

*Барабаш М.С.*

**КОМПЬЮТЕРНОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО  
ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ  
СТРОИТЕЛЬСТВА**

УДК 004.94:624.04  
ББК 32.97+38.112  
Б 24

**Рецензенты:**

**А.С. Городецкий** – доктор технических наук, профессор, действительный член Академии строительства Украины, профессор Киевского Национального университета строительства и архитектуры;

**Н.В. Савицкий** - доктор технических наук, профессор, действительный член Академии строительства Украины, проректор по научной работе Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры;

**В.Н. Першаков** - доктор технических наук, профессор, действительный член Академии строительства Украины, профессор Национального авиационного университета.

*Рекомендовано к изданию ученым советом Национального авиационного университета (протокол № 3 от 26.03.2014 г.)*

**Барабаш М.С.**

Б 24 Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография. - К.: Изд-во «Сталь», 2014.-301 с.

ISBN 978-617-676-049-8

В монографии изложены основные подходы к моделированию зданий и сооружений с учетом изменения напряженно-деформированного состояния на протяжении жизненного цикла. В книге представлен анализ методов компьютерного моделирования для различных задач на всех стадиях жизненного цикла, даны примеры технологии проектирования с учетом процесса возведения, реологических процессов, процессов «приспособляемости» при различных формажорных ситуациях. Значительное внимание в книге уделяется методам архитектурно-строительного проектирования с использованием BIM-технологии. Описаны концепции создания компьютерной модели объекта, изложены особенности методов расчета и проектирования зданий и сооружений.

Монография рекомендуется для научных сотрудников и инженерно-технических специалистов научно-исследовательских и проектных организаций, а также аспирантов, магистров, студентов и преподавателей архитектурных и строительных ВУЗов.

УДК 004.94:624.04  
ББК 32.97+38.112

ISBN 978-617-676-049-8

\*\*\*\*\* © Барабаш М. С., 2014

**СОДЕРЖАНИЕ**

Термины и определения	6
Список сокращений	10
ВВЕДЕНИЕ	11
ГЛАВА 1 . АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА	15
1.1. Основные этапы жизненного цикла объекта строительства	15
1.2. Обоснование методов компьютерного моделирования строительных объектов на различных этапах жизненного цикла	21
1.3. Изменение напряженно-деформированного состояния конструкций объекта строительства на различных стадиях его жизненного цикла	24
1.4. Методы анализа внешней среды, как фактора влияния на жизненный цикл здания	28
1.5. Методы анализа причин возникновения аварийных ситуаций и оценки безопасности строительных конструкций	32
ГЛАВА 2 . АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КАК БАЗОВЫЙ ЭТАП ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА	47
2.1. Анализ процесса проектирования	47
2.2. Задачи автоматизации процесса проектирования	53
2.3. Инструментальные средства и существующие подходы к автоматизации процесса проектирования объектов строительства	56
2.3.1. Методы организации обмена информацией между участниками процесса проектирования	66
2.3.2. Специализированные программные средства автоматизации проектных работ	71
2.4. Технология интеграции программных средств в архитектурно-строительном проектировании	75
2.5. Концепция информационной модели объекта строительства	84
2.6. Концепция аналитической модели	86
2.6.1. Методы организации обмена данными между программными комплексами	95
2.6.2. Методы, средства и инструменты создания аналитической модели	102
2.6.3. Многокритериальный контроль качества модели с интерактивным отчётом об ошибках и некоррекциях	108
2.6.4. Интерактивное графическое задание и редактирование нагрузок, формирование загружений	111

2.6.5. Методика задания последовательности возведения здания	117
2.7. Решение проектно-конструкторских задач с помощью компьютерных технологий	119
2.7.1. Основные компоненты САПР	123
2.7.2. Организация процесса автоматизированного проектирования	124
2.8. Методы идеализации объекта строительства при создании расчетной схемы	129
2.8.1. Моделирование механических свойств строительных материалов	130
2.8.2. Методы моделирования грунтового основания	134
<b>ГЛАВА 3 . КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ВОЗВЕДЕНИЯ</b>	<b>137</b>
3.1. Влияние процесса возведения на напряженно-деформированное состояние конструкций	137
3.2. Методы возведения конструкций. Математические основы моделирования	140
3.3. Методы компьютерного моделирования строительных объектов с учетом особенностей возведения	145
3.3.1. Примеры компьютерного моделирования процесса возведения конструкций высотных зданий	146
3.3.2. Методы компьютерного моделирования процесса возведения подземных конструкций	157
3.3.3. Методы компьютерного моделирования процесса возведения большепролетных покрытий	164
<b>ГЛАВА 4 . КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ЭТАПА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА</b>	<b>172</b>
4.1. Анализ существующих подходов к моделированию зданий и сооружений для исследования несущей способности и процессов приспособляемости строительных конструкций	172
4.2. Особенности эксплуатационного периода (усиление, реконструкция и т.п.) для высотных зданий	175
4.3. Моделирование системы «наземная часть – фундаментная конструкция – грунтово-свайное основание»	180
4.4. Влияние проектируемых новых зданий на существующую окружающую застройку	184
4.5. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния конструкций во времени	190
4.5.1. Моделирование изменения НДС железобетонной рамы во времени	196
4.5.2. Моделирование изменения НДС железобетонной оболочки во времени	198
4.6. Методы моделирования аварийных ситуаций	201

---

4.6.1. Пример расчета многопролетной рамы на прогрессирующее обрушение при удалении средних колон	209
4.6.2. Пример расчета многопролетной рамы на прогрессирующее обрушение при удалении крайних колон.	213
4.6.3. Примеры расчета реальных зданий на прогрессирующее обрушение	216
4.7. Методы расчета высотных монолитных зданий на различные виды динамических воздействий	222
4.7.1. Особенности эксплуатации зданий в сейсмических районах.	222
4.7.2. Методика численного моделирования сейсмических воздействий.	226
4.7.3. Моделирование влияния метрополитена на несущие конструкции близстоящих зданий	232
<b>ГЛАВА 5 . МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИЙ</b>	<b>239</b>
5.1. Общие положения. Основные определения	239
5.2. Методика определения риска аварии	241
5.3. Методика решения задач деформирования и разрушения конструкций	248
5.4. Нормативные требования по обеспечению надежности и конструктивной безопасности строительных объектов	250
<b>ГЛАВА 6 . ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА</b>	<b>255</b>
6.1. Моделирование пространственной работы несущей системы объекта строительства на всех стадиях жизненного цикла	255
6.2. Основные подходы и расчетные модели, используемые при расчете и проектировании объекта строительства	259
6.3. Краткие сведения о программной реализации	267
Заключение	282
Литература	285

---

## Термины и определения

**АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ** — ситуация, которая приводит к полному или частичному отказу конструктивного элемента или системы в целом.

**АВАРИЯ** – предельное состояние объекта, соответствующее полному разрушению, вызванному техногенными или природными причинами. Достижение таких состояний, как правило, приводит к полной физической непригодности объекта, значительному материальному ущербу и даже к гибели людей;

**АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ** — модель здания или сооружения, созданная архитектором в компьютерной программе.

**АНАЛИЗ РИСКА** или **РИСК-АНАЛИЗ** – это систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ** — геометрически идеализированная модель конструкции, в которой конструктивные элементы заменяются их идеализированными представлениями. Так, колонна, балка заменяется отрезком, стена, перекрытие заменяется набором плоских многоугольников.

**БЕЗОПАСНОСТЬ** – свойство объекта в период эксплуатации не создавать угрозы для жизни и здоровья людей, а также угрозы для окружающей среды. В ряде случаев трактуется, как отсутствие недопустимого риска аварии. Считается достаточной, если риск аварии находится в области приемлемых значений;

**БЕЗОТКАЗНОСТЬ** – свойство объекта сохранять работоспособное состояние на протяжении заданного срока эксплуатации;

**ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ** – пространственная (трехмерная) компьютерная геометрическая модель, которая включает в себя набор атрибутов (параметров), описывающих объект.

**ВИРТУАЛЬНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ** - инженерная компьютерная система здания, сооружения или строительного комплекса, предназначенная для решения задач создания, управления, мониторинга и анализа поведения в каждый момент жизненного цикла реального объекта от замысла до утилизации.

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ** – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния;

**ЖИВУЧЕСТЬ** – свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации;

**ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ЗДАНИЯ ИЛИ СООРУЖЕНИЯ** — период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование,

строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения (утилизация)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (ИТ, от англ. information technology, IT) —** В последнее время под информационными технологиями чаще всего понимают компьютерные технологии. В частности, ИТ имеют дело с использованием компьютеров и программного обеспечения для создания, хранения, обработки, ограничения к передаче и получению информации. Их внедрение должно начинаться с создания математического обеспечения, моделирования, формирования информационных хранилищ для промежуточных данных и решений.

**КАПИТЕЛЬ** — (от лат. caput — голова) венчающая часть колонны или пилястры. Верхняя часть капители выступает в плане за пределы колонны, обеспечивая переход к абаке или плите перекрытия. В современной архитектуре эта деталь сборного либо монолитного каркаса, опирающаяся на колонну, воспринимает нагрузку от вышележащего безбалочного перекрытия и снижает риск его разрушения в результате продавливания.

**КОЛОННА** — вертикальный элемент несущей конструкции, высота которого значительно превышает поперечное сечение. Колонна предназначена для восприятия преимущественно вертикальных нагрузок.

**КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ** — начальная стадия проектирования, на которой принимаются определяющие решения, и проводится исследование и согласование параметров созданных технических решений с возможной их организацией. «Концепт» (лат.) — содержание понятия, смысл. Таким образом, проектирование на концептуальном уровне — на уровне смысла или содержания понятия систем.

**МОДЕЛЬ** — некоторое приближение, описывающее с той или иной точностью одно или несколько реальных свойств заданного объекта или процесса.

**НАДЕЖНОСТЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ** — соответствие конструкции требованиям проекта в части обеспечения ее прочности, жесткости и устойчивости;

**НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА** — это его свойство сохранять эксплуатационные качества в течение заданного отрезка времени.

**РАСЧЕТНАЯ СХЕМА** - это упрощенная, идеализированная схема, которая отражает наиболее существенные особенности объекта, определяющие его поведение под нагрузкой.

**НАГРУЖЕНИЕ** — процесс приложения нагрузки.

**ОТКАЗ** – событие, соответствующее достижению предельного состояния;

**ОЦЕНКА РИСКА** – это анализ происхождения (возникновения) и масштабы риска в конкретной ситуации

**ПАРАДИГМА** (от греч. *παράδειγμα*, «пример, модель, образец») — совокупность фундаментальных научных установок, представлений и терминов, принимаемая и разделяемая научным сообществом и объединяющая большинство его членов. Обеспечивает преемственность развития науки и научного творчества.

**ПОДСИСТЕМА** — система, являющаяся частью другой системы и способная выполнять относительно независимые функции, имеющая подцели, направленные на достижение общей цели системы.

**ПОЛЗУЧЕСТЬ МАТЕРИАЛОВ** — изменение с течением времени деформации твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения. Ползучести в той или иной мере подвержены все твёрдые тела.

**ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ** – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима

**ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТЬ** — приспособление конструкции, когда после одного или нескольких циклов повторного нагружения пластические деформации исчезают и конструкция испытывает чисто упругое нагружение.

**ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ** — это обрушение конструкций здания (или его части высотой два и более этажей), потерявших опору в результате локального разрушения какого-либо этажа.

**ПРÓЧНОСТЬ** — свойство конструкции сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Свойство конструкции выполнять назначение, не разрушаясь в течение заданного времени.

**РАБОЧЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ** — этап, на котором прорабатываются все технические аспекты, и выполняется детальная проработка всех решений. Рабочая документация включает в себя свыше двадцати разделов, ее состав необходим и достаточен для выполнения строительно-монтажных работ на объекте строительства.

**РАСЧЕТНАЯ СХЕМА** — это упрощенная, идеализированная схема, которая отражает наиболее существенные особенности объекта, определяющие его поведение под нагрузкой.

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ** [реω —секу] — естественные процессы, которые сопровождаются деформацией первоначальной структуры, релаксацией напряжений, изучаемых реологией. Реологические процессы происходят в самых различных материалах

**РИСК** или **СТЕПЕНЬ РИСКА** предлагается рассматривать как сочетание частоты (вероятности) и последствий конкретного опасного события

**РИСК АВАРИИ** – число, показывающее превышение проектного риска аварии, вносимого по умолчанию в строительный объект при его проектировании. Риск аварии является мерой ожидаемого ущерба в случае аварии объекта

**СИСТЕМА** (от др.-греч. Σύστημα — целое, составленное из частей; соединение) — множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определённую целостность, единство. В любой системе можно выделить отдельные части, выполняющие некоторые функции и взаимодействующие друг с другом. В случае сложной структуры отдельных частей их можно рассматривать как подсистемы.

**СТАНДАРТНЫЕ РИСКИ АВАРИИ** – значения риска, при достижении которого объект переходит в качественно новое состояние. Такие значения являются инвариантными, и из них формируются требования безопасности строительного объекта;

**ТЕХНОЛОГИЯ** — комплекс организационных и технических мер, операций и приемов, направленных на проектирование, изготовление, обслуживание, ремонт, эксплуатацию и/или утилизацию изделия с номинальным качеством и оптимальными затратами.

**ТРИАНГУЛЯЦИЯ** – разбиение модели на конечные элементы.

**УСТОЙЧИВОСТЬ** — способность системы сохранять текущее состояние при наличии внешних воздействий.

## Список сокращений

**BIM** – Building Information Model - Информационная модель строительного объекта;

**CALS** – Computer Aided Life-cycle System – Компьютерная система поддержки жизненного цикла

**АПО** – анализ последствий отказов

**АСУП** – автоматизированные системы управления производством

**АЖТ** – абсолютно жесткие тела

**ЖЦ** – жизненный цикл

**ЖБК** – железобетонные конструкции

**КЖ, КМ, КМД** – условное обозначение рабочих чертежей (конструкции железобетонные, конструкции металлические, конструкции металлические детализованные)

**МКЭ** – метод конечных элементов

**КЭ** – конечный элемент

**НДС** – напряженно-деформированное состояние

**ОС** – объект строительства

**ПК** – программный комплекс

**ПСА** – причинно-следственный анализ

**САПТП** – система автоматизированного проектирования технологических процессов

**САПР** – системы автоматизированного проектирования

**СУБД** – системы управления базами данных

**ТЛП** – технологическая линия проектирования

**ЦМО** – цифровая модель объекта

**ЭВМ** – электронно-вычислительная машина

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных направлений проектирования конструкций, удовлетворяющих современным требованиям повышения уровня надежности, безопасности, живучести при снижении материалоемкости, является компьютерное моделирование. Причем, важное значение принимает именно компьютерное моделирование процессов жизненного цикла, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния на всех этапах существования строительного объекта.

Наиболее ответственным и представительным классом строительных объектов являются многоэтажные и высотные жилые и общественные здания из монолитного железобетона, которые за последние годы в отечественной практике строительства получили широкое распространение.

Основной задачей представляемой книги является рассмотрение ряда инженерных и численных методов расчета и проектирования многоэтажных и высотных зданий на каждом этапе их жизненного цикла.

Значительное внимание в книге уделяется методам архитектурно-строительного проектирования с использованием BIM-технологии на основе отечественного программного комплекса САПФИР. Описаны концепции создания компьютерной модели объекта, отвечающей различным требованиям управления жизненным циклом строительного объекта. Описаны методы организации обмена данными между программными комплексами, обеспечивающие выполнение экспорта созданной компьютерной модели в расчетный программный комплекс ЛИРА-САПР. Рассмотрены методы преобразования архитектурной модели в расчетную схему.

В книге представлен анализ методов компьютерного моделирования для различных задач на всех этапах жизненного цикла, даны примеры технологии проектирования с учетом процесса возведения, реологических процессов. Даны примеры моделирования прогрессирующего обрушения, в том числе и на примерах реальных зданий. Рассматриваются примеры влияния вновь строящегося здания на напряженно-деформированное состояние близлежащих зданий. Определенное внимание уделяется

подходам к моделированию динамических воздействий, в том числе сейсмических для зданий повышенной этажности.

Опыт показывает, что необходимость полноценного численного анализа зданий и сооружений на каждом этапе жизненного цикла диктуется, прежде всего, усложнением конструктивных решений и условий эксплуатации, объективно присущей любому строительному объекту; уникальностью грунтовых и климатических условий, сложностью и продолжительностью возведения и эксплуатации, повышенной ролью «человеческого фактора» на всех этапах жизненного цикла, а также неполнотой и неопределенностью исходных данных (по геометрии, жесткости, предельным и начальным условиям, нагрузкам и воздействиям, грунтовым условиям).

Книга состоит из 6 глав и построена следующим образом. В первой главе рассматриваются современные методы и средства автоматизированного проектирования на всех этапах жизненного цикла. Приведена архитектура информационной модели управления жизненным циклом. Обосновываются методы компьютерного моделирования строительных объектов на различных этапах жизненного цикла в связи с изменяющимся напряженно-деформируемым состоянием конструкций. Роль компьютерных моделей наиболее велика на этапах проектирования и возведения строительного объекта, а также учета при проектировании износа несущих конструкций, аварийных, и природных воздействий на этапе эксплуатации. Поэтому основное внимание далее уделяется конструкторско-технологическим методам и средствам создания и использования адекватных компьютерных моделей, наиболее приближенных к реальному объекту при решении различных задач.

Вторая, третья и четвертая главы посвящены определенным этапам жизненного цикла – архитектурно-строительному проектированию, возведению, эксплуатации. В каждой главе приведены примеры компьютерного моделирования, демонстрирующие подходы приближения компьютерной модели к реальной работе конструкции. Приведен ряд численных экспериментов, подтверждающих правильность инженерных и математических подходов к моделированию. Пятая глава посвящена краткому обзору существующих методов и методик определения надежности и безопасности строительных объектов, включая вероятностные

---

методики и нормативные требования обеспечения надежности и конструктивной безопасности строительных объектов.

Шестая глава описывает некоторые подходы к созданию компьютерных моделей. Представлена информационная модель жизненного цикла объекта строительства. Описаны подходы к компьютерному моделированию на базовом этапе жизненного цикла – этапе проектирования. Описаны некоторые эффекты, возникающие при создании компьютерных моделей проектируемых зданий. Обосновывается необходимость учета совместной работы системы «наземная часть – фундамент – грунт». Описаны некоторые особенности программной реализации методов и алгоритмов численного моделирования процессов возведения, нагружения, приспособляемости и т.д.

В заключение хочется отметить, что, в целом, книга направлена на создание методологического подхода к компьютерному моделированию на примере многоэтажных и высотных зданий. Такой подход оправдан тенденцией обеспечения безопасности строительных объектов для людей и окружающей среды на протяжении всего жизненного цикла объектов строительства уже на этапе их проектирования. Обеспечение безаварийной эксплуатации строящихся и существующих зданий и сооружений предполагает умение прогнозировать их поведение при изменении напряженно-деформированного состояния на этапе возведения (запоминание конструкцией истории нагружения) и этапе эксплуатации (старение, частичная потеря несущей способности, аварийная ситуация).

Сложность моделирования процессов жизненного цикла строительных объектов для выполнения качественного расчёта и анализа с целью определения резервов несущей способности при наличии дефектов, или для определения участков конструкции, в которых возможно появление и развитие трещин, требует реализации в программном комплексе современных методов расчета и проектирования. Процесс моделирования здания или сооружения в современных программных комплексах, по сути, заменяет физический эксперимент численным, и даёт возможность специалисту получать наиболее достоверные результаты расчёта, существенно сокращая сроки и финансовые потери на производство работ. В представляемой книге описаны некоторые подходы к созданию моделей зданий с учетом процессов приспособляемости конструкций,

взаимодействия здания с грунтовым массивом. Представлены, реализованные в программном комплексе ЛИРА-САПР, методы, позволяющие проводить сложные нелинейные расчеты, учитывать возможности изменения свойств материалов (трещины, коррозия и т.д.), учитывать влияние времени и поэтапное изменение внешних нагрузок.

Книга содержит много определений, терминов, понятий, разъяснений, относящихся к архитектурно-строительному проектированию, автоматизированному проектированию и компьютерному моделированию.

Предлагаемая книга может быть полезна аспирантам, инженерам-проектировщикам, преподавателям и научным сотрудникам. Книга будет интересна всем тем, кто связан с реальным проектированием, компьютерными расчетами или ведет исследования в области поведения конструкций, изменения напряжено-деформированного состояния и информационных технологий проектирования и расчетов.

Автор выражает благодарность всему коллективу разработчиков программного комплекса ЛИРА-САПР, а именно доктору технических наук, профессору Городецкому Александру Сергеевичу, кандидатам технических наук Гензерскому Юрию Валериевичу, Максименко Валерию Петровичу, Городецкому Дмитрию Александровичу,

инженерам: Артамоновой А.Е., Журавлеву А.В., Палиенко О.И., Пикулю А.В., Ромашкиной М.А., Торбенко Е.И. и др.

# **Глава 1 . АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА**

## **1.1. Основные этапы жизненного цикла объекта строительства**

В современной международной, российской и украинской практике, в связи с внедрением стандартов качества ИСО 9000, введено понятие жизненного цикла изделия (ЖЦ), позволяющего оценить эффективность функционирования объекта на любом этапе его существования. Термин ЖЦ применим также и к объектам строительства. Жизненный цикл зданий – это время от момента обоснования необходимости их возведения до наступления экономической нецелесообразности дальнейшей эксплуатации. Жизненный цикл (ЖЦ) любого здания или сооружения (объекта строительства – ОС), начиная от его технико-экономического замысла и заканчивая ликвидацией, реализуется через организационно-технологические циклы – взаимосвязанные, непрерывные и повторяющиеся процессы (проектирование, монтаж и т.д.). Несущие системы объектов строительства являются сложными системами, главной особенностью которых является то, что на каждой стадии жизненного цикла они изменяют напряженно-деформированное состояние, как следствие, изменяется и техническое состояние объектов.

В настоящее время значительно снизились государственные инвестиции в массовое строительство и широко привлекаются средства из альтернативных источников (частные инвестиционные компании, и т.п.). Заказчик, инвестирующий проекты, определяет новые требования к капитальности, функциональности, эксплуатационной пригодности и долговечности зданий. В связи с этим резко изменились требования и к строительному производству, что в свою очередь, обусловило необходимость информационной поддержки объектов строительства на протяжении его жизненного цикла [35].

С момента технико-экономического обоснования до момента утилизации объекта жизненный цикл условно можно разделить на периоды:

- ✓ проектирование – этап виртуального создания объекта;
- ✓ возведение – этап создания объекта в натуре;
- ✓ эксплуатация – этап включающий возможность запроектных воздействий;
- ✓ эксплуатация с учетом реологических свойств материалов (инновации, утилизация).

Основополагающим периодом является период проектирования. Именно на данном периоде формируются конструктивные особенности, ответственные за конечные внутренние усилия, которые необходимо учитывать при решении ряда задач, возникающих при эксплуатации зданий. Техническая информация об объекте на каждой из стадий ЖЦ претерпевает значительные изменения, причины которых могут быть различны.

Концепция управления жизненным циклом базируется на представлении об объекте строительства (здании) как единственном информационном объекте вокруг которого происходят различные процессы – проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт и диагностика технического состояния, каждый из которых использует и добавляет в информационную модель ту или иную информацию об объекте [92, 93].

Высокие темпы глобальной информатизации современного производства, усложнение создаваемых человеком систем всех уровней, изменение приоритетов, условий, ограничений и усложнение объектов строительства в целом сделали малопригодными традиционные методы организационно – технологического проектирования инвестиционно-архитектурно-строительного комплекса, где изменения проявляются на всех уровнях:

- ✓ на уровне взаимосвязей подсистем объекта —> качественное усложнение стыковки функциональных подсистем объекта строительства, их интеллектуализация, многоотраслевая и наукоемкая интеграция;
- ✓ на уровне взаимосвязей объекта и инфраструктуры —> обострение противоречий между недвижимой формой существования объекта строительства и нарастающей динамикой его инфраструктуры;
- ✓ на уровне взаимосвязей территории застройки и экосистемы —> обострение противоречий между традиционным экстенсивным

принципом строительства и его фактическим результатом – исчерпанием биофизических возможностей природной среды.

Анализ проблематики строительной науки и направлений развития инноваций в области строительства и информационных технологий позволили выявить потребность и актуальность новых теоретических и методологических предпосылок (новой парадигмы) проектирования развития жизненного цикла строительных объектов и систем в условиях ускоряющихся изменений внешней среды.

В строительстве специфическими продолжительными являются циклы создания и эксплуатации объекта строительства:

- ✓ создание строительной продукции требует значительно большего времени по сравнению с другими видами производства. Длительные сроки реализации проекта вызывают необходимость специфических форм финансирования, более высокие риски инвестиций в строительство по сравнению с другими инвестиционными проектами;
- ✓ жизненный цикл подавляющего большинства зданий и сооружений исчисляется десятками и даже сотнями лет;
- ✓ объект строительства в течение всего ЖЦ занимает земельный участок;
- ✓ процессы любых преобразований здания длительны и трудоемки (реализация инвестиционных проектов реконструкции, модернизации, развития предприятий и других занимает от одного до нескольких лет).

Жизненный цикл объекта строительства начинается с инвестиционной идеи и состоит из последовательности этапов проектирования, строительства, эксплуатации, реконструкции и утилизации. Эти этапы могут перекрываться, в каждом из этапов участвует множество людей и организаций. На прединвестиционном и инвестиционно-строительном этапах жизненного цикла основным потребителем и владельцем объекта строительства является заказчик-застройщик. В этой роли может выступать также генеральный подрядчик, на балансе которого находится объект к этапу приемки-сдачи. На этих этапах формируются все основные разделы объекта строительства, все виды его обеспечений (техническое, программное, информационное, математическое, организационное и др.). Программное и информационное обеспечение

каждого этапа уже в настоящее время позволяет достаточно полно описать объект строительства в виде цифровой модели на всех этапах его жизненного цикла.

Таким образом, создается компьютерная (цифровая) модель объекта строительства, иными словами «Виртуальный строительный объект». «Виртуальным строительным объектом» называется инженерная компьютерная система здания, сооружения или строительного комплекса, предназначенная для решения задач создания, управления, мониторинга и анализа поведения в каждый момент жизненного цикла реального объекта от замысла до утилизации. Согласно этому определению «Виртуальный строительный объект» предназначен для сбора, хранения и использования информации об объекте строительства. Он радикально упрощает доступ к полной, достоверной и актуальной информации в каждый момент жизненного цикла объекта строительства. «Виртуальный строительный объект» позволяет:

- ✓ реализовать новую технологию интерактивного компьютерного проектирования и управления всеми процессами жизненного цикла объекта строительства в любой момент времени от замысла до утилизации;
- ✓ повысить качество проектирования объекта строительства и связанного с ним инвестиционного процесса;
- ✓ быстро и качественно принимать обоснованные плановые и чрезвычайные решения с использованием полной, актуальной и достоверной информации, накопленной по объекту строительства за время его существования;
- ✓ реализовать устойчивую интерактивную связь с инженерными системами объекта строительства и эффективно управлять ими на основе теории функциональных систем;
- ✓ реализовать дистанционное управление отдельными приборами, механизмами, инструментами, датчиками и другим оборудованием, находящимся в здании или сооружении;
- ✓ устраивать компьютерные презентации объекта строительства в целом и любых его систем с отображением изменений во времени, а также в условиях виртуальной реальности;

- ✓ проводить математические исследования моделей объекта строительства, разрабатывать и применять новые модели, методы и алгоритмы исследований.

Таким образом, выделяются следующие этапы жизненного цикла:

I – этап технико-экономического обоснования возведения здания;

II – проектирование и конструирование;

III – возведение с разработкой технологии, организации и технологических регламентов производства работ;

IV – пред-эксплуатационное освоение;

V – эксплуатация здания, позволяющая обеспечить окупаемость средств, вложенных в его создание и освоение;

VI – поддержание конструктивных элементов и инженерных систем здания в нормальном техническом состоянии путем проведения планово-предупредительных и капитальных ремонтов;

VII – период физического и морального износа, требующий проведения модернизации, реконструкции или сноса здания. Последнее состояние является периодом окончания жизненного цикла или началом нового.

VIII – период реконструкции, восстанавливающий физико-механические и эксплуатационные характеристики зданий, включающий: I, II – технико-экономическое обоснование и разработку технической документации.

На рис. 1.1 представлены обобщенно этапы жизненного цикла объектов строительства (здания).

# АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЗДАНИЙ

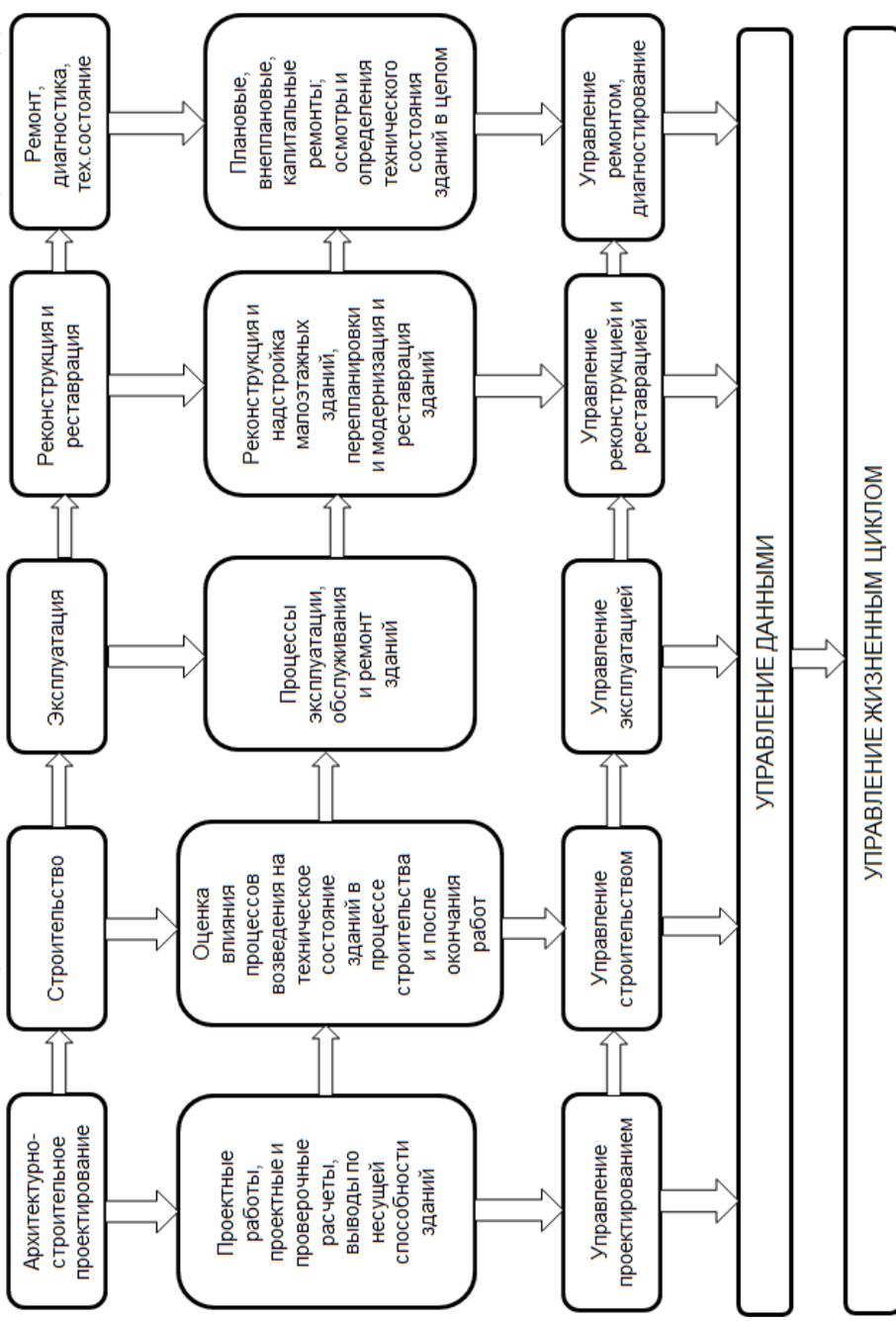


Рис. 1.1 Этапы жизненного цикла объектов строительства (здания)

## **1.2. Обоснование методов компьютерного моделирования строительных объектов на различных этапах жизненного цикла**

Под моделью понимается некоторое приближение, описывающее с той или иной точностью одно или несколько реальных свойств заданного объекта или процесса.

Под виртуальной моделью строительного объекта понимают его пространственную (трехмерную) компьютерную геометрическую модель, которая включает в себя набор атрибутов (параметров), описывающих содержательные характеристики всех ее элементов (материал, нагрузки, и т.д.). Компьютерные модели могут создаваться на различных этапах жизненного цикла строительного объекта, упрощенная схема которого включает в себя этапы, описанные выше.

Оставляя в стороне этап технико-экономического обоснования возведения здания, рассмотрим роль компьютерных моделей, начиная с этапа проектирования.

Этот этап обычно разделяют на концептуальное проектирование и рабочее (детальное) проектирование. При концептуальном проектировании формируются и уточняются технические требования к объекту строительства, осуществляются поиск и выбор принципиальных проектных решений, обеспечивающих требуемую функциональность. При рабочем проектировании выбранные концептуальные решения конкретизируются, определяются точные геометрические размеры всех несущих конструкций, узлы примыкания, используемые материалы, формируется конструкторская документация. Как правило, на этом этапе используются методы приближения реального здания к виртуальной модели. Причем, эта виртуальная модель может быть различной в зависимости от целей ее предназначения.

Мышление проектировщика, применяющего компьютерное трехмерное моделирование, отличается от мышления проектировщика, работающего только с двумерными чертежами.

Важно также, что при трехмерном компьютерном моделировании на этапе проектирования резко уменьшается число ошибок в проекте. Это происходит по следующим причинам:

- ✓ проектировщик может наглядно видеть результат своей работы уже в процессе проектирования;
- ✓ виды чертежа формируются на основании модели автоматически и поэтому исключаются ситуации, когда информация в одном виде не соответствует другому;
- ✓ при трехмерном проектировании имеется возможность проверять и корректировать модель и выявлять ошибки на уровне модели.

На этапе рабочего проектирования компьютерные модели служат основной формой представления информации об объекте, позволяют проводить компьютерные инженерные расчеты на прочность, устойчивость и др., анализировать напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов и всего строительного объекта в целом, получать чертежно-конструкторскую документацию. Соответственно, методы компьютерного моделирования на этом этапе базируются на методах строительной механики, механики деформированного твердого тела, строительной физики и др. Компьютерная модель объекта на этом этапе должна отражать адекватное напряженно-деформированное состояние объекта при заданных нагрузках и воздействиях. Как правило, на этом этапе применяется конечно-элементная модель строительного объекта.

**Этап возведения с разработкой технологии, организации и технологических регламентов производства работ.** До появления средств компьютерного моделирования исходной информацией для этапа возведения служила чертежно-конструкторская документация. В настоящее время компьютерные модели рассматриваются как составная часть конструкторской документации на строительный объект. При этом появляется возможность непосредственного моделирования процесса возведения объекта с учетом изменения конструктивной схемы объекта, с запоминанием конструкцией истории возведения, с проектированием сложной формообразующей оснастки. Моделирование процессов установки подмостей, строительного оборудования происходит с целью выявления возможных остаточных усилий в возводимых несущих конструкциях и их последующего учета, а также с целью экономии материала. При решении этих задач роль компьютерных моделей во многом сходна с их ролью на этапе проектирования объекта.

Еще один аспект использования компьютерных моделей – это создание трехмерной модели сложного объекта с целью виртуального

моделирования процесса строительства с учетом времени. Такое моделирование позволяет выявить и устранить возможные коллизии в системе поставки материалов и распределения рабочей силы и оборудования.

**Пред-эксплуатационное освоение и эксплуатация здания.** Здесь моделирование используется для анализа напряженно-деформированного состояния здания с учетом физического износа материалов несущих конструкций и учета их долговечности.

Для поддержания конструктивных элементов и инженерных систем здания в нормальном техническом состоянии путем проведения планово-предупредительных и капитальных ремонтов необходима система мониторинга несущих конструкций здания, базирующаяся на единой информационной модели.

В качестве результирующего документа о состоянии здания может выступать единая цифровая модель виртуального здания, поддерживающая систему электронного документооборота.

Когда здание или отдельные его элементы не обеспечивают эксплуатационную надежность и требуют восстановления, наступает период физического и морального износа, требующий проведения модернизации, реконструкции или сноса здания [139, 140].

Последний период характеризуется превышением затрат на поддержание равновесного состояния системы над прибылью от эксплуатации. Этот период свидетельствует о необходимости сноса здания или выполнения реконструктивных работ, восстанавливающих или переводящих его в качественно новое состояние.

В подавляющем большинстве строительных проектов точные сроки прекращения ЖЦ ОС в проектных материалах указать нельзя. Поскольку обычно затраты и экономические эффекты проекта учитываются в расчетах эффективности, если они имеют стоимостное выражение. Отдаленные во времени и неопределенные социальные, экологические и иные последствия и затраты, связанные с ликвидацией и утилизацией ОС, в технико-экономических обоснованиях не рассматриваются вообще.

При этом следует учитывать, что в ряде случаев негативные последствия могут принять необратимый характер. Следовательно, игнорировать ликвидационный этап жизненного цикла ОС нельзя.

Таким образом, компьютерное моделирование используются на всех этапах ЖЦ. Однако, роль компьютерных моделей наиболее велика на этапах проектирования и возведения строительного объекта, а также учета при проектировании износа несущих конструкций, аварийных, и природных воздействий на этапе эксплуатации. Поэтому основное внимание далее уделяется конструкторско-технологическим методам и средствам создания и использования адекватных компьютерных моделей, наиболее приближенных к реальному объекту при решении различных задач на всех этапах жизненного цикла.

### **1.3. Изменение напряженно-деформированного состояния конструкций объекта строительства на различных стадиях его жизненного цикла**

Прогресс в строительстве и во многих других отраслях промышленности в значительной мере определяется достигнутыми к настоящему времени результатами в области компьютерного моделирования тех или иных процессов и физических явлений, в частности, процессов деформирования и разрушения конструкций строительного объекта. В области строительства принятие многих проектных решений для какого-либо сооружения, как правило, регламентируется строительными нормами и правилами, которые зачастую дают лишь рекомендации по учету особенностей, отражающих действительное напряженно-деформированное состояние. Кроме того, данные регламентирующие документы не всегда используют последние достижения в области компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения. В частности, разделы строительных норм, относящиеся к методам прочностного анализа элементов строительных конструкций, ориентируются на более простые методы по сравнению с современными возможностями математического описания и компьютерного моделирования процессов деформирования сложных строительных объектов. В этом плане существует определенный разрыв между существующими нормами, регламентирующими традиционную деятельность проектировщиков, и возможностями уточненных расчетов элементов конструкций и сооружений, основанных на современных методах. Современные численные методы расчета используют

более точную постановку практических задач и их реализацию на компьютере.

С развитием крупных городов в строительстве выявилась тенденция к росту этажности возводимых объектов, обусловленная увеличением населения с одной стороны и ограниченностью городского пространства с другой. Рост этажности, в свою очередь, усложняет архитектурные и конструктивные формы зданий. В последнее время часто возникают вопросы, связанные с реконструкцией или утилизацией жилых и общественных зданий старой застройки. Это приводит к необходимости более точной оценки напряженно-деформированного состояния несущих систем. Так как, с одной стороны, необходимо обеспечить полную безопасность людей находящихся в здании, а с другой обеспечить минимальные затраты на его возведение, эксплуатацию и утилизацию или реконструкцию. Традиционно принятые методы расчёта не всегда позволяют полностью обеспечить данные требования. В связи с этим развиваются методы расчёта максимально приближенные к реальным условиям. Большое значение приобретает выбор математических моделей, адекватно описывающих пространственную работу несущих систем высотных зданий.

Стадии жизненного цикла (ЖЦ) несущей системы объекта строительства описываются соответствующими математическими моделями, построенными на основе виртуальной модели строительного объекта. Данная модель реализуется на стадии проектирования объекта. При этом определяются внутренние усилия, возникающие в конструктивных элементах, на основании полученных усилий производится конструирование несущих элементов объекта строительства.

Информация об объекте и напряженно-деформированное состояние несущей системы на каждой из стадий жизненного цикла претерпевает значительные изменения, причины которых могут быть различны. Эти изменения часто начинаются уже на стадии проектирования, когда при расчете по классической модели определяются внутренние усилия, возникающие в конструктивных элементах.

Следует отметить, что с каждым годом появляются все более совершенные методики расчета зданий, но все еще остается много проблемных, а подчас и спорных вопросов, среди них, такие как:

- ✓ учет последовательности возведения зданий и сооружений, особенно его влияние на формирование напряженно-деформированного состояния элементов здания с различными конструктивными схемами;
- ✓ влияние продольных деформаций колонн и диафрагм на общее напряженно-деформированное состояние каркаса;
- ✓ необходимость учета совместной работы рам и диафрагм не только на горизонтальные, но и на вертикальные нагрузки;
- ✓ устойчивость высотного здания при действии статических и динамических нагрузок, а также к прогрессирующему обрушению, и, как следствие, его живучесть. Одной из мер повышения живучести высотного здания, согласно материалам докладов на различных конференциях, является увеличение прочности конструкции, то же самое и предполагают нормы [103, 104, 105, 106, 114, 115, 129, 161, 162, 163, 164]. Хотя, как показывают многие наблюдения, проводимые исследователями, данная мера подчас не оправдана и приводит лишь к удорожанию здания. И здесь первостепенное значение приобретают новые методы и приемы создания конструктивных схем, которые обеспечивают возможность приспособляемости конструкций к различным ситуациям, неучтенным в проекте;
- ✓ эффективные методы расчета зданий при возможных аварийных ситуациях;
- ✓ отсутствуют универсальные алгоритмы и методы расчета высотных зданий на различные виды воздействий, учитывающие, в том числе последовательность возведения.

Стадией, формирующей напряженно-деформированное состояние, является **стадия возведения**, на которой изменяются конструктивная и расчетная схемы здания, при поэтапном приложении постоянных и временных (монтажных) нагрузок. Учет процесса возведения оказывает значительное влияние на конечное напряженно-деформированное состояние конструкций объекта строительства.

В процессе эксплуатации строительного объекта происходит старение несущих конструктивных элементов, зависящее не только от времени, но и от различного рода аварийных и нештатных ситуаций, техногенных воздействий. На стадии эксплуатации, самой продолжительной

для строительного объекта, к несущей системе прикладываются временные нагрузки, изменяются свойства материала несущих конструкций. Эти изменения зависят от многих факторов, при этом материалы и конструктивные элементы проявляют нелинейный характер работы.

В инженерной практике часто возникают вопросы, связанные с реконструкцией, демонтажем, утилизацией и капитальным ремонтом строительных объектов. Для оценки безопасности здания на стадии эксплуатации необходимо знать историю его нагружения, схемы приложения внешних нагрузок, историю формирования конечных внутренних усилий в конструктивных элементах, иметь возможность определить его напряженно-деформированное состояние в любой момент времени. Поэтому необходимо обобщить в единую информационную модель соответствующие математические модели, создать единую линию проектирования, включающую в себя информационную модель (BIM-модель), обеспечивающую поддержку изменяющейся конструктивной схемы объекта строительства. Вопрос о том, какие усилия фактически действуют в несущих конструкциях проектируемых объектов, остается открытым. Поэтому, зная действительное напряженно-деформированное состояние элементов несущих систем, можно найти обоснованное и корректное решение поставленных задач. Это становится возможным при проведении на базе современного программного комплекса ряда численных экспериментов, моделирующих те или иные ситуации.

Для учета описанных особенностей работы несущих систем в настоящее время разработан ряд программных комплексов, например программный комплекс ЛИРА-САПР, включающий систему МОНТАЖ+, основывающийся на соответствующих математических моделях. Используя этот комплекс можно оценить напряженно-деформированное состояние несущей системы строительного объекта на любой стадии его ЖЦ.

Компьютерное моделирование различных процессов ЖЦ включает:

- ✓ моделирование процесса возведения, когда напряженно-деформированное состояние (НДС) определяется для всех последовательно изменяемых конструктивных схем, соответствующих этапам возведения и модель возведенной конструкции «хранит память» об истории возведения;
- ✓ моделирование процесса нагружения, когда, например, для железобетонных конструкций имеется возможность проследить

- начальные стадии линейно-упругой работы конструкции, стадии последовательного образования и развития трещин в бетоне и растянутой арматуре, стадии, непосредственно предшествующие разрушению, а также возможную полную или частичную разгрузку на любой из этих стадий и дальнейшее нагружение;
- ✓ моделирование реологических процессов изменения НДС конструкции при длительном нагружении, связанных с ползучестью и изменением свойств материалов во времени;
  - ✓ моделирование динамических процессов, в том числе и для нелинейных систем, когда моделирование во времени динамического воздействия (на основе метода прямого интегрирования) дает возможность проследить включение и выключение односторонних связей, открытие и закрытие трещин, и многие другие эффекты;
  - ✓ моделирование процессов «приспособляемости» конструкции при «форс-мажорных» аварийных ситуациях, когда при внезапном выходе из строя одного или нескольких элементов конструкция старается приспособиться к новой ситуации, изменив (иногда за счет потери эксплуатационных качеств) свою первоначальную конструктивную схему, но, не допустив обрушения всего сооружения.

#### **1.4. Методы анализа внешней среды, как фактора влияния на жизненный цикл здания**

Традиционно, воздействия, неблагоприятные для строительства и функционирования строительных объектов, подразделяют в зависимости от источника происхождения на природные и техногенные. До последнего времени наиболее опасными с точки зрения влияния на устойчивость эксплуатации строительных объектов считались природные факторы. Техногенные факторы в большей степени поддаются контролю. Являясь следствием производственной деятельности человека, они не обязательно связаны с какими-либо нарушениями технологии производственной деятельности или конструктивными недостатками сооружений. При современных масштабах строительства и экологическом несовершенстве

технологий, техногенные процессы все чаще становятся неизбежным следствием хозяйственной деятельности.

Однако, как показывает практика, при сложном и масштабном строительстве негативные процессы и аварии часто бывают следствием сочетания нескольких причин, как природного, так и техногенного характера. Возрастающая взаимосвязь различных природных и технических систем в большинстве случаев является причиной новых процессов и явлений сложного природно-техногенного происхождения, которые, сменяя друг друга в пространстве и во времени, взаимодействуя друг с другом, могут привести строительную систему к неравновесному состоянию и к аварийной ситуации. Для последующей разработки методов выявления подобных воздействий, учета, оценки и предупреждения их в организационно-технологических решениях, факторы, воздействующие на объект необходимо делить на три группы в зависимости от источника воздействия:

- ✓ природные факторы – воздействия на строительный объект, происходящие без вмешательства человека;
- ✓ техногенные факторы – воздействия на строительный объект последствий и результатов хозяйственной деятельности человека;
- ✓ природно-техногенные факторы – воздействия на строительный объект разнообразных природных процессов (геологических, гидрологических, метеорологических, сейсмических, химических и др.), обусловленных деятельностью человека. К этой группе относятся техногенные процессы, имеющие природные аналоги, а также процессы, в которых сложно разграничить природные и техногенные источники (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Факторы воздействия на объект строительства

Как уже говорилось, наиболее опасными с точки зрения влияния на устойчивость эксплуатации объекта строительства, являются природные факторы. Выделяют несколько их категорий по степени их опасности для населения, хозяйства и масштабам причиняемого ущерба. В соответствующей литературе [2, 51, 52] имеются классификации уровней опасности. Одна из классификаций включает в себя семь уровней опасности: катастрофическую, чрезвычайно опасную, опасную, умеренно опасную, малоопасную и незначительно опасную.

Катастрофическая категория опасности характеризует проявления стихийных процессов, вызывающих массовые жертвы среди населения и приносящих огромный ущерб экономике и окружающей среде. К этой группе процессов относят вулканизм, землетрясения, ураганы, цунами.

К чрезвычайно опасной категории относят разрушительные природные явления, которые способны вызвать гибель людей, разрушение строительных объектов и наносят значительный ущерб экономике. К этой группе относят природные оползни, обвалы, лавины, сели, наводнения.

Опасную категорию составляют природные процессы, как правило, не сопровождающиеся в своем развитии массовыми человеческими жертвами, но влияющие на условия жизни людей и ограничения эксплуатации строительных объектов, приводящие к нарушению жизнеобеспечения и вызывающие серьезные последствия, влияющие на устойчивость объектов строительства и инженерных сооружений, способные быть причиной их разрушений и деформаций. К этой категории относят атмосферные явления (снежные заносы, снегопады и грозы); комплексные процессы опустынивания; дефляцию, природные колебания уровня водоемов; геологические и мерзлотные процессы.

К малоопасной категории могут быть отнесены природные процессы, имеющие локальный характер проявления, учет которых в проекте, в том числе и прогнозирование, способны предупредить экономический ущерб и обеспечить устойчивое функционирование объекта. К этой группе процессов, можно отнести эрозию почв, заболачивание и ряд других.

Другая классификация [2] выделяет четыре уровня опасности - катастрофическую, разрушительную, экономически опасную и категорию локальных стихийных проявлений, вызывающих социально-экономический ущерб.

Природные процессы также подразделяются на четыре категории: чрезвычайно опасные, весьма опасные, опасные и умеренно опасные.

Техногенные факторы воздействуют на объект как результат хозяйственной деятельности человека, как следствие строительства и эксплуатации производственных сооружений, технологических комплексов (тоннелей, выемок, траншей, насыпей, дамб, плотин и др.). Под техногенными факторами и процессами понимают в основном те процессы, которые не имеют природных аналогов. Например, осуществляя строительную деятельность, человек создает отрицательные (карьеры, котлованы, выемки, шахты, траншеи, штольни и др.) и положительные (насыпи, отвалы, терриконы и пр.) формы техногенного рельефа. При их эксплуатации могут развиваться процессы (пывунные явления и водопритоки в шахтах, осыпания бортов карьеров, просадки земляного полотна железных дорог и т.д.), что может привести к авариям (обрушению сводов и затоплению шахт, обрушению бортов карьеров, крушению поездов, пожарам, взрывам, выбросам и т.п.).

Техногенные воздействия, являясь следствием производственной деятельности человека, не обязательно связаны с какими-либо нарушениями технологии производственной деятельности или конструктивными недостатками сооружений. В исследованиях [2, 51, 52] определение понятия «техногенный фактор» отличаются от понятия «техногенная авария». При современных масштабах строительства и экологическом несовершенстве технологий, техногенные процессы чаще всего являются неизбежным следствием хозяйственной деятельности.

В группу природно-техногенных факторов, могут быть выделены воздействия на строительный объект, определяемые сложным и мало контролируемым взаимодействием антропогенной деятельности и экосистем. Возрастающая взаимосвязь различных природных и технических систем в большинстве случаев является причиной новых процессов и явлений сложного природно-техногенного происхождения, которые, взаимодействуя друг с другом, могут привести строительную систему к неравновесному состоянию и к аварийной ситуации. Например, оползни, возникающие в результате подрезки в основании склона при сооружении котлована, могут рассматриваться как природно-техногенный процесс, поскольку они развиваются и без участия человека. Понятие природно-техногенных факторов пока не является общепринятым.

Природно-техногенные процессы, развивающиеся в результате взаимодействия компонентов природной среды и производственной деятельности человека, могут быть исследованы двумя путями: математическим моделированием экосистемы или анализом фактических рядов данных наблюдений. Воздействия природно-техногенных факторов на строительный объект носят вероятностный и труднопредсказуемый характер, что делает предпочтительным анализ данных наблюдения и требует разработки специальных методов и технологий их наблюдения, изучения и учета в проектировании. Проследить полную последовательность взаимодействия природно-техногенных компонентов возможно путем построения цепочек причинно-следственных связей и выявления направленности процессов. Только на этой основе может базироваться обоснованный прогноз поведения объекта строительства в различных режимах функционирования, в том числе и предупреждение аварий.

Если рассматривать все эти факторы с точки зрения жизненного цикла объекта строительства, то можно сказать, что они влияют на объект в основном на этапе эксплуатации. Но очень важно учитывать возможность их влияния при проектировании, а в сейсмически неблагоприятных районах и при возведении.

### **1.5. Методы анализа причин возникновения аварийных ситуаций и оценки безопасности строительных конструкций**

Методологическое обеспечение анализа риска – это совокупность методов, методик и программных средств, позволяющих всесторонне выявить опасности и оценить риск чрезвычайной ситуации. При решении комплексных вопросов безопасности в развитых странах широко применяется методология риска, основу которой составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий. Используя количественные показатели риска, в принципе можно «измерять» потенциальную опасность и даже сравнивать опасности различной природы. При этом в качестве показателей опасности обычно понимают риск гибели людей (или, в общем случае, риск причинения определенного ущерба).

Риск или степень риска предлагается рассматривать как сочетание частоты (вероятности) и последствий конкретного опасного события.

Математическое выражение риска  $P$  – это соотношение числа неблагоприятных проявлений опасности  $n$  к их возможному числу  $N$  за определённый период времени, т.е.  $P = n/N$ . Помимо этого используется понятие «степень риска»  $R$ , т.е. вероятность наступления нежелательного события с учётом размера возможного ущерба от события. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \sum_{i=1}^n p_i m_i,$$

где  $p_i$  – вероятность наступления события, связанного с ущербом;  $m_i$  – случайная величина ущерба, причинённого экономике, здоровью и т.п.

Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия опасного события. А анализ риска, в свою очередь, заключается в выявлении (идентификации) опасностей и оценке риска, когда под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда или ситуация с возможностью нанесения ущерба, а под идентификацией опасности – процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение ее характеристик. Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск фактически есть мера опасности.



Рис.1.3. Схема анализа рисков

Оценка риска – это анализ происхождения (возникновения) и масштабы риска в конкретной ситуации. Сегодня оценка риска является единственным аналитическим инструментом, позволяющим определить факторы риска для здоровья человека, их соотношение и на этой базе очертить приоритеты деятельности по минимизации риска.

Анализ риска или риск-анализ – это систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды (см. рис. 1.3).

Оценка риска включает в себя анализ частоты, анализ последствий и их сочетание.

Для анализа частоты обычно используются:

- ✓ исторические данные, соответствующие типу местности, геологическим, климатическим условиям, где планируется строительство;
- ✓ статистические данные по аварийности и надежности применяемых конструктивных решений;
- ✓ логические методы анализа «деревьев событий» или «деревьев отказов» (эти методы обычно рассматриваются как единственно приемлемые для оценки риска);
- ✓ экспертная оценка с учетом мнения специалистов в данной области.

Анализ последствий включает оценку воздействий на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий моделируются аварийные процессы, с учетом классификации причин и сущности поражающих факторов.

Существуют следующие методы анализа риска:

Феноменологический метод базируется на определении возможности протекания аварийных процессов, исходя из результатов анализа необходимых и достаточных условий, связанных с реализацией тех или иных законов природы. Феноменологический метод базируется на базе фундаментальных закономерностей, заложенных в физике, механике разрушения, но малопригоден для анализа разветвлённых аварийных процессов, развитие которых зависит от надежности конструкций объекта строительства.

Детерминистский метод – предусматривает анализ последовательности этапов развития аварий, начиная от исходного события

через последовательность предполагаемых стадий отказов, деформаций и разрушения компонентов. Ход аварийного процесса изучается и предсказывается с помощью математического моделирования, построения имитационных моделей и проведения сложных расчетов.

Вероятностный метод – предполагает как оценку вероятности возникновения аварии так и расчет относительных вероятностей того или иного пути развития процессов.

На основе вероятностного метода могут быть построены различные методики оценки природно-техногенного риска [177], которые делятся на:

- ✓ статические, при наличии статистических данных;
- ✓ теоретико-вероятностные, используемые для оценки рисков от редких событий, когда статистика практически отсутствует;
- ✓ эвристические, основанные на использовании субъективных вероятностей, получаемых с помощью экспертного оценивания.

На этапе оценки риска анализируется возможная неопределенность результатов, обусловленная неточностью информации по надежности несущих конструкций, ошибкам проектирования, а также принятых допущений применяемых при построении и расчете моделей строительных объектов.

Анализ опасностей описывает опасности качественно и количественно и заканчивается планированием предупредительных мероприятий. Он базируется на знании алгебры логики и событий, теории вероятностей, статистическом анализе, требует инженерных знаний и системного подхода.

Качественные методы анализа опасностей позволяют определить источники опасностей, потенциальные аварии и несчастные случаи, последовательности развития событий, методы предотвращения возникновения аварийных ситуаций, методы предотвращения перерастания аварийных ситуаций в аварию и методы смягчения последствий.

Выбор качественного метода анализа опасностей зависит от назначения объекта и его сложности. Качественные методы анализа опасностей включают:

- ✓ предварительный анализ опасностей;
- ✓ анализ последствий отказов;
- ✓ анализ опасностей с помощью «дерева причин»;
- ✓ анализ опасностей с помощью «дерева последствий»;

- ✓ анализ опасностей методом потенциальных отклонений;
- ✓ анализ проектных ошибок;
- ✓ причинно-следственный анализ.

**Предварительный анализ опасностей** осуществляется в следующем порядке:

- ✓ изучаются технические характеристики строительного объекта, материалы и устанавливают их прочностные свойства;
- ✓ анализируется нормативно-техническая документация, действие которой распространяется на данный строительный объект;
- ✓ составляется перечень возможных опасностей, в котором указываются возможные разрушающие факторы, потенциальные аварийные ситуации, выявленные недостатки проектирования.

В настоящее время в литературе нет четкого понятия отказа строительной конструкции. Часть исследователей под отказом понимают достижение конструкцией предельного состояния по ряду критериев – безопасности, эксплуатационной пригодности (деформациям, образованию и раскрытию трещин). Другая часть исследователей во главу угла ставят безопасность.

При исследовании процессов жизненного цикла конструкции под отказом можно понимать ситуацию, при которой становится невозможной эксплуатация конструкции из-за опасности ее разрушения. Воздействия различных факторов на строительный объект может привести к отказу каких-либо элементов конструкции. Классификация возмущающих воздействий на строительные объекты с точки зрения теории надежности, стойкости и безопасности приведена на рис. 1.4.

**Анализ последствий отказов (АПО)** – качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе и имеющий характер прогноза. АПО является анализом индуктивного типа, с помощью которого систематически, на основе последовательного рассмотрения одного элемента за другим, анализируются все возможные виды отказов или аварийные ситуации и выявляются их результирующие воздействия на объект строительства (рис. 1.5).



Рис. 1.4. Классификация внешних возмущающих воздействий на объекты

Отдельные аварийные ситуации и виды отказов конструктивных элементов позволяют, определить их влияние на другие элементы и объект строительства в целом. АПО осуществляется в следующем порядке:

- ✓ для несущих конструктивных элементов выявляют возможные отказы и причины, которые могут их вызвать;
- ✓ изучаются потенциальные аварии, которые могут вызвать отказы на исследуемом объекте;
- ✓ отказы ранжируют по опасностям и разрабатывают предупредительные меры (рис. 1.6).

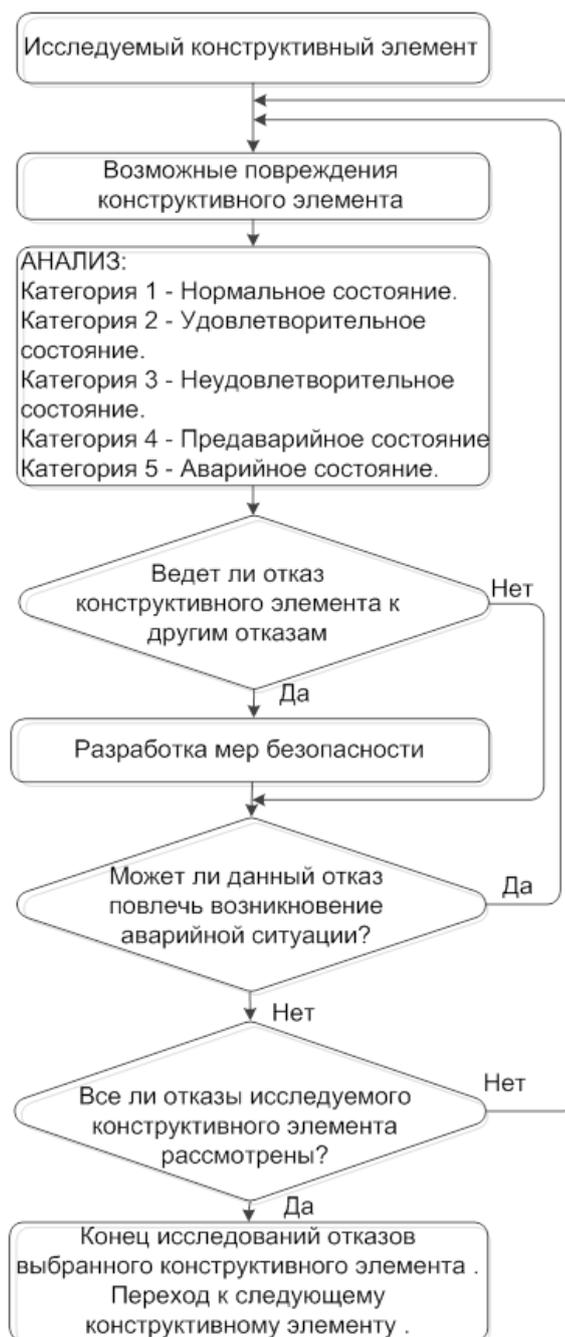


Рис.1.5. Алгоритм исследования отказов для конструктивного элемента

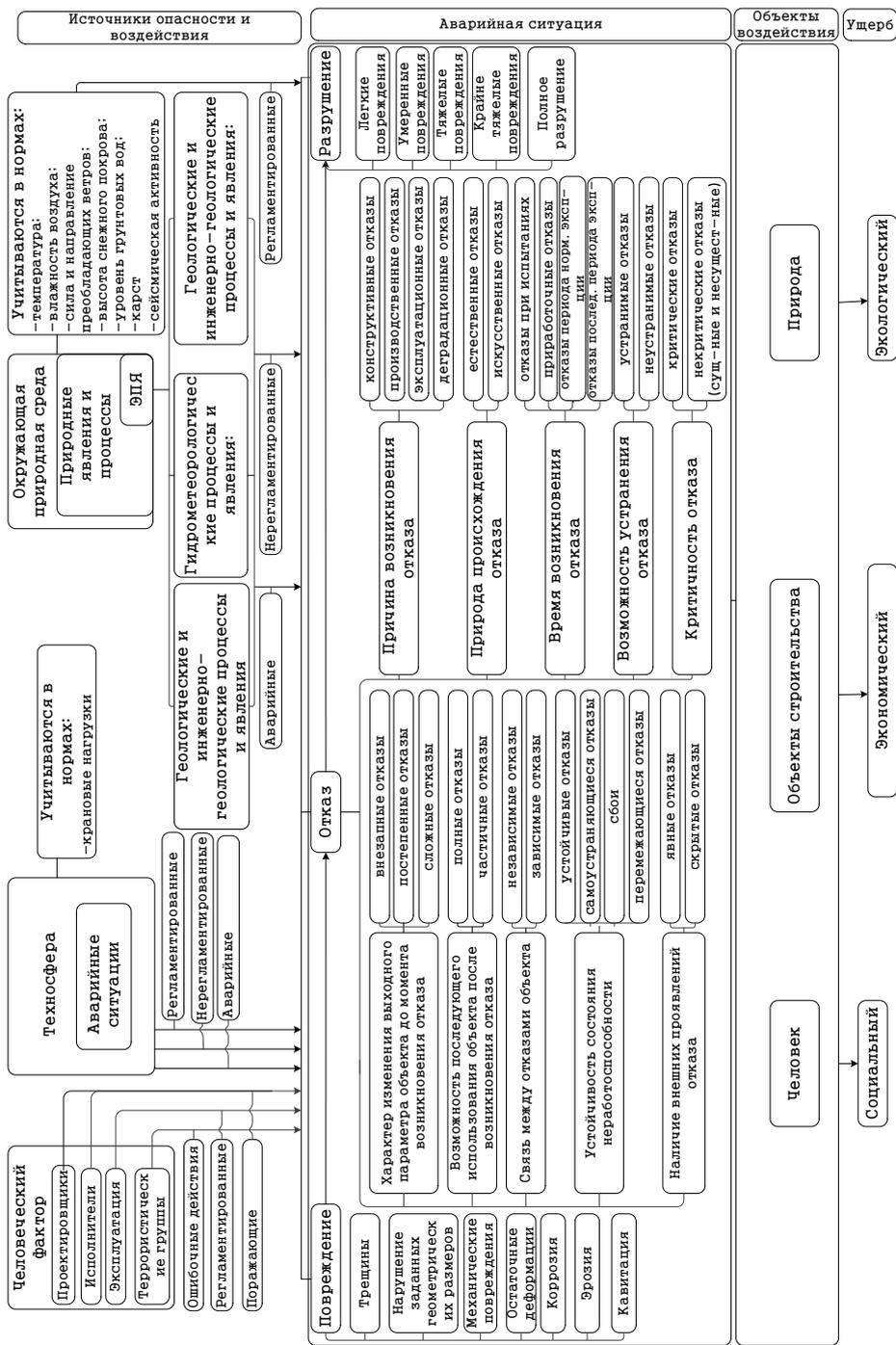


Рис. 1.6 Классификация возможных отказов конструктивных элементов и конструктивных систем

Причины возникновения аварийных ситуаций укрупненно делятся на следующие группы:

- ✓ недостатки проектирования;
- ✓ дефекты конструкции или нарушение технологии изготовления;
- ✓ дефект монтажа;
- ✓ недостатки технической эксплуатации;
- ✓ старение и износ конструктивных материалов;
- ✓ дефекты ремонта (на этапе эксплуатации);
- ✓ посторонние воздействия (форс-мажоры);
- ✓ не выявленные причины.

Основными фазами развития аварии для функционирующих строительных объектов схематически показаны на рис. 1.7:

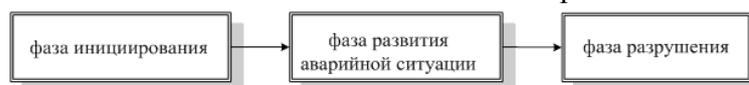


Рис. 1.7 Основные фазы развития аварии

В ряде случаев отказы отдельных конструктивных элементов являются инициирующими событиями (фазами) для развития аварийной ситуации всего строительного объекта, приводящей к его разрушению

Проведение **анализа опасностей с помощью «дерева причин отказов»** возможно только после детального изучения функций всех компонентов рассматриваемого строительного объекта. Отказы строительных конструкций можно классифицировать как постепенные и внезапные. Постепенные связаны с процессом старения материалов, вызывающим физический износ конструкций и утраты ими необходимых эксплуатационных качеств. Внезапные связаны с человеческим фактором, грубыми ошибками или нарушениями, допущенными на каком либо этапе жизненного цикла объекта строительства. Внезапные отказы являются наиболее опасными.

Дерево отражает статический характер событий. Построением нескольких деревьев можно отразить их динамику, т. е. развитие событий во времени. Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между техническими системами обеспечения безопасности, используется дерево событий.

**Анализ опасностей с помощью «дерева последствий»** потенциальной аварии производится путем оценки критических событий,

приводящих к перерастанию аварийной ситуации в аварию.

При анализе «причин – последствий» используются комбинированные методы «дерева отказов» (выявить причины) и «дерева событий» (показать последствия).

**Анализ опасностей методом потенциальных отклонений (АОМПО)** включает процедуру мониторинга и для этого устанавливают датчики на исследуемых конструктивных элементах, систематично изучая потенциальные причины возникновения повреждения и те последствия, к которым они могут привести на практике.

**Анализ проектных ошибок** является одним из важнейших элементов методологии оценки опасностей с учетом человеческого фактора, позволяющий охарактеризовать как ошибки, иницирующие или усугубляющие аварийную ситуацию, так и возможность совершить корректирