится вне рамок стройплощадки и при возведении объекта не делится на части.

Второй этап – моделирование того, что создается на стройплощадке. Это фундаменты, стены, крыши, навесные фасады и многое другое. При этом предполагается широкое использование заранее созданных элементов, например, крепежных или обрамляющих деталей при формировании навесных стен здания.

Таким образом, логика информационного моделирования зданий, вопреки опасениям некоторых скептиков, ушла из непонятной для проектировщиков и строителей области программирования и соответствует обычному пониманию, как строить дом, как его оснащать и как в нем жить.

Это существенно облегчает и упрощает работу с BIM как проектировщикам, так и всем остальным категориям строителей, а затем и эксплуатантов.

Что касается деления на этапы (первый и второй) при создании BIM, то оно носит достаточно условный характер. Например, вставить окна в модели-

руемый объект, а затем, по вновь появившимся соображениям, поменять их, и в проекте будут задействованы уже измененные окна.

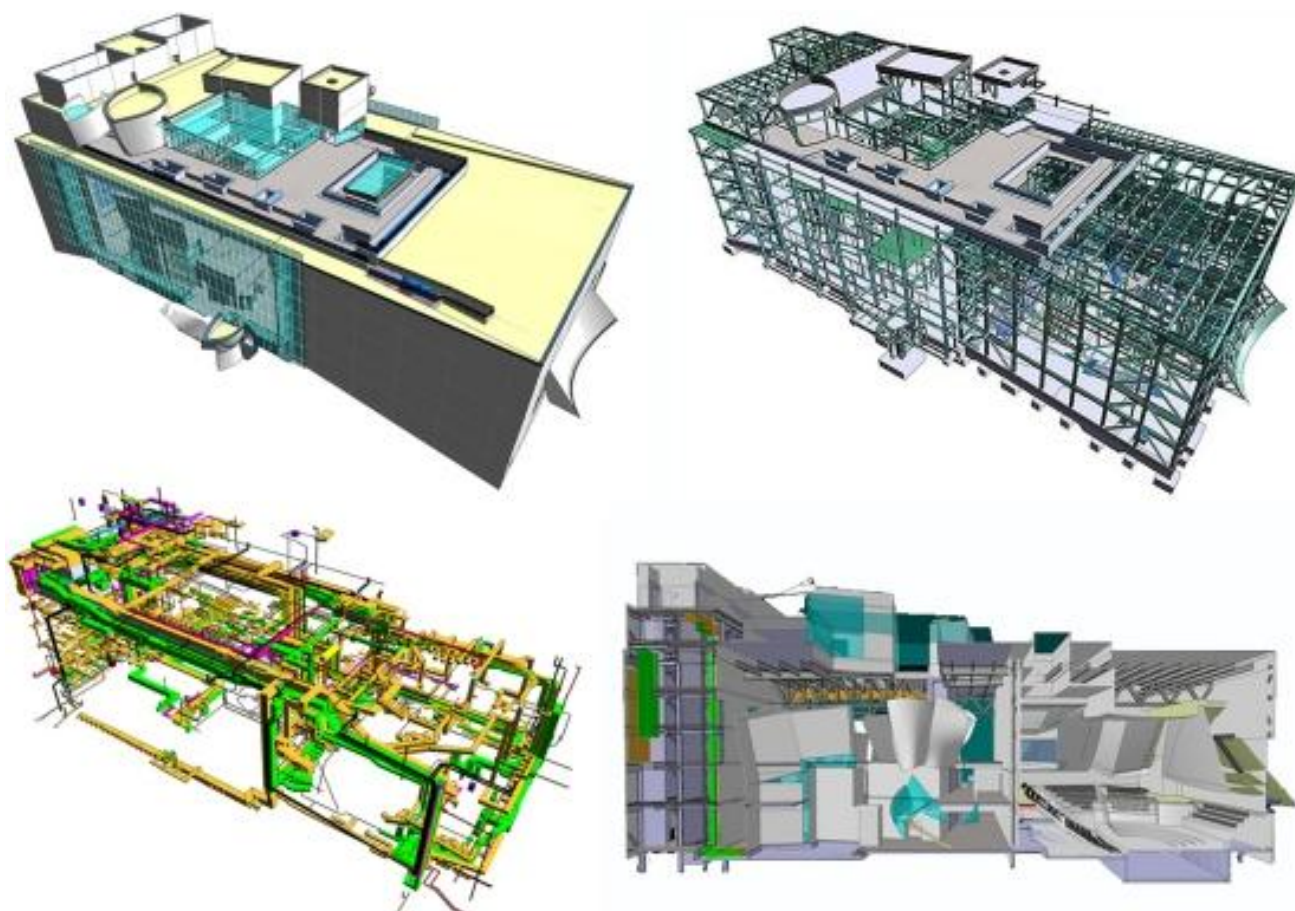


Рис. 1.2. Проект нового здания высшей музыкальной школы New World Symphony в Майами (США) архитектора Фрэнка Гери, разработанный по технологии BIM (начало проектирования в 2006).

Отдельно показаны компоненты единой модели: внешняя оболочка здания, несущий каркас, комплекс инженерного оборудования и внутренняя организация помещений

Построенная специалистами информационная модель проектируемого объекта затем становится основой и активно используется для создания рабочей документации всех видов, разработки и изготовления строительных конструкций и деталей, комплектации объекта, заказа и монтажа технологического оборудования, экономических расчетов, организации возведения самого здания, а также решения технических и организационно-хозяйственных вопросов последующей эксплуатации.

Информационная модель существует в течение всего жизненного цикла здания, и даже дольше. Содержащаяся в ней информация может изменяться, дополняться, заменяться, отражая текущее состояние здания.

Такой подход в проектировании, когда объект рассматривается не только в пространстве, но и во времени, то есть «3D плюс время», часто называют 4D,

а «4D плюс информацию» принято обозначать уже 5D. Хотя, с другой стороны, в ряде публикаций под 4D могут понимать «3D плюс спецификации».

Как видим, полного единства в этих модных количествах пока еще тоже нет, но это всего лишь вопрос времени. Главное – внутреннее содержание новой концепции проектирования.

Технология BIM уже сейчас показала возможность достижения высокой скорости, объема и качества строительства, а также значительную экономию бюджетных средств.

Например, при создании сложнейшего по форме и внутреннему оснащению нового корпуса Музея искусств в американском городе Денвере для организации взаимодействия субподрядчиков при проектировании и возведении каркаса здания (металл и железобетон) и разработке и монтаже сантехнических и электрических систем была использована специально разработанная для этого объекта информационная модель.

По данным генерального подрядчика, только чисто организационное применение BIM (модель была создана для отработки взаимодействия субподрядчиков и оптимизации графика работ) сократило срок строительства на 14 месяцев и привело к экономии примерно 400 тысяч долларов при сметной стоимости объекта в 70 миллионов долларов (рис.1.3).



Рис. 1.3. Музей искусств в Денвере (США), корпус Фредерика С.Хэмилтона. Архитектор Дэниель Либескинд, 2006.

Но одно из самых главных достижений BIM – возможность добиться практически полного соответствия эксплуатационных характеристик нового здания требованиям заказчика.

Поскольку технология BIM позволяет с высокой степенью достоверности воссоздать сам объект со всеми конструкциями, материалами, инженерным оснащением и протекающими в нем процессами и отладить на виртуальной модели основные проектные решения.

Иными способами такая проверка проектных решений на правильность не осуществима – придется просто построить макет здания в натуральную величину. Что в прежние времена периодически и происходило (да и сейчас еще происходит) – правильность проектных расчетов проверялась на уже созданном объекте, когда исправить что-либо было почти невозможно.

При этом особо важно подчеркнуть, что информационная модель здания – это виртуальная модель, результат применения компьютерных технологий. В идеале BIM – это виртуальная копия здания.

На начальном этапе создания модели мы имеем некоторый набор информации, почти всегда неполный, но достаточный для начала работы в первом приближении. Затем введенная в модель информация пополняется по мере ее поступления, и модель становится более насыщенной.

Таким образом, процесс создания BIM всегда растянут во времени (носит практически непрерывный характер), поскольку может иметь неограниченное количество «уточнений».

А сама информационная модель здания – весьма динамичное и постоянно развивающееся образование, «живущее» самостоятельной жизнью.

При этом надо понимать, что физически BIM существует только в памяти компьютера. И ею можно воспользоваться только посредством тех программных средств (комплекса программ), в которых она и была создана.

1.6 Формы получения информации из модели

Информационная модель здания сегодня – это специальным образом организованный и структурированный набор данных из одного или нескольких файлов, допускающий на выходе как графическое, так и любое иное числовое представление, пригодное для последующего использования различными программными средствами проектирования, расчета и анализа здания и всех входящих в него компонентов и систем.

Сама информационная модель здания как организованный набор данных об объекте непосредственно используется создавшей ее программой. Но специалистам важно также иметь возможность брать информацию из модели в удобном виде и широко использовать в своей профессиональной деятельности вне рамок конкретной BIM-программы.

Отсюда возникает еще одна из важных задач информационного моделирования – предоставлять пользователю данные об объекте в широком спектре форматов, технологически пригодных для дальнейшей обработки компьютер-

ными или иными средствами.

Поэтому современные BIM-программы предполагают, что содержащаяся в модели информация о здании для внешнего использования можно получать в большом спектре видов, минимальный перечень которых на сегодняшний день уже достаточно четко определен профессиональным сообществом и не вызывает никаких дискуссий (рис.1.4).

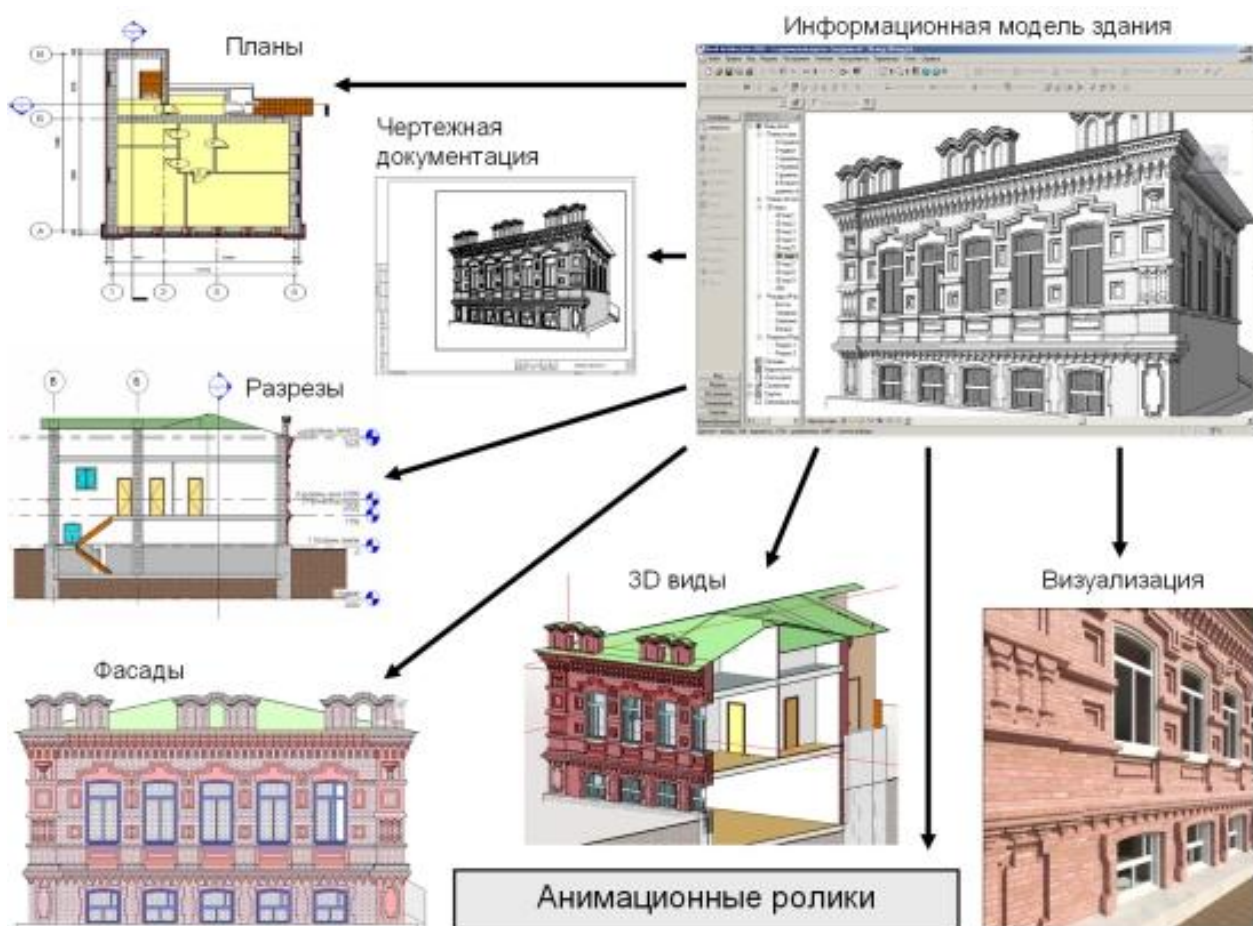


Рис. 1.4. Виды графического представления информационной модели здания. Татьяна Козлова. Памятник архитектуры «Дом композиторов» в Новосибирске. Модель выполнена в Revit Architecture. НГАСУ (Сибстрин), 2009.

К таким общепризнанным формам вывода или передачи содержащейся в BIM информации о здании прежде всего относятся:

1. чертежная 2D рабочая документация и чертежные 3D-виды моделей;
2. плоские 2D файлы и объемные 3D модели для использования в различных САД-программах;
3. таблицы, ведомости, спецификации;
4. файлы для использования в Интернет;
5. файлы с инженерными заданиями на изготовление входящих в модель изделий и конструкций;
6. файлы-заказы на поставку оборудования и материалов;
7. результаты тех или иных специальных расчетов;

8. видеоматериалы, отражающие моделируемые процессы;
9. файлы с данными для расчетов в других программах;
10. файлы презентационной визуализации и анимации модели,
11. виды объемных разрезов и других полных или не полных фрагментов проектируемого здания (рис.1.5);
12. файлы для трехмерной печати;
13. данные для изготовления модели или ее частей на станках с ЧПУ, лазерных или механических резаках либо других подобных устройствах;
14. любые другие виды предоставления информации, которые потребуются при проектировании, строительстве или эксплуатации здания.



Рис. 1.5. Трехмерный разрез здания

Все это многообразие форм выводимой информации обеспечивает универсальность и эффективность BIM как нового подхода в проектировании зданий и гарантирует ему определяющее положение в архитектурно-строительной отрасли в ближайшем будущем.

Компьютерные программы (Revit, Digital Project, Bentley Architecture, Allplan, ArchiCAD и т.п.) – это инструменты реализации моделирования, которые постоянно развиваются и совершенствуются. Но эти компьютерные программы определяют современный уровень развития информационного моделирования зданий, без них технология BIM лишена всякого смысла. Это дополнительная информация, которая выходит далеко за рамки только геометрического восприятия этих объекта. Какой бы хорошей не была геометрическая модель и

ее визуализация, у объектов должна быть еще количественная информация для анализа. Это числовые характеристики, таблицы, спецификации, цены, календарные графики, электронные адреса и т.п. И если для решения проектных задач не требуется трехмерной модели сооружения, то 3D и не будет. Проще говоря, BIM – это ровно столько D, сколько надо, плюс числовые данные для анализа. BIM – это параметрически заданные объекты. Поведение (свойства, геометрические размеры, расположение и т.п.) создаваемых объектов определяется наборами параметров и зависит от этих параметров.

Информационная модель любого здания постоянно находится в развитии, по мере необходимости пополняясь все более новой информацией и корректируясь с учетом изменяющихся условий и нового понимания проектных или эксплуатационных задач. В подавляющем большинстве случаев это – «живая», развивающаяся модель. И при правильном понимании срок ее жизни полностью перекрывает жизненный цикл реального объекта.

Создание информационной модели осуществляется по обычной и понятной для проектировщика логике построения здания, где главную роль играют его квалификация и интеллект. А само построение модели осуществляется в основном традиционными для проектирования графическими средствами, в том числе и в интерактивном режиме.

1.7 Компьютерное моделирование

Принципы построения САПР

Различные возможности и границы применения вычислительной техники для автоматизации проектирования определяются уровнем формализации научно-технических знаний в конкретной отрасли. Чем глубже разработана теория того или иного класса технических систем, тем большие возможности объективно существуют для автоматизации процесса их проектирования.

Применение ЭВМ при проектно-конструкторских работах в своем развитии прошло несколько стадий и претерпело значительные изменения. С появлением вычислительной техники был сделан акцент на автоматизацию проектных задач, имеющих четко выраженный расчетный характер, когда реализовывались методики, ориентированные на ручное проектирование. Затем, по мере накопления опыта, стали создавать программы автоматизированных расчетов на основе методов вычислительной математики (параметрическая оптимизация, метод конечных элементов и т. п.). С внедрением специализированных терминальных устройств появляются универсальные программы для ЭВМ для решения как расчетных, так и некоторых рутинных проектных задач (изготовление чертежей, спецификаций, текстовых документов и т. п.). В последние годы большое внимание уделяется автоматизации расчетно-конструкторских работ при проектировании типовых узлов и агрегатов, когда синтез конструкции проводится эвристически, а основные параметры выбираются и оптимизируются в интерактивном режиме диалога проектировщика и ЭВМ.

Решение проблем автоматизации проектирования с помощью ЭВМ основны-

вается на системном подходе, т. е. на создании и внедрении САПР - систем автоматизированного проектирования технических объектов, которые решают весь комплекс задач от анализа задания до разработки полного объема конструкторской и технологической документации. Это достигается за счет объединения современных технических средств и математического обеспечения, параметры и характеристики которых выбираются с максимальным учетом особенностей задач проектно-конструкторского процесса.

САПР представляет собой крупные организационно-технические системы, состоящие из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с подразделениями конкретной проектной организации.

Под автоматизацией проектирования понимают систематическое применение ЭВМ в процессе проектирования при научно обоснованном распределении функций между проектировщиком и ЭВМ и научно обоснованном выборе методов машинного решения задач.

Цель автоматизации – повысить качество проектирования, снизить материальные затраты на него, сократить сроки проектирования и ликвидировать рост числа инженерно-технических работников, занятых проектированием и конструированием.

Научно обоснованное распределение функций между человеком и ЭВМ подразумевает, что человек должен решать задачи, носящие творческий характер, а ЭВМ – задачи, решение которых поддается алгоритмизации.

Существенным отличием автоматизированного проектирования от неавтоматизированного является возможность замены дорогостоящего и занимающего много времени физического моделирования — математическим моделированием. При этом следует иметь в виду одно важнейшее обстоятельство: при проектировании число вариантов необозримо. Поэтому нельзя ставить задачу создания универсальной САПР, а необходимо решать вопросы проектирования для конкретного семейства машин.

Для создания САПР необходимо:

- совершенствовать проектирование на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- автоматизировать процессы поиска, обработки и выдачи информации;
- использовать методы оптимального и вариантного проектирования; применять эффективные, отражающие существенные особенности, математические модели проектируемых объектов, комплектующих изделий и материалов;
- создавать банки данных, содержащих систематизированные сведения справочного характера, необходимые для автоматизированного проектирования объектов;
- повышать качество оформления проектной документации;
- повышать творческую долю труда проектировщиков за счет автоматизации нетворческих работ;
- унифицировать и стандартизировать методы проектирования;
- подготавливать и переподготавливать специалистов;

- реализовывать взаимодействие с автоматизированными системами различного уровня и назначения.

Комплекс средств автоматизации проектирования включает методическое, лингвистическое, математическое, программное, техническое, информационное и организационное обеспечение.

САПР – система, объединяющая технические средства, математическое и программное обеспечение, параметры и характеристики которых выбирают с максимальным учетом особенностей задач инженерного проектирования и конструирования. В САПР обеспечивается удобство использования программ за счет применения средств оперативной связи инженера с ЭВМ, специальных проблемно-ориентированных языков и наличия информационно-справочной базы.

Структурное единство подсистем САПР обеспечивается строгой регламентацией связей между различными видами обеспечения, объединенных общей для данной подсистемы целевой функцией. Различают следующие виды обеспечения:

- методическое обеспечение – документы, в которых отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизации проектирования;
- лингвистическое обеспечение – языки проектирования, терминология;
- математическое обеспечение – методы, математические модели, алгоритмы;
- программное обеспечение – документы с текстами программ, программы на машинных носителях и эксплуатационные документы;
- техническое обеспечение – устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства и их сочетания;
- информационное обеспечение – документы, содержащие описание стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, типовых элементов, комплектующих изделий, материалов и другие данные;
- организационное обеспечение – положения и инструкции, приказы, штатное расписание и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений и их взаимодействие с комплексом средств автоматизации проектирования.

В общем, виде процесс проектирования в САПР можно упрощенно представить схемой, показанной на рис. 1. Эта схема отображает элементарную ячейку проектно-конструкторского процесса, из цепочки, которых состоит реальный автоматизированный процесс. Все системы проектирования, создаваемые с помощью современных средств вычислительной техники, являются автоматизированными. Важнейшую роль в этих системах играет человек-инженер, разрабатывающий проект новых технических средств. Человек в САПР решает все неформализованные проектные задачи и задачи планирования работ. Современная САПР является инструментом высококвалифицированного инженера-проектировщика, поэтому тесное взаимодействие челове-

ка и ЭВМ в процессе проектирования – один из важнейших принципов построения и эксплуатации САПР.

Основным блоком в схеме процесса автоматизированного проектирования (рис. 1.6) является блок проектных решений. В зависимости от полноты формализации наших знаний в конкретной предметной области проектное решение может быть выполнено автоматически или в интерактивном режиме. На основе входных данных и ограничений (независимые параметры проектирования) блок изменяет варьируемые параметры (факторы решения) до получения приемлемых проектных решений (зависимых переменных).

Результаты проектирования должны быть представлены в виде, удобном для восприятия человеком, и содержать информацию, на основе которой инженер мог бы вынести суждение о результатах проектирования.

Если проектное решение утверждается, то оформляется требуемая выходная документация; если необходима корректировка проекта, инженер, уточняя варьируемые параметры, в интерактивном режиме добивается нужных результатов; когда же проектно-конструкторский процесс не приводит к намеченной цели, необходимо уточнить входные данные и ограничения.

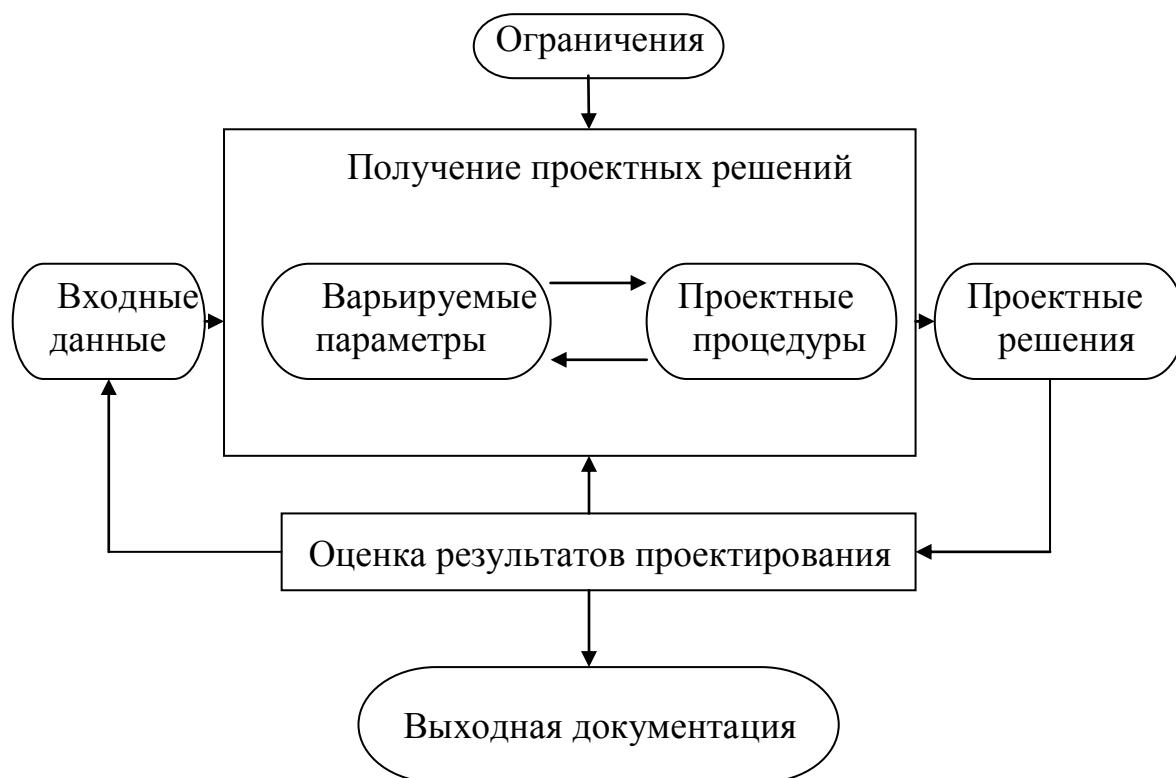


Рис. 1.6. Схема процесса автоматизированного проектирования

Рассмотрение даже такой упрощенной схемы процесса проектирования позволяет уточнить разделение функции между инженером и ЭВМ в САПР. Получение вариантов проектных решений и их представление в виде, удобном для восприятия человеком, может быть возложено на ЭВМ в той мере, в какой

это позволит сделать математическое обеспечение проектных процедур. Но даже при автоматическом получении вариантов проектных решений за инженером остаются важнейшие функции – ввод исходных данных для проектирования, окончательная оценка и утверждение проектных решений. В интерактивном же режиме проектирования инженер непосредственно участвует в ходе решения задач, воздействуя на выбор факторов решения и уточняя независимые переменные. Получение выходной документации в соответствии с существующими требованиями является операцией рутинной и должно выполняться автоматически.

На основании изложенного модель программного обеспечения автоматизированной проектной процедуры можно представить схемой, показанной на рис. 1.7. Обобщенная модель программного обеспечения проектной процедуры в САПР имеет ряд составляющих и списки данных. В общем виде каждая составляющая должна реализовываться своим программным модулем.

Назначение модуля формирования входных данных состоит в создании списка этих данных для проектирования и его контроля при вводе в систему. Структура и формат списка входных данных зависят от содержания проектной процедуры (расчетного модуля). Необходимо предусмотреть существование нескольких версий списка входных данных, которые с заданными именами хранятся на участках магнитного диска. Структура списка данных определяется разработчиком САПР, а формируется он либо в диалоговом режиме пользователем, либо генерируется автоматически предыдущими проектными процедурами.

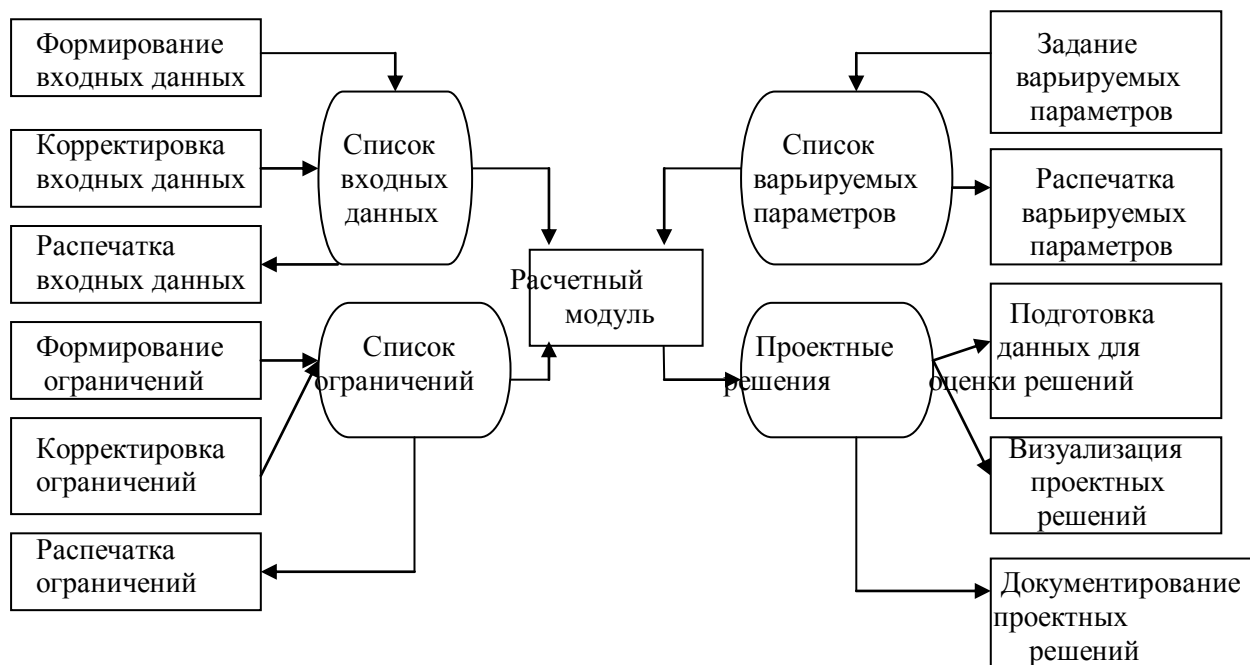


Рис. 1.7. Модель программного обеспечения проектной процедуры в САПР

Программный модуль корректировки входных данных предусматривает редактирование (удаление, вставку и т. п.) списка, потребность в котором воз-

никает из-за ошибок пользователя при вводе данных, обнаруживаемых при контроле, а также при необходимости их уточнения в результате анализа и оценки проектных решений.

Для обеспечения тщательного контроля в САПР должны быть предусмотрены программные средства для визуализации списков данных. В общем случае необходимо иметь возможность получения нескольких видов распечатки списка данных: двоичный, десятичный, символьный, табличный и по записям. Для реализации различных требований пользователя распечатка может выводиться на экран дисплея или на АЦПУ. Все эти операции выполняет модуль распечатки входных данных.

Программные модули формирования, корректировки и распечатки ограничении на процесс проектирования функционируют аналогично описанным. Структура и формат ограничений зависят от проектного модуля, но они существенно меньше подвержены изменениям, чем структура и формат исходных данных. Однако необходимо предусматривать существование нескольких версий этих списков (например, общих требований к техническим средствам со стороны различных заказчиков).

Создание и контроль списка варьируемых параметров осуществляются программными модулями их задания и распечатки.

Расчетный модуль программного обеспечения процесса проектирования предназначен для автоматического выполнения ЭВМ всех тех операций проектной процедуры, которые удалось полностью формализовать.

Получаемые варианты проектных решений обрабатываются программным модулем подготовки данных для оценки решений и передаются модулю визуализации. Анализируя результаты проектно-конструкторского процесса, инженер должен иметь возможность просмотра выходных данных на АЦПУ, дисплее и графопостроителе, например, в виде таблиц, схем и чертежей.

Допустимо существование нескольких версий проектных решений, которые хранятся на магнитном диске и могут быть представлены в требуемом виде с помощью программного модуля документирования проектных решений.

Связь между различными программными модулями проектной процедуры и взаимодействие данной проектной процедуры с другими происходит через общую память.

Это позволяет осуществлять интерактивный автоматизированный процесс проектирования с сохранением множества различных версий, как входных данных, так и проектных решений. Для выполнения требования принципа рациональной связи САПР с окружающей средой при проектировании программного обеспечения следует стремиться к тому, чтобы список входных данных был результатом предыдущих проектных процедур или модулей. Это достигается при разработке информационного обеспечения САПР.

Вопросы для самопроверки

- 1 Что такое «Модель»?
- 2 В чем заключается смысл моделирования?
- 3 Перечислите основные исторические этапы развития моделирования
- 4 Для каких целей выполняется Информационное моделирование зданий?
- 5 Какие существуют виды моделирования?
- 6 Что такое «BIM»?
- 7 Какова практическая польза от информационной модели здания?
- 8 Какие существуют формы получения информации из модели?
- 9 Перечислите компьютерные программы для моделирования зданий и сооружений?
- 10 В чем заключается принципы построения САПР?

2 Метод конечных элементов

Одним из методов, получающим все большее распространение в моделировании и вычислительных программных комплексах, является метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод рассматривает ограниченную область (плоскую или объемную), которая разбивается на конечное число элементов (в плоской задаче обычно принимаются треугольные элементы), при этом стыковка элементов осуществляется только в вершинах. Таким образом, условия равновесия и совместности деформаций соблюдаются только в общих узлах элементов. Для определения неизвестных усилий в узлах и смещений узлов по заданным усилиям или перемещениям на границе области составляются уравнения равновесия и совместности деформаций, число которых соответствует числу узлов расчетной схемы.

Для решения таких задач используются современные программно-вычислительные комплексы (ПК) Cosmos/Design Star, MSC/Nastran (NAsa STRuctural ANalysis), ANSYS, Structure Cad, «Лира-САПР», «STARK ES», «Plaxis» и др.

Анализ конструкций с использованием МКЭ является фактическим мировым стандартом для прочностных и других видов расчетов конструкций. Основой этого служит универсальность МКЭ, позволяющая единым способом рассчитывать различные конструкции с разными свойствами материалов и находить параметры их напряженно-деформированного состояния (НДС).

2.1 Теоретические основы МКЭ

Метод конечных элементов (МКЭ) предназначен для решения задач механики деформируемого твердого тела, связанных с исследованием напряженно-деформированного состояния сложных систем, решение которых аналитически будет практически неосуществимо. Программы, реализующие МКЭ, позволяют точно создавать сложную геометрическую схему с применением объемных конечных элементов, учитывать нелинейность работы материалов, моделировать сложную схему нагружения и жизненный цикл конструкции.

Решение задачи определения полей напряжений и перемещений от действия заданных нагрузок сводится к системе дифференциальных уравнений равновесия, которые для задач линейной теории упругости в операторном виде имеют следующий вид:

$$Au = -B^T (DBu) + f = 0, \quad (2.1)$$

где B – матричный линейный дифференциальный оператор, с помощью которого вектор деформаций $e(u)$ выражается через вектор перемещений u , $e(u) = Bu$;

D – матрица упругости, определяющая линейную связь между векторами напряжений σ и деформаций ε , $\sigma = D\varepsilon$ (закон Гука);

B^m – транспонированная матрица.

Свойства дифференциального оператора A для задач механики позволяют

осуществить вариационную постановку этих задач, т.е. заменить задачу решения дифференциальных уравнений (2.1) задачей нахождения минимума функционала полной энергии $I(u)$:

$$I(u) = \Pi(u) + W(u), \quad (2.2)$$

где $\Pi(u)$ - потенциальная энергия деформации:

$$\Pi(u) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (DBu)(Bu) d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma(u) \varepsilon(u) d\Omega;$$

$W(u)$ - работа внешних сил:

$$W(u) = \int_{\Omega} f \cdot u d\Omega.$$

Функция u , доставляющая минимум функционалу (2.2), является решением дифференциального уравнения (2.1). Функционал полной энергии вида (2.2) является функцией Лагранжа.

Условием минимума функционала (2.2) являются равенства принципа возможных перемещений: при любом возможном перемещении v сумма возможных работ внутренних и внешних сил равна нулю.

Обозначив возможную работу внутренних сил:

$$a(u, v) = \int_{\Omega} (DBu)(Bv) d\Omega = \int_{\Omega} \sigma(u) \varepsilon(v) d\Omega;$$

возможную работу внешних сил:

$$(f, v) = W(v) = \int_{\Omega} \sigma(u) \varepsilon(v) d\Omega,$$

запишем принцип возможных перемещений в виде

$$a(u, v) + (f, v) = 0 \quad (2.3)$$

Левая часть равенства (2.3) является производной функционала полной энергии (2.2).

Задача решения уравнений равновесия (2.1) и вариационная задача минимизации функционала (2.2), то есть нахождения функции u , удовлетворяющей (2.3), эквивалентны и имеют одно и то же решение.

Основная концепция МКЭ заключается в дискретизации рассчитываемой схемы, которая условно разделяется на конечные элементы, вводится система кусочно-непрерывных функций $\{\varphi_i(x)\}$, определенных на конечном числе подобластей – звездах конечных элементов, то есть

$$\varphi_i(x) = \begin{cases} \varphi_{i,j} & x \in \Omega_j \\ 0 & x \in \overline{\Omega_j} \end{cases}. \quad (2.4)$$

Искомая (аппроксимирующая) функция перемещений по области системы $u(x)$, $x \in \Omega$ приближенно принимается в виде:

$$u_h(x) = \sum_{i=1}^L q_i \varphi_i(x), \quad (2.5)$$

где L - общее число узловых неизвестных.

Узловые неизвестные q_i представляют собой искомые значения перемещений и их производных в узлах расчетной сетки.

При подстановке (2.4) в (2.3) задача определения непрерывной функции

$u(x)$ сводится к определению значений конечного числа неизвестных q_i .

На основе (2.5) определяется функция перемещений по области системы, а по ней, на основе известных соотношений теории упругости, и другие компоненты напряженно-деформированного состояния.

Конечно-элементная модель, представляющая собой совокупность соединенных между собой в узлах КЭ характеризуется матрицами жесткости отдельных элементов, отражающих связь между перемещениями узлов элемента и силами, действующими на них, и матрицей жесткости системы (глобальная матрица жесткости), устанавливающей связь между перемещениями узлов системы и силами, действующими на них.

Обозначив K матрицу жесткости с элементами $K_{i,j}$, вектор P с элементами P_i - вектором нагрузок или вектором правых частей, q - вектором узловых неизвестных, запишем уравнения МКЭ в матричной форме:

$$Kq + P = 0 \quad (2.6)$$

Разделение системы на конечные элементы позволяет представить возможные работы перемещений и внешних сил в виде сумм по отдельным элементам:

$$a(u,v) = \sum_r a_r(u,v); \quad (f,v) = \sum_r (f,v)_r \quad (2.7)$$

Это позволяет составлять элементы матрицы K и вектора P из отдельных компонентов. Так, элемент ij матрицы K и элемент i вектора P определяются по формулам

$$K_{ij} = \sum_{r \in ij} K_{ijr}; \quad P_i = \sum_{r \in i} P_{ir}, \quad (2.8)$$

где $r \in ij$, $r \in j$ - суммирование по всем элементам, содержащим i и j узловые неизвестные;

K_{ijr} , P_{ir} - компоненты матрицы жесткости и вектора узловых сил r конечного элемента.

При решении задач, где имеет место изменение расчетной схемы по мере деформирования конструкции, применяется шагово-итерационный метод, позволяющий формировать последовательность (историю) нагружений и учитывать изменение жесткостных характеристик системы на каждом шаге.

Процессор организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения. Матрица жесткости линеаризованной физически нелинейной системы формируется на основании переменных интегральных жесткостей, вычисляемых в точках интегрирования конечного элемента на конкретном шаге.

Схема численного интегрирования по области конечного элемента и набор используемых жесткостей определяются типом конечного элемента. Чтобы получить соответствующий набор интегральных жесткостей, сечение конечного элемента в точках интегрирования дробится на ряд элементарных подобластей (рис. 2.1). В центрах этих подобластей определяются новые значения физико-механических характеристик материала в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом шаге решается линеаризованная задача с

формированием векторов перемещений, усилий и новых интегральных жесткостей по касательному модулю для последующего шага. Количество шагов и коэффициенты к нагрузке задаются пользователем в зависимости от требуемой точности результата. На каждом шаге производится оценка напряженно-деформированного состояния. При этом схема может содержать несколько нагружений, из которых допускается формирование последовательности (истории) нагружения.

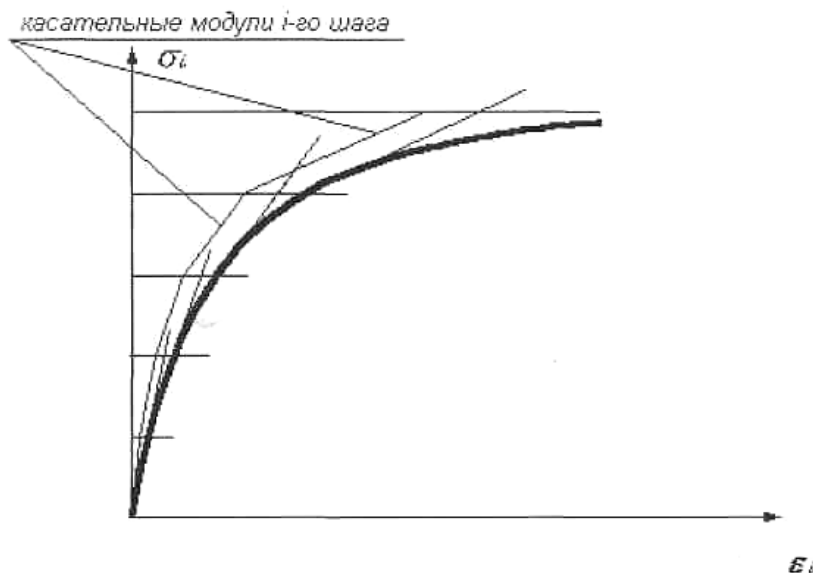


Рис. 2.1 Геометрическая интерпретация шагового метода для случая одноосного сжатия (растяжения)

2.2 Виды КЭ

Для моделирования работы различных типов конструкции используют конечные элементы (КЭ): стержни, пластины (четырёхугольные и треугольные элементы плоской задачи, плиты, оболочки), объёмные КЭ (тетраэдр, параллелепипед, призма), суперэлементы.

Каждый конечный элемент имеет узлы, посредством которых производится объединение их в модель. Элементы могут располагаться в плоскости или в пространстве. Их положение определяется системой координат программы (глобальная система координат). При этом каждый КЭ имеет собственную (местную) систему координат, которая может совпадать или не совпадать с глобальной. Нумерация узлов конечного элемента производится по осям местной системы координат (первый узел всегда будет на оси x).

Основные типы КЭ, глобальная и местная системы координат, нумерация узлов, показаны на рис. 2.2.

Модели, выполненные из различных конечных элементов, представлены на рис. 2.3–2.7.

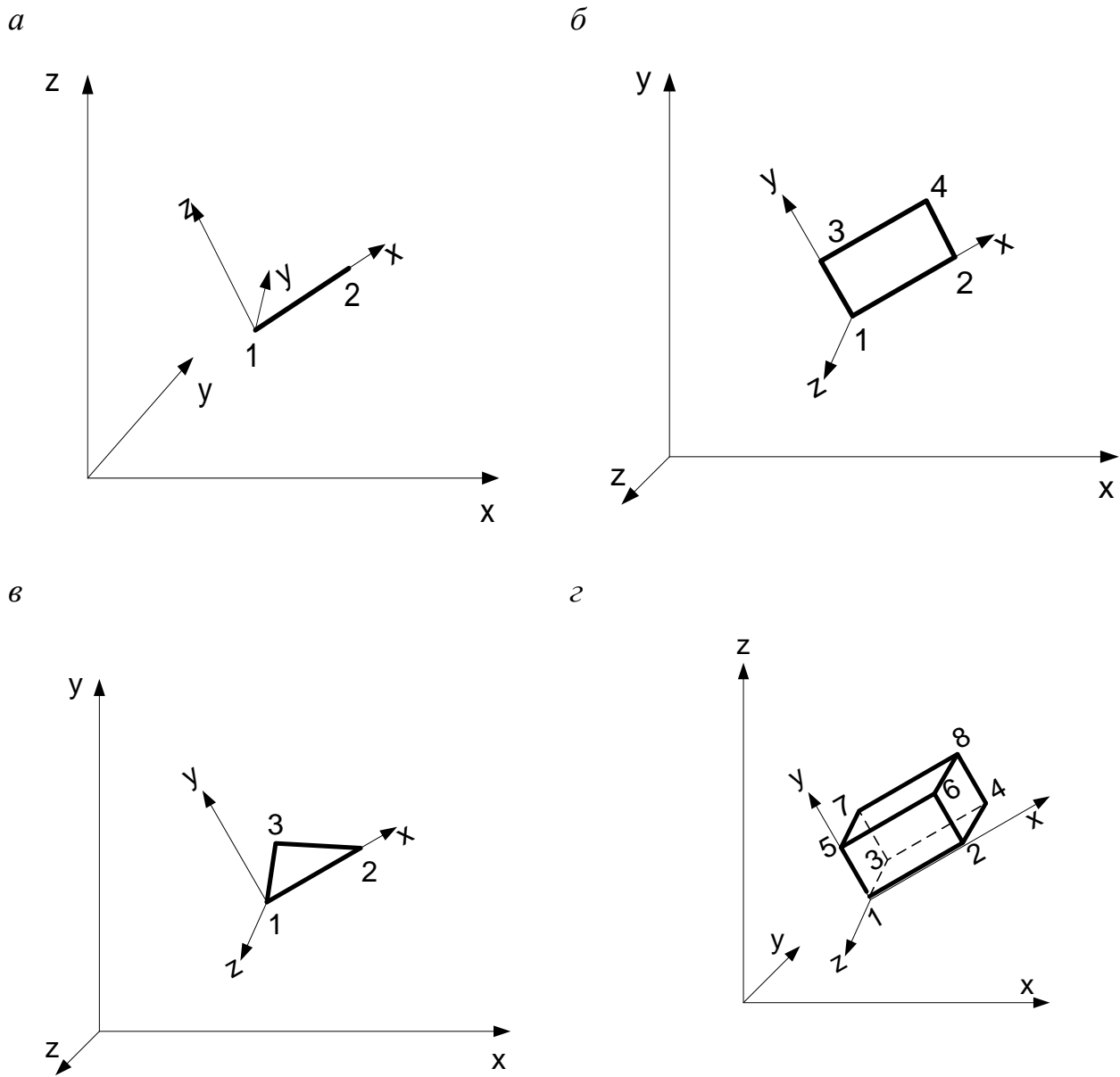


Рис.2.2. Типы КЭ: *a* – стержень (универсальный стержень);
б – пластина, плоский (прямоугольный КЭ плиты); *в* – пластина, плоский (треугольный КЭ плиты); *г* – объемный КЭ (параллелепипед)

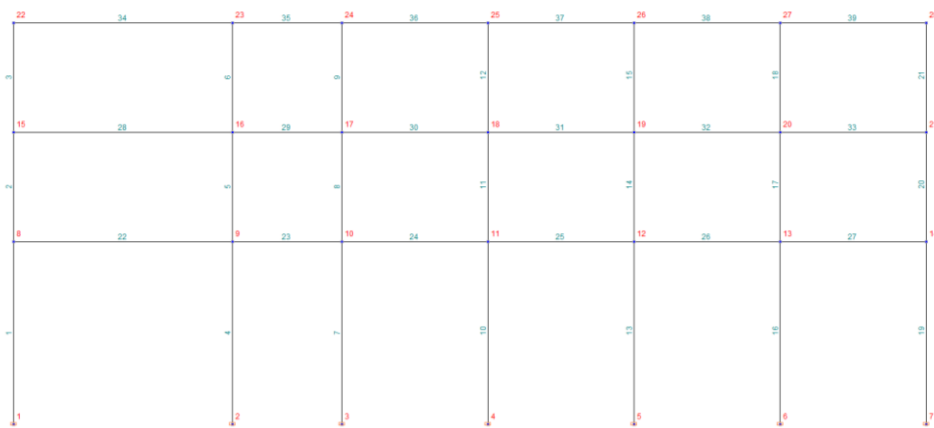


Рис. 2.3. Плоская модель рамы из стержневых КЭ

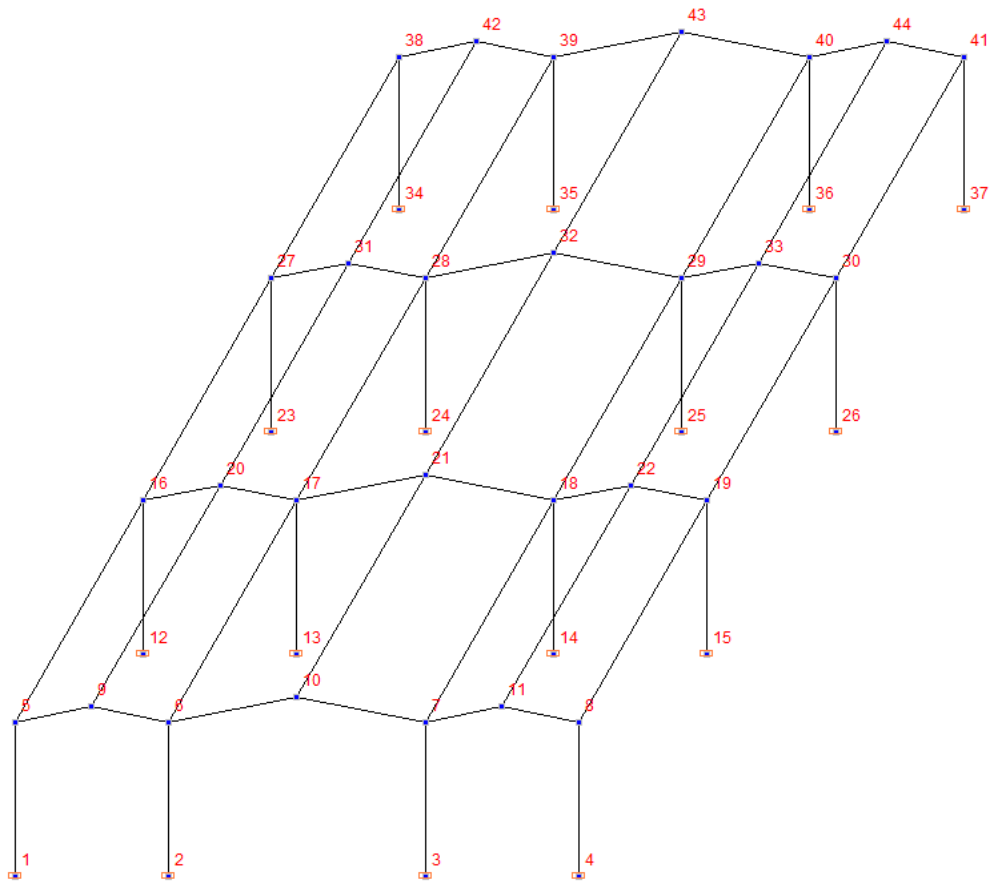


Рис. 2.4. Пространственная модель рамы из стержневых КЭ

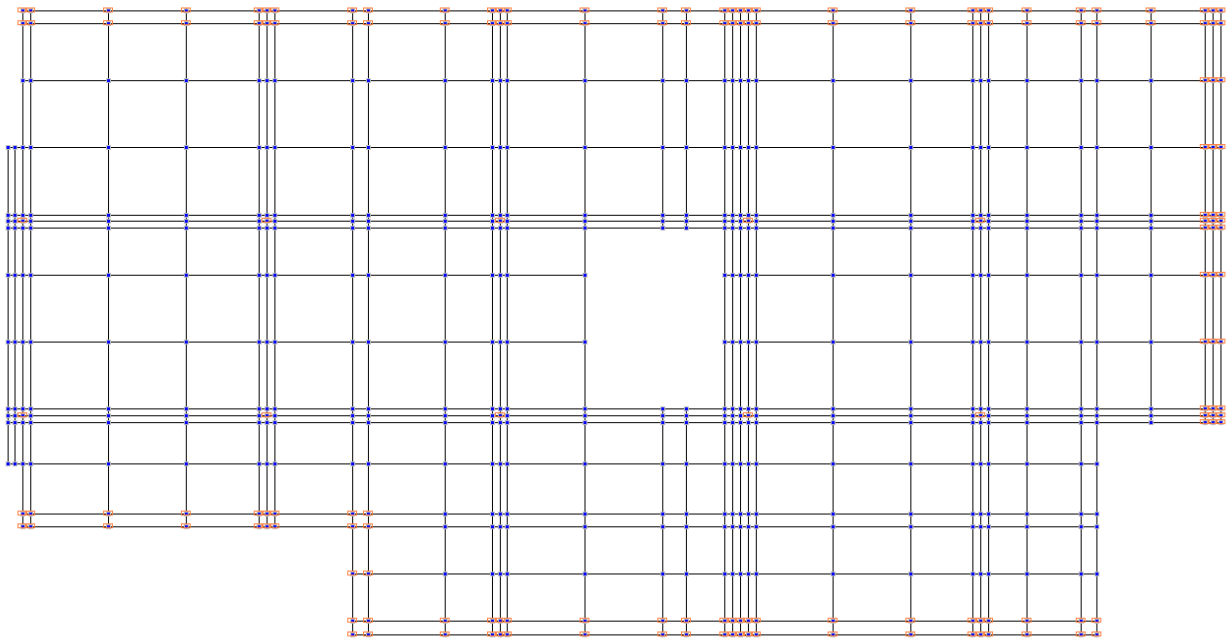


Рис. 2.5. Плоская модель плиты из плоских КЭ

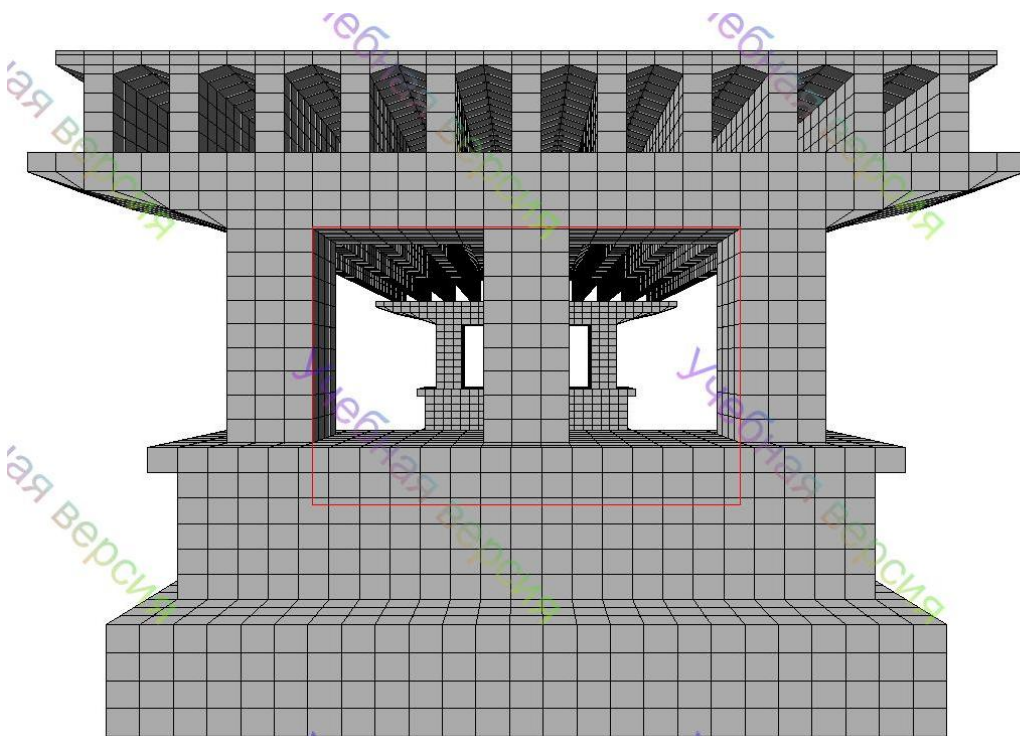


Рис. 2.6. Модель моста из объемных КЭ

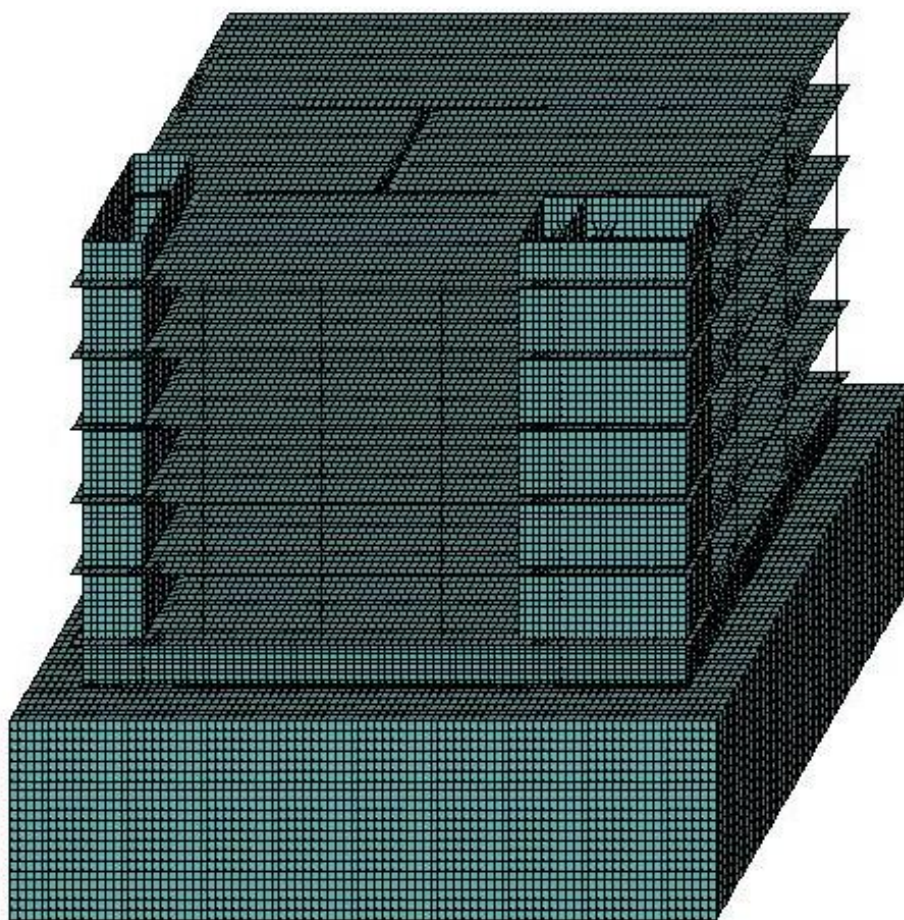


Рис. 2.7. Пространственная модель здания на грунтовом основании (колонны – стержневые КЭ, плиты перекрытия и стены - плоские КЭ, грунтовый массив – объемные КЭ)

Вопросы для самопроверки

- 1 В чем заключается сущность метода конечных элементов (МКЭ)?
- 2 Какие виды конечных элементов (КЭ) применяются в моделировании?
- 3 Что такое местная система координат?
- 4 Для чего применяются узлы в модели?
- 5 Перечислите отличительные особенности конечных элементов.

3 Программные средства моделирования строительных конструкций

3.1 ПК Ли́ра-САПР

Программный комплекс Ли́ра-Windows (ПК ЛИРА) – это многофункциональный программный комплекс для расчета, исследования и проектирования конструкций различного назначения.

ПК ЛИРА с успехом применяется в расчетах объектов строительства, горной промышленности, машиностроения, мостостроения, атомной энергетики, нефтедобывающей промышленности и во многих других сферах, где актуальны методы строительной механики.

Программные комплексы семейства ЛИРА имеют более чем 40-летнюю историю создания, развития и применения в научных исследованиях и практике проектирования конструкций. Программные комплексы семейства ЛИРА непрерывно совершенствуются и приспособляются к новым операционным системам и графическим средам. Новейшим представителем семейства ЛИРА является ПК ЛИРА версии 10.6 Кроме общего расчета модели объекта на все возможные виды статических нагрузок, температурных, деформационных и динамических воздействий (ветер с учетом пульсации, сейсмические воздействия и т.п.) ПК ЛИРА автоматизирует ряд процессов проектирования: определение расчетных сочетаний нагрузок и усилий, назначение конструктивных элементов, подбор и проверка сечений стальных и железобетонных конструкций с формированием эскизов рабочих чертежей колонн и балок.

ПК ЛИРА позволяет исследовать общую устойчивость рассчитываемой модели, проверить прочность сечений элементов по различным теориям разрушений. ПК ЛИРА предоставляет возможность производить расчеты объектов с учетом физической и геометрической нелинейностей, моделировать процесс возведения сооружения с учетом монтажа и демонтажа элементов.

ПК ЛИРА состоит из следующих взаимосвязанных информационных систем.

Система ЛИР-ВИЗОР – это единая графическая среда, которая располагает обширным набором возможностей и функций для формирования адекватных конечно-элементных и супер-элементных моделей рассчитываемых объектов, их подробного визуального обследования и корректировки, для задания физико-механических свойств материалов, связей, разнообразных нагрузок, характеристик различных динамических воздействий, а также взаимосвязей между загрузками для определения их наиболее опасных сочетаний.

Возможности, предоставляемые по результатам расчета при отображении напряженно-деформированного состояния объекта, позволяют произвести детальный анализ полученных данных по полям перемещений и напряжений, по эпюрам усилий и прогибов, по мозаикам разрушения элементов, по главным и эквивалентным напряжениям и по многим другим параметрам. ЛИР-ВИЗОР предоставляет исчерпывающую информацию по всему объекту и по его элементам.

В системе ЛИР-ВИЗОР реализована возможность визуализации схемы и ее напряженно-деформированного состояния в графике OpenGL.

ЛИР-ВИЗОР позволяет вести общение с комплексом на русском и английском языках, причем замена языка может осуществляться на любой стадии работы с комплексом. ЛИР-ВИЗОР дает возможность использовать любую действующую систему единиц измерения, как при создании модели, так и при анализе результатов расчета.

Система ЛИР-КС (Конструктор сечений) позволяет в специализированной графической среде сформировать сечения произвольной конфигурации, вычислить их осевые, изгибные, крутильные и сдвиговые характеристики. Кроме того, предоставляется возможность вычисления секториальных характеристик сечений, координат центров изгиба и кручения, моментов сопротивления, а также определения формы ядра сечения. При наличии усилий в заданном сечении производится отображение картины распределения текущих, главных и эквивалентных напряжений, соответствующих различным теориям прочности.

РАСЧЕТНЫЙ ПРОЦЕССОР реализует современные усовершенствованные методы решения систем уравнений, обладающие высоким быстродействием и позволяющие решать системы с очень большим числом неизвестных. В расчетном процессоре содержится обширная *БИБЛИОТЕКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*, которая позволяет создавать адекватные расчетные модели практически без ограничений на описание реальных свойств рассчитываемых объектов. При этом возможны задание линейных и нелинейных законов деформирования материалов, учет геометрической нелинейности с нахождением формы изначально изменяемых систем, а также учет конструктивной нелинейности. Реализованы законы деформирования различных классов железобетона. При расчетах нелинейных задач производится автоматический выбор шага нагружения с учетом его истории. Возможности процессора позволяют смоделировать поведение сооружения в процессе возведения при многократном изменении расчетной схемы. Полный состав библиотеки конечных элементов

Система УСТОЙЧИВОСТЬ дает возможность произвести проверку общей устойчивости рассчитываемого сооружения с определением коэффициента запаса и формы потери устойчивости.

Система ЛИТЕРА реализует вычисление главных и эквивалентных напряжений по различным теориям прочности.

Система ФРАГМЕНТ позволяет определить силы воздействия одного фрагмента рассчитываемого сооружения на другой как нагрузку. В частности, могут быть определены нагрузки, передаваемые наземной частью расчетной схемы на фундаменты.

Конструирующая система ЛИР-АРМ реализует подбор площадей сечения арматуры колонн, балок, плит и оболочек по первому и второму предельным состояниям в соответствии с действующими в мире нормативами. Существует возможность задания произвольных характеристик бетона и арматуры, что имеет большое значение при расчетах, связанных с реконструкцией сооруже-

ний. Система позволяет объединять несколько однотипных элементов в конструктивный элемент, что позволяет производить увязку арматуры по длине всего конструктивного элемента. Система может функционировать в локальном режиме, осуществляя как подбор арматуры, так и проверку заданного армирования для одного элемента. По результатам расчета формируются чертежи балок и колонн, а так же производится создание dxf-файлов чертежей.

Конструирующая система ЛИР-СТК работает в двух режимах – подбора сечений элементов стальных конструкций, таких как фермы, колонны и балки, и проверки заданных сечений в соответствии с действующими в мире нормативами. Допускается объединение нескольких однотипных элементов в конструктивный элемент. Система может функционировать в локальном режиме, позволяя проверить несколько вариантов при конструировании требуемого элемента.

Система ЛИР-РС, которая информационно связана с системой ЛИР-СТК, позволяет производить редактирование используемой сортаментной базы прокатных и сварных профилей.

Система ДОКУМЕНТАТОР предназначена для формирования отчетов по результатам работы с комплексом. При этом вся информация может быть представлена как в табличном, так и в графическом виде. Табличный и графический разделы необходимой для отчета информации могут быть размещены совместно на специально организуемых для этой цели листах и снабжены комментариями и надписями. Кроме того, табличная информация может быть передана в Microsoft Excel, а графическая – в Microsoft Word. Реализован вывод таблиц в формате HTML.

Протокол расчета задачи. В этом файле содержится следующая информация:

- ориентировочный прогноз времени счета;
- ошибки и предупреждения, обнаруженные при контроле исходных данных;
- требуемые объемы виртуальной и дисковой памяти;
- информация об объеме задачи, количестве неизвестных и элементов, о ширине ленты системы уравнений до и после оптимизации профиля матрицы;
- о наличии геометрической изменяемости;
- о контроле решения системы уравнений;
- о формировании файлов результатов.

Шаговый нелинейный процессор предназначен для решения физически и геометрически нелинейных, а также контактных задач.

В линейных задачах существует прямая пропорциональность между нагрузками и перемещениями вследствие малости перемещений, а также между напряжениями (усилиями) и деформациями вследствие линейного закона Гука. Поэтому для линейных задач справедлив принцип суперпозиции и независимости действия сил.

В физически нелинейных задачах отсутствует прямая пропорциональность между напряжениями и деформациями. Материал конструкции подчиня-

ется нелинейному закону деформирования. Закон деформирования может быть и несимметричным – с различными пределами сопротивления растяжению и сжатию.

В геометрически нелинейных задачах отсутствует прямая пропорциональность между деформациями и перемещениями. На практике наибольшее распространение имеет случай больших перемещений при малых деформациях.

В задачах конструктивной нелинейности имеет место изменение расчетной схемы по мере деформирования конструкции – например, в момент достижения некоторой точкой конструкции определенной величины перемещения возникает контакт этой точки с опорой.

Для решения таких задач шаговый нелинейный процессор организует процесс пошагового нагружения конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения.

Шаговый нелинейный процессор позволяет получить напряженно-деформированное состояние для мономатериальных и для биматериальных, в частности железобетонных, конструкций. Моделирование физической нелинейности производится с помощью конечных элементов, оперирующих библиотекой законов деформирования материалов.

Моделирование геометрической нелинейности производится с помощью конечных элементов, учитывающих изменение геометрии конструкции и возникновение мембранной группы напряжений (усилий), что позволяет рассчитывать мембранные и вантовые конструкции.

Моделирование конструктивной нелинейности обеспечивается наличием специальных конечных элементов односторонних связей.

Матрица жесткости линеаризованной физически нелинейной системы формируется на основании переменных интегральных жесткостей, получаемых в точках интегрирования как по сечению, так и по конечному элементу при решении линейной задачи на каждом шаге. Сечение конечного элемента в точках интегрирования дробится на ряд элементарных подобластей, в центрах которых определяются новые значения жесткостных характеристик в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом шаге решается линеаризованная задача с формированием векторов перемещений, усилий (напряжений) и новых жесткостей по касательному модулю деформации для следующего шага.

При расчете геометрически нелинейных систем считается, что закон Гука соблюдается. На каждом шаге происходит учет мембранной группы усилий (для стержней – учет продольной силы) при построении матрицы жесткости. Для решения нелинейных задач необходимо задавать информацию о количестве шагов и коэффициентах к нагрузке. Схема может содержать несколько нагружений, из которых может быть сформирована последовательность (история) нагружений. Для решения геометрически нелинейных задач реализован автоматический выбор шага нагружения.

Процессор МОНТАЖ предназначен для прочностного расчета конструкций с учетом процесса возведения и предусматривает два вида монтажных операций – монтаж и демонтаж элементов. Изменение условий закрепления конст-

рукции или сопряжения элементов между собой моделируется с помощью специальных КЭ, например связи конечной жесткости, упругой связи между узлами, односторонней связи и т.п.).

В результате работы процессора МОНТАЖ вычисляются усилия и напряжения в элементах, накапливаемые в процессе возведения, а также расчетные сочетания усилий (PCY) в них.

По умолчанию перемещения узлов в процессе счета не накапливаются, а их значения выдаются независимо для каждой стадии. Если же перемещения необходимо в процессе расчета накопить, то в таблице моделирования нелинейных загрузжений вводится признак учета предыстории нагружения.

Результаты работы процессора МОНТАЖ могут быть импортированы в конструирующие системы ЛИР-АРМ и ЛИР-СТК.

Общий вид интерфейса программы «Лири» и вид модели в плоской постановке представлены на рис. 3.1.

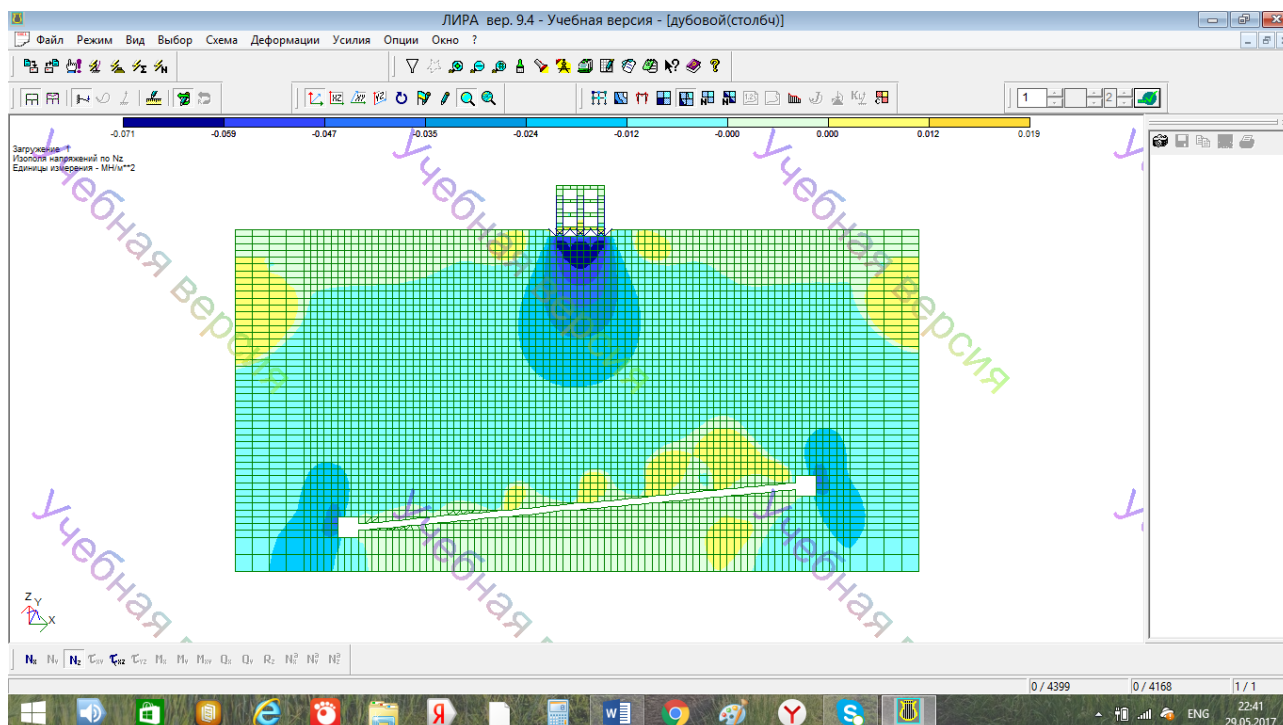


Рис. 3.1 – Интерфейс программы «Лири».

Плоская модель

«Здание – грунтовый массив – подземное сооружение»

3.2 ПК «Structure CAD»

Structure CAD – интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций

В состав системы входит высокопроизводительный вычислительный комплекс SCAD, а также ряд проектирующих и вспомогательных программ, которые позволяют комплексно решать вопросы расчета и проектирования стальных и железобетонных конструкций. Система постоянно развивается, совершенствуются интерфейс пользователя и вычислительные возможности,

включаются новые проектирующие компоненты.

Ядро системы составляет проектно-вычислительный комплекс Structure CAD (SCAD), который базируется на методе конечных элементов и предназначен для расчета напряженно-деформированного состояния, анализа устойчивости, а также решение задач статики и динамики для широкого класса строительных, машиностроительных и других конструкций

SCAD Office включает следующие программы:

- SCAD - вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов
- КРИСТАЛЛ - расчет элементов стальных конструкций
- АРБАТ - подбор арматуры и экспертиза элементов железобетонных конструкций
- КАМИН - расчет каменных и армокаменных конструкций
- ДЕКОР - расчет деревянных конструкций
- ЗАПРОС - расчет элементов оснований и фундаментов
- ОТКОС - анализ устойчивости откосов и склонов
- ВЕСТ - расчет нагрузок по СНиП "Нагрузки и воздействия" и ДБН
- МОНОЛИТ - проектирование монолитных ребристых перекрытий
- КОМЕТА, КОМЕТА-2 - расчет и проектирование узлов стальных конструкций
- КРОСС - расчет коэффициентов постели зданий и сооружений на упругом основании
- КОНСТРУКТОР СЕЧЕНИЙ - формирование и расчет геометрических характеристик сечений из прокатных профилей и листов
- КОНСУЛ - построение произвольных сечений и расчет их геометрических характеристик на основе теории сплошных стержней
- ТОНУС - построение произвольных сечений и расчет их геометрических характеристик на основе теории тонкостенных стержней
- СЕЗАМ - поиск эквивалентных сечений
- КоКон - справочник по коэффициентам концентрации напряжений и коэффициентам интенсивности напряжений
- КУСТ - расчетно-теоретический справочник проектировщика.

Единая графическая среда синтеза расчетной схемы и анализа результатов обеспечивает неограниченные возможности моделирования расчетных схем от самых простых до самых сложных конструкций, удовлетворяя потребностям опытных профессионалов и оставаясь при этом доступной для начинающих. Высокопроизводительный процессор позволяет решать задачи большой размерности (сотни тысяч степеней свободы при статических и динамических воздействиях). SCAD включает развитую библиотеку конечных элементов для моделирования стержневых, пластинчатых, твердотельных и комбинированных конструкций, модули анализа устойчивости, формирования расчетных сочетаний усилий, проверки напряженного состояния элементов конструкций по различным теориям прочности, определения усилий взаимодействия фрагмента с остальной конструкцией, вычисления усилий и перемещений от комбинаций

загружений. В состав комплекса включены программы подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций и проверки сечений элементов металлоконструкций. Система постоянно развивается, совершенствуются интерфейс пользователя и вычислительные возможности, включаются новые проектирующие компоненты.

Вычислительные возможности:

- высокая скорость расчета;
- развитая библиотека конечных элементов;
- эффективные методы оптимизации матрицы жесткости.

Моделирование конструкций:

– развитые графические средства формирования и корректировки геометрии расчетных схем, описания физико-механических свойств материалов, задания условий опирания и примыкания, а также нагрузок;

– большой набор параметрических прототипов конструкций, включающий рамы, фермы, балочные ростверки, оболочки, поверхности вращения, аналитически заданные поверхности;

– автоматическая генерация произвольной сетки конечных элементов на плоскости;

– формирование сложных расчетных моделей путем сборки из различных схем;

– широкий выбор средств графического контроля всех характеристик расчетной схемы;

– возможность работы на сетке разбивочных (координационных) осей;

– развитый механизм работы с группами узлов и элементов;

– формирование расчетной модели путем копирования всей схемы или ее фрагментов;

– импорт геометрии из ArchiCAD, HyperSteel, чтение данных в форматах DXF, DWG.

Результаты расчета отображаются как в графической, так и в табличной формах:

– в графической форме результаты расчета перемещений выводятся в виде деформированной схемы, цветовой и цифровой индикации значений перемещений в узлах, а также изополей и изолиний перемещений для пластинчатых и объемных элементов, выполняется анимация форм колебаний для динамических и процесса деформирования для статических нагрузжений;

– для стержневых элементов могут быть получены деформированные схемы с учетом прогибов, а также эпюры прогибов для отдельных элементов;

– усилия в стержневых элементах представляются в виде эпюр для всей схемы или отдельного элемента, а также цветовой индикацией максимальных значений выбранного силового фактора;

– усилия и напряжения в пластинчатых и объемных элементах выводятся в виде изополей или изолиний в указанном диапазоне цветовой шкалы с возможностью одновременного отображения числовых значений в центрах и узлах элементов;

– графическое представление результатов работы постпроцессора подбора арматуры в элементах железобетонных конструкций в виде эпюр для стержневых и изополей или изолиний распределения арматуры для пластинчатых элементов;

– возможность локализации результатов расчета в заданном диапазоне значений перемещений и силовых факторов;

– результаты расчета в табличной форме могут экспортироваться в редактор MS Word или электронные таблицы MS Excel.

Общий вид интерфейса программы и стержневая модель конструкции представлены на рис. 3.2.

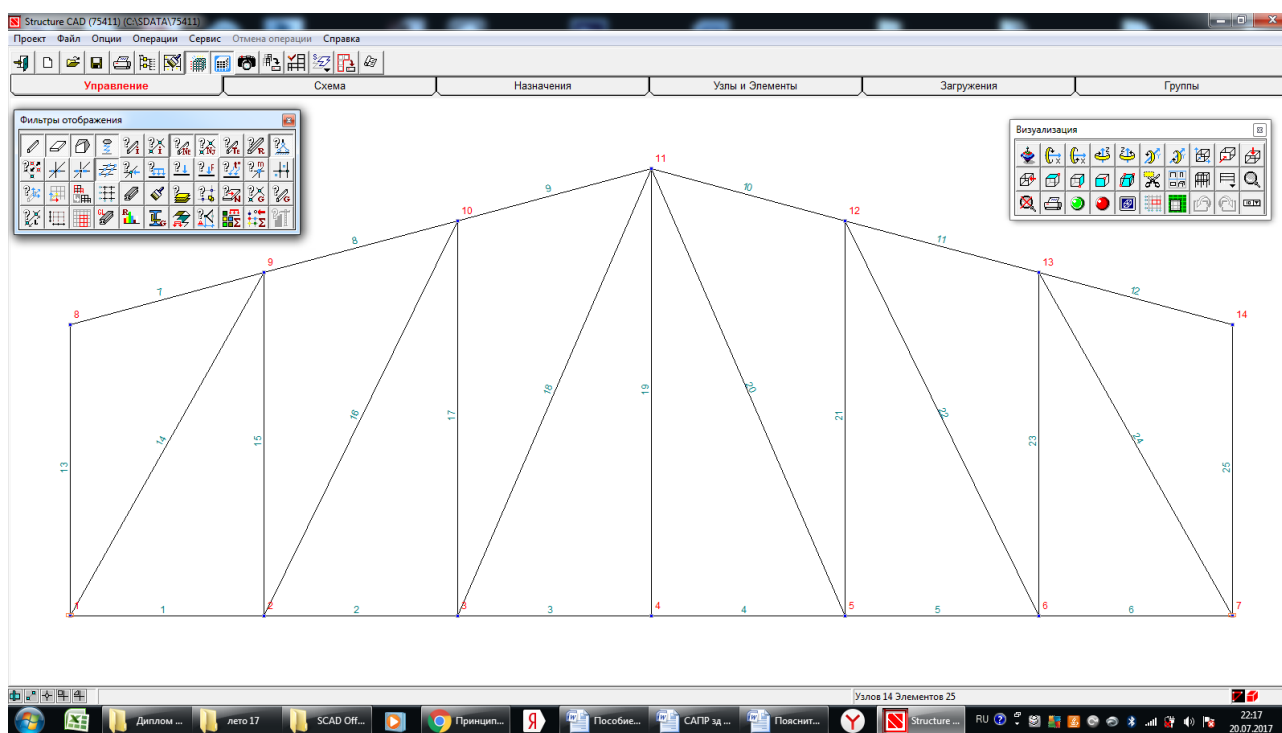


Рис. 3.2 – Интерфейс программы «SCAD».
Стержневая модель стропильной фермы

3.3 Алгоритм построения модели при расчете конструкции:

Последовательность процесса исследования работы модели строительной конструкции, здания и сооружения представлена в виде алгоритма на рисунке 3.3.

Первый этап представляет собой геометрическое моделирование и заключается в выборе системы координат (координатной плоскости), начала координат и геометрических параметров моделируемой системы (ее размеров и сорасположенности элементов в пространстве).

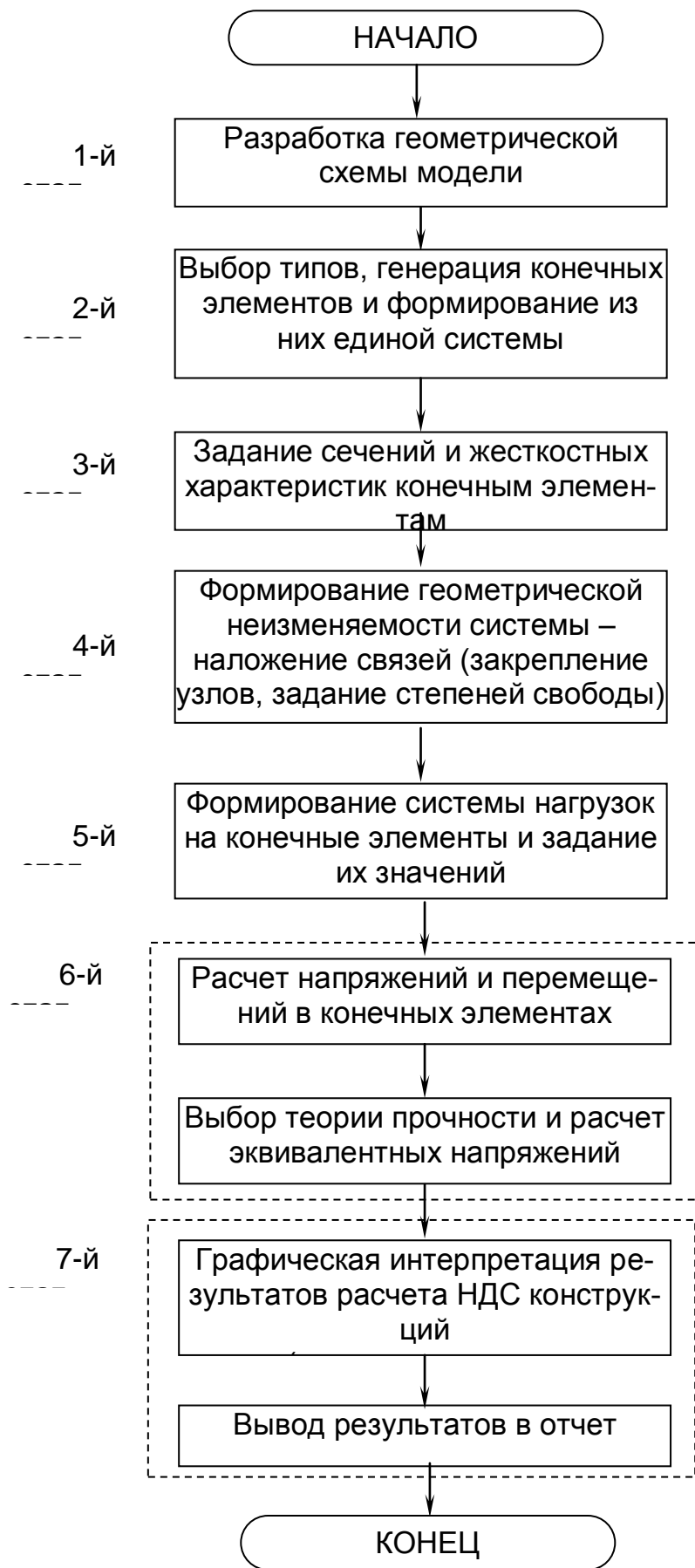


Рис. 3.3. Алгоритм процесса моделирования

Второй этап включает выбор типа конечных элементов (стержни, трех- или четырехугольные пластины, объемные элементы различной конфигурации и др.) из библиотеки КЭ, генерацию регулярных фрагментов (рам, плит, балок-стенок и др.), ферм, поверхностей вращения и т.д. в зависимости от типа поставленной задачи, а также синтез отдельных стандартных фрагментов в единую систему, являющуюся геометрической основой будущей конечно-элементной модели.

Третий этап заключается в задании каждому КЭ или их группе соответствующих выбранному типу сечений, которые выбираются из стандартных или же задаются пользователем самостоятельно, и жесткостных характеристик (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициенты постели (Винклера), которые будут определять параметры напряжений и деформаций элементов при их работе под нагрузкой.

Четвертый этап включает выбор узлов, для которых устанавливаются ограничения в перемещениях по отдельным осям или вращении. Это делается для создания геометрически неизменяемой системы, что является одним из обязательных условий расчета по методу конечных элементов.

Пятый этап заключается в выборе типа, места и направления действия нагрузок, которые выбираются в соответствии с назначенными типами КЭ. ПВК «Ли́ра» позволяет моделировать сосредоточенные и распределенные (равномерно или неравномерно) силы, статические, динамические, гармонические, температурные нагрузки, сосредоточенные или распределенные моменты, нагрузки от собственного веса, а также задавать начальные смещения и повороты узлов модели. Правильное задание типа и величины нагрузки, а также закрепленных узлов во многом определяет корректность постановки задачи и соответственно получаемых результатов.

После выполнения работ первых 6 этапов конечно-элементная модель считается сформированной и может быть запущена на выполнение, т.е. можно производить расчет всех параметров НДС узлов и элементов.

На *шестом* этапе производится расчет всех перемещений (поступательных и вращательных) вдоль осей координат, изгибающих и крутящих моментов, продольных и перерезывающих сил (для стержней); нормальных и тангенциальных напряжений (для пластин и объемных КЭ). Для оценки состояния конструкции (возникают ли допустимые или критические напряжения, произойдет ли разрушение) выбирается теория прочности (максимальных нормальных напряжений, максимальных деформаций, максимальных касательных напряжений, энергетическая, Мора, Ягна-Бужинского, Баландина, Миролубова, Друккера-Прагера, Волкова, Писаренко-Лебедева) и в соответствии с выбранной теорией производится расчет главных и эквивалентных (сжимающих и растягивающих) напряжений, по которым и делается вывод о состоянии конструкции или массива при воздействии заданных нагрузок.

Седьмой этап включает построение графических отображений результатов расчета. Для стержневых систем в масштабе строятся эпюры изгибающих моментов, продольных и перерезывающих сил, указываются их максимальные

значения, а также мозаика перемещений по узлам. Для пластин и объемных элементов строятся изополя перемещений по осям и эквивалентных напряжений. По желанию пользователя можно построить эпюру напряжений или перемещений по любому выбранному сечению.

Значения параметров НДС конструкции или массива могут быть сформированы в отчет и распечатаны.

Вопросы для самопроверки

- 1 Приведите алгоритм построения модели в САПР-программах
- 2 Перечислите программные средства реализации расчетов конструкций зданий?
- 3 Какое назначение САПР-программ?
- 4 Какие возможности предоставляет ПК «Лира»?
- 5 Какие возможности предоставляет ПК «SCAD»?
- 6 Как задаются характеристики материала конструкции в САПР программах?
- 7 Что такое «граничные условия»?
- 8 Какие виды расчета выполняют ПК «Лира» и ПК «SCAD»?

4 Анализ результатов расчета конструкций в САПР программах

4.1 Чтение результатов расчета

Численные методы, в том числе метод конечных элементов (МКЭ), дают возможность получать многочисленную и разнообразную информацию о напряженном и деформированном состоянии конструкции. По каждому узлу конечно-элементной модели (КЭМ) могут быть вычислены величины узловых смещений и узловых сил. По каждому элементу также может быть получено определенное количество числовой информации, характеризующей напряженное состояние элемента. В автоматизированных системах расчета и проектирования силовых конструкций предусмотрена выдача нескольких десятков различных числовых характеристик напряженного состояния. При проектировании реальных конструкций в настоящее время используют КЭМ, насчитывающее несколько тысяч узлов и несколько тысяч элементов. Объем результатов расчетов таких КЭМ составляет десятки и сотни тысяч чисел. Даже просто прочитать такой объем числовой информации, не говоря уже о том, чтобы его осмыслить, чрезвычайно затруднительно, т.к. средняя скорость восприятия (чтения) человеком алфавитно-цифровой информации составляет 400 бит/с (примерно 5-10 чисел/с). Излишне подробный характер информации затрудняет общую стратегическую оценку оперативного состояния объекта и выбор важнейших характеристик.

Таким образом, в основу информационной модели, предъявляемой пользователю, необходимо ставить характеристики объекта, существенные для процесса принятия решения по данной предметной задаче. Важнейшие характеристики и параметры могут визуально выделяться, а несущественные характеристики и детали ослабляться или не предъявляться вовсе. Изображения в этом случае могут не быть информационно полными, а должны отражать лишь основные параметры и закономерности объектов и процессов.

4.2 Графическая интерпретация

Результаты расчета в общем виде представлены в виде перемещений узлов КЭ и усилий и напряжений в самих КЭ.

Графическая интерпретация результатов расчета зависит от типа КЭ и выполненного расчета. Так, для стержней программные комплексы выдают цветовую индикацию перемещений узлов по направлениям осей перемещения (рис. 4.1), эпюры усилий в стержнях и цветовую индикацию полученных усилий (рис. 4.2–4.3).

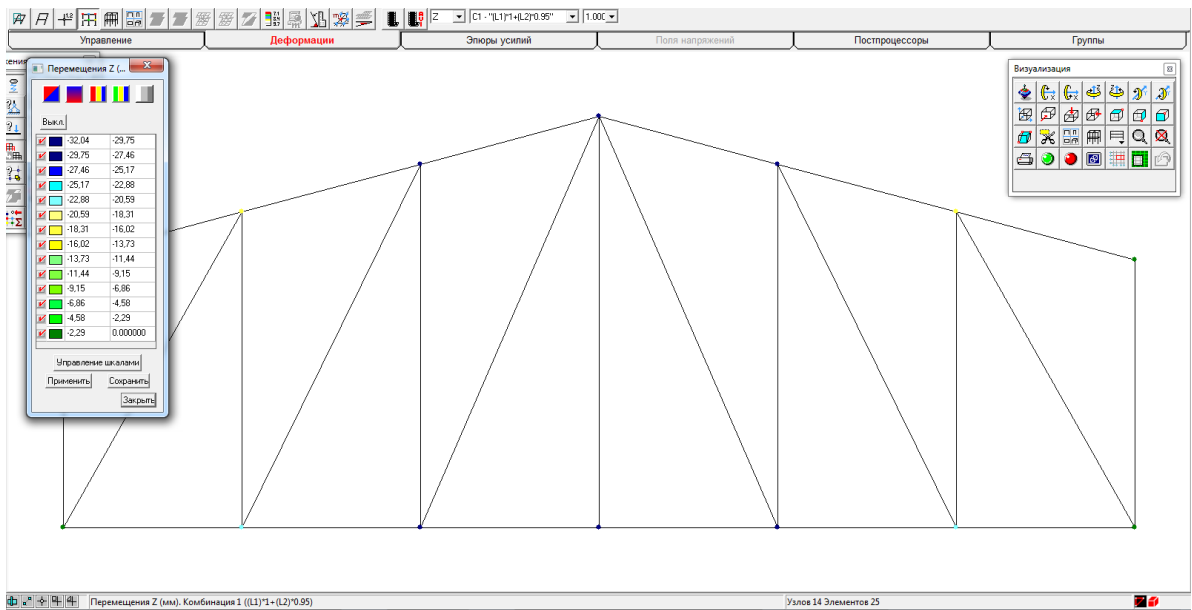


Рис. 4.1. Результаты расчета. Перемещения узлов и их цветовая индикация

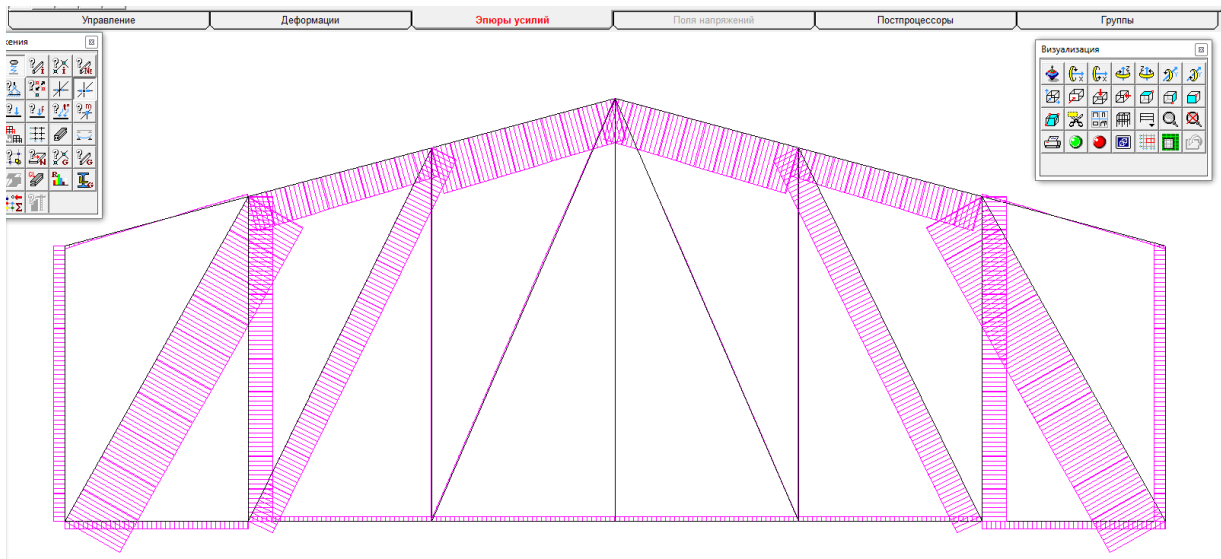


Рис. 4.2. Результаты расчета. Эпюры усилий N в стержнях модели

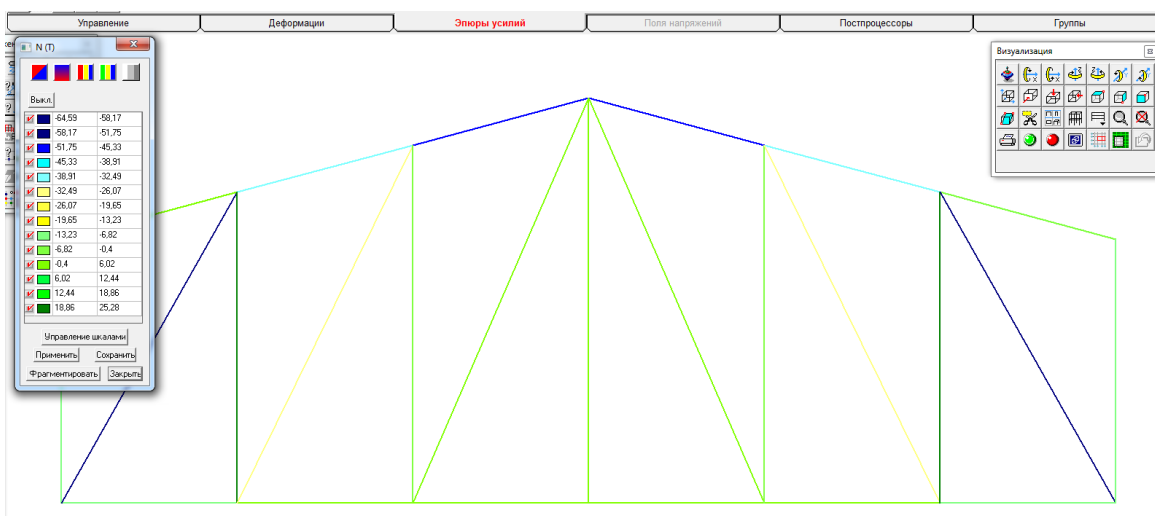


Рис. 4.3. Цветовая индикация значений усилий N в стержнях модели

Результаты расчета моделей из плоских и объемных конечных элементов представлены в виде изополей перемещений узлов (рис. 4.4) и изополей напряжений пластин (рис. 4.5) и объемных КЭ (4.6).

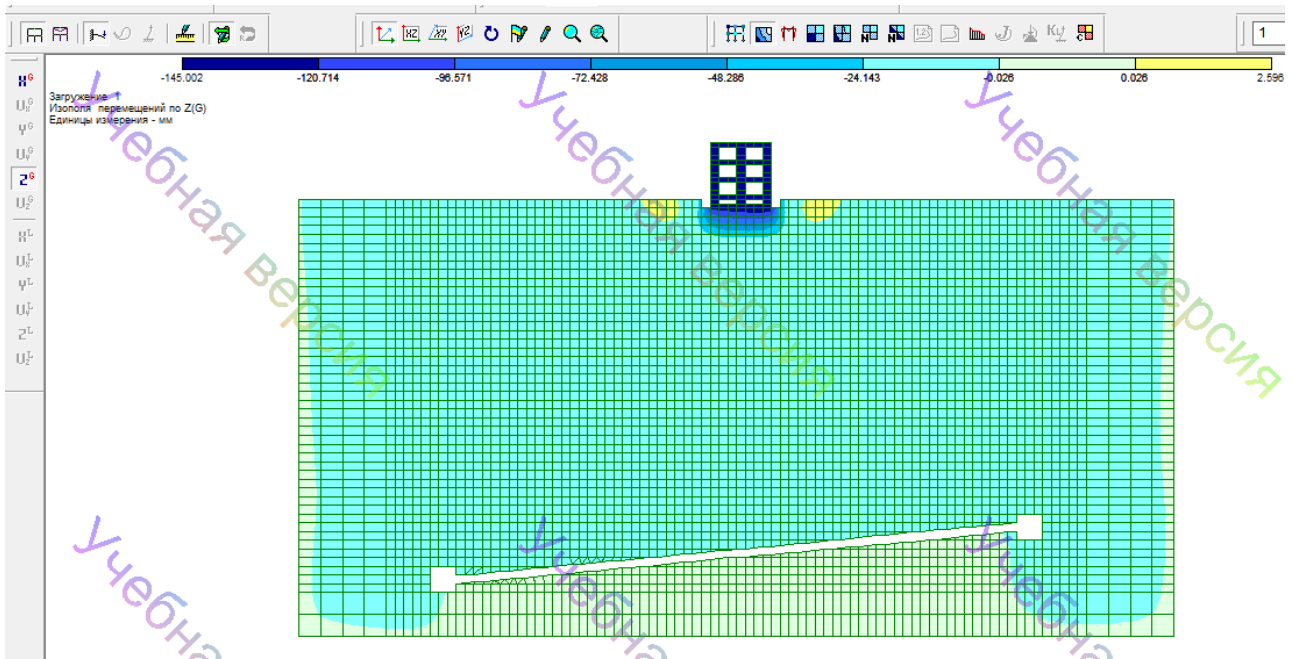


Рис. 4.4. Результаты расчета.
Изополя перемещений по оси Z (деформации)

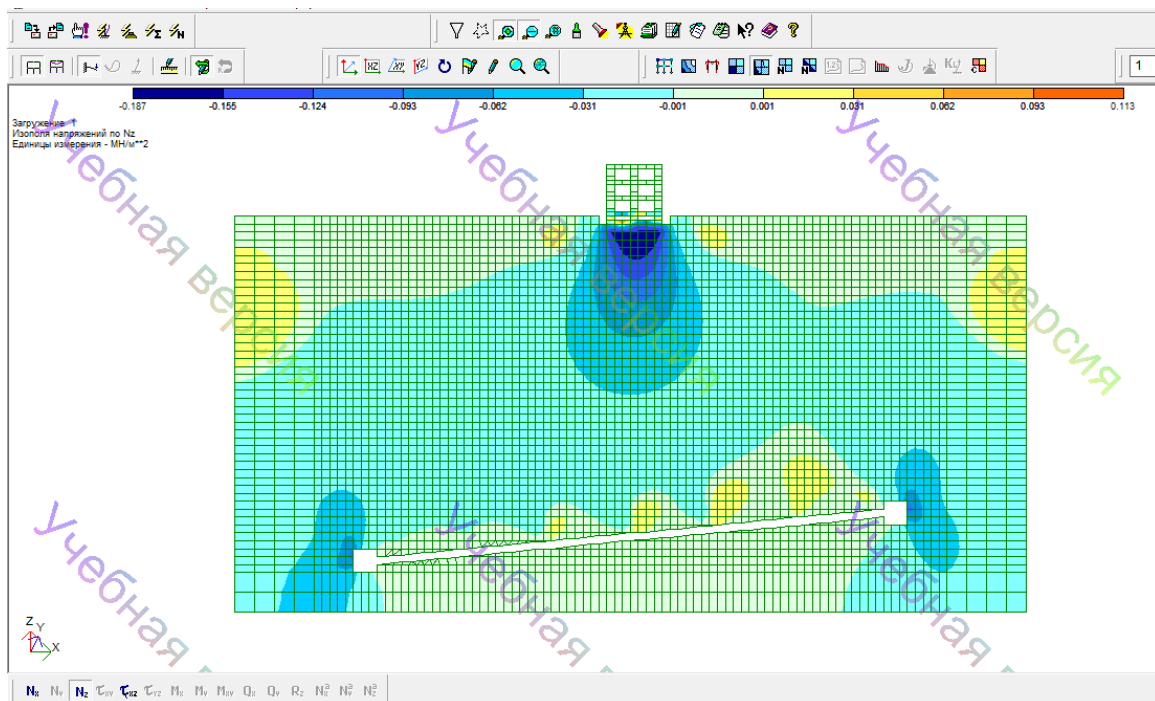


Рис. 4.5. Результаты расчета. Изополя напряжений

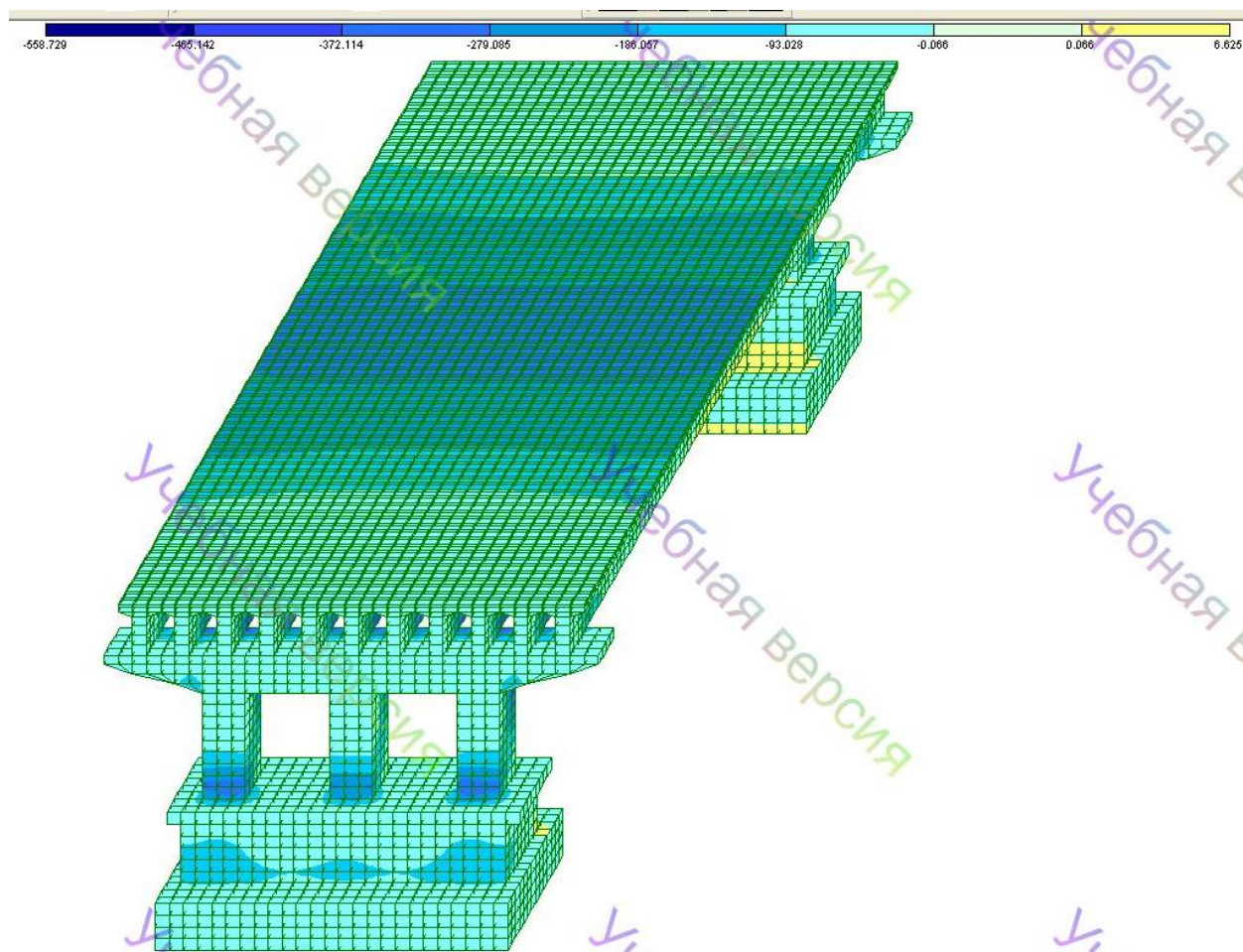


Рис. 4.6. Результаты расчета. Изополю напряжений объемных КЭ

Конструирующие программы, входящие в состав программных комплексов «Лира» и «SCAD» позволяют выполнять конструирование модели. Для металлических конструкций выполняется подбор сечений металлопроката, для железобетонных элементов подбор класса бетона и армирование стержневых и плоских элементов. Результаты расчетов также представляются в графической интерпретации. На рис. 4.7 приведены картограммы армирования плиты перекрытия. На рисунке 4.8 приведен чертеж армирования плиты перекрытия.

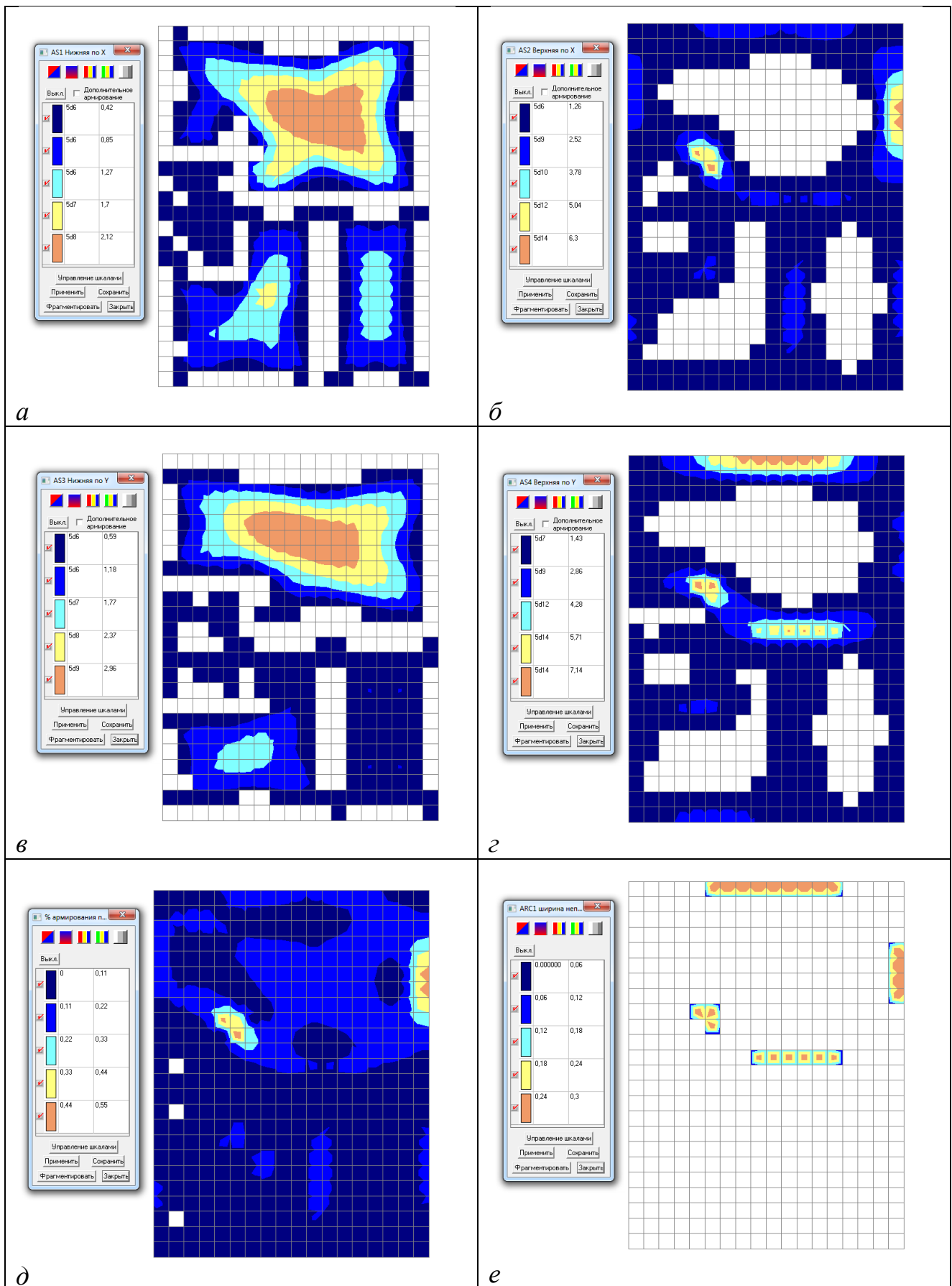


Рис. 4.7. Результаты расчета армирования плиты перекрытия:
а – нижнее по оси *x*; *б* – верхнее по оси *x*; *в* – нижнее по оси *y*;
г – верхнее по оси *y*; *д* – процент армирования; *е* – раскрытие трещин

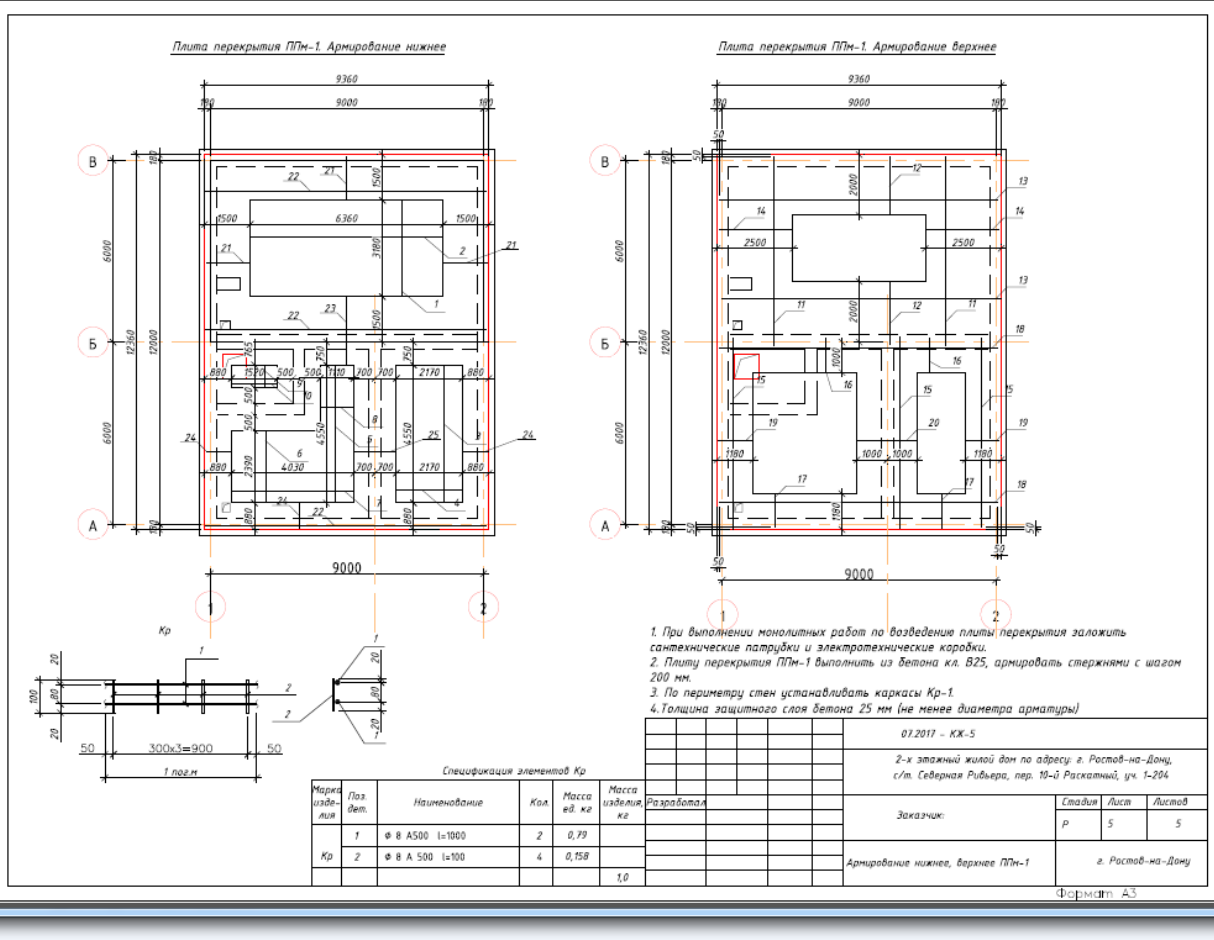


Рис. 4.8. Чертеж армирования плиты перекрытия

4.3 Текстовая документация результатов расчета

При проведении моделирования, начиная с 1-го этапа создания геометрии модели, программные комплексы автоматически формируют текстовый документ, в котором закодирована вся информация о модели. Эти файлы сохраняются в директории программы DATA с расширением *.lir, (ПК Лира), *.Spr (ПК SCAD). После создания модели выполняется расчет в расчетном процессоре программ (рис. 4.9). Результаты расчета также преобразуются в текстовый документ, который располагается в директории WORK программ.

Для пользователя разработан удобный набор команд, позволяющий формировать тестовый документ в виде необходимого набора данных и результатов. Эти документы могут быть в виде текста или таблиц и сохраняются как в MS Word, так и в MS Excel. Результаты армирования и подбора сечений металлопроката также преобразуются в отчет в виде документа.

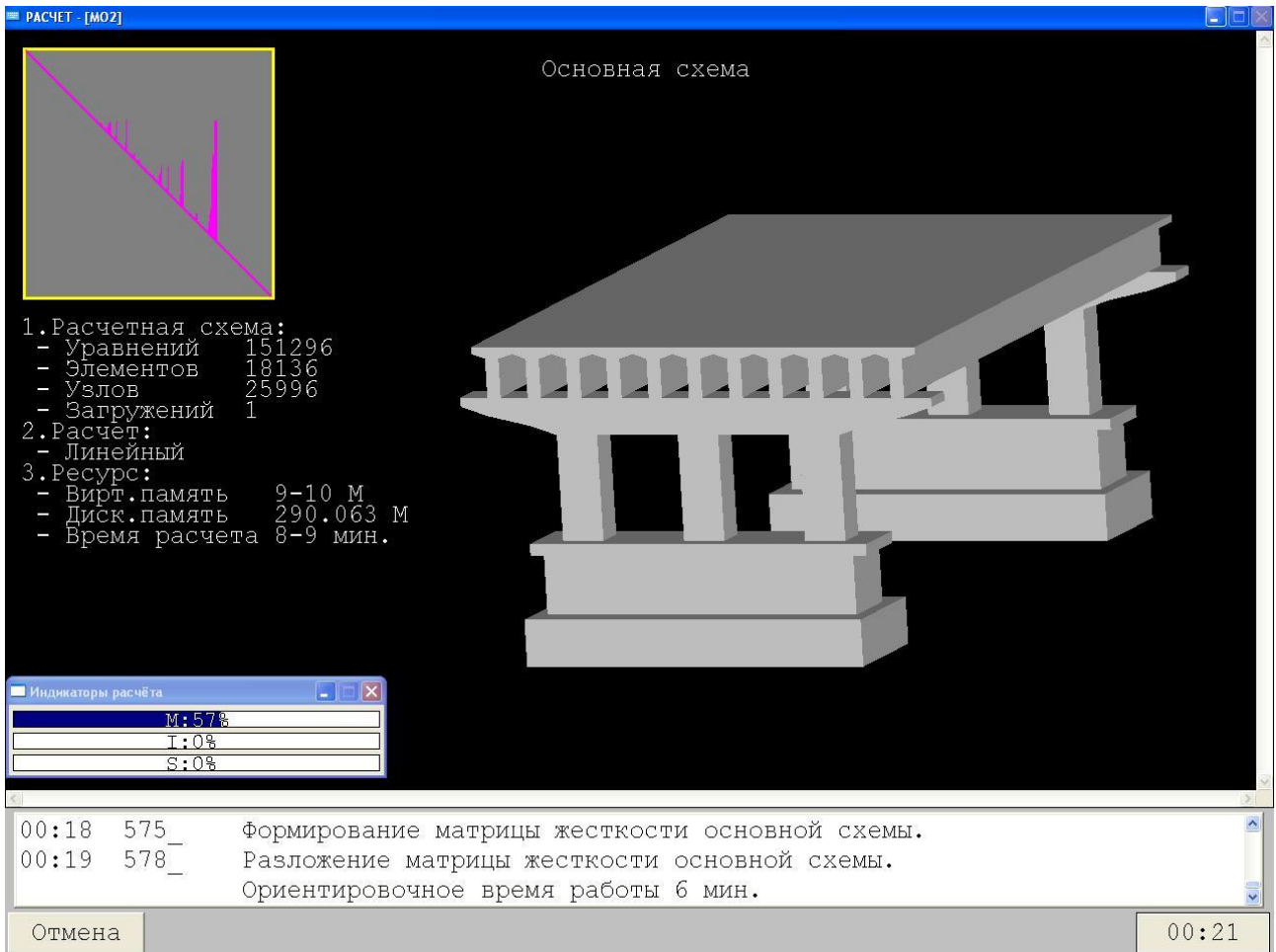


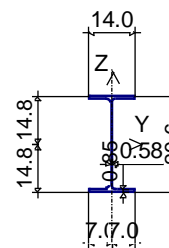
Рис. 4.9. Расчетный процессор ПК «Ли́ра»

Пример результатов расчета металлических конструкций и подбора сечений элементов:

Проверка элементов стальных конструкций Расчет по СП 16.13330.2011

Конструктивный элемент ригель

Расчетное сопротивление стали $R_y = 240345.0 \text{ кН/м}^2$
 Коэффициент условий работы -- 1.0
 Предельная гибкость -- 150.0
 Коэффициент расчетной длины в плоскости X1,Y1 -- 1.0
 Коэффициент расчетной длины в плоскости X1,Z1 -- 1.0
 Длина элемента -- 42.0 м



Сечение
 Двутавр нормальный (Б) по ГОСТ 26020-83 30Б1

Проверено по СНиП	Результаты расчета Фактор	Коэффициенты использования :
п.8.2.1	прочность при действии изгибающего момента	0.33

	My		
п.8.2.1		прочность при действии изгибающего момента	0.01
	Mz		
п.8.2.1		прочность при действии поперечной силы Q_y	0
п.8.2.1		прочность при действии поперечной силы Q_z	0.13
п.9.1.1		прочность при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов без учета пластики	0.34
п.7.1.3		устойчивость при сжатии в плоскости X_1, O, Y_1 (X_1, O, U_1)	0.87
п.7.1.3		устойчивость при сжатии в плоскости X_1, O, Z_1 (X_1, O, V_1)	0.05
пп.9.2.9,		устойчивость в плоскости действия момента	0.1
9.2.10	My при внецентренном сжатии		
п. 9.2.9		устойчивость при сжатии с изгибом в двух плоскостях	0.14
		устойчивость из плоскости действия момента	9.44
пп.9.2.4,9.2.5,9.2.8	My при внецентренном сжатии		
п.8.4.1		устойчивость плоской формы изгиба	8.15
п.10.4.1		предельная гибкость в плоскости X_1, O, Y_1	9.18
п.10.4.1		предельная гибкость в плоскости X_1, O, Z_1	2.28

Коэффициент использования 9.44 - устойчивость из плоскости действия момента M_y при внецентренном сжатии

Вопросы для самопроверки

- 1 В каком виде предоставляются результаты расчета конструкции?
- 2 Что изображается на цветовых картах программ?
- 3 В каких случаях выдаются эпюры усилий?
- 4 В каких случаях выдаются изополя напряжений?
- 5 Что изображено на картах армирования?
- 6 В каких директориях программ формируются текстовые файлы результатов?

Библиографический список

- 1 Городецкий, А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений/А.С. Городецкий, В.И. Заворицкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов: Транспорт, Москва. 1981, с. 143.
- 2 СП 16.13330.2016 «Металлические конструкции»
- 3 СП 20.13330.2012 «Нагрузки и воздействия»
- 4 СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции»
- 5 <http://lira-soft.com> [электронный ресурс]
- 6 www.liraland.ru/ [электронный ресурс]
- 7 <https://rflira.ru> [электронный ресурс]
- 8 <http://scadsoft.com/> [электронный ресурс]
- 9 <http://www.csoft.ru> [электронный ресурс]

Учебное издание

Проконова Марина Валентиновна

Рубцова Яна Сергеевна

САПР ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Редактор Л.И. Сергейчик

Техническое редактирование и корректура Л.И. Сергейчик

Подписано к печати . Формат 60×84/16

Бумага газетная. Усл. печ. л.

Тираж 50. Изд. № 225. Заказ .

Ризография ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового
Полка Народного Ополчения, 2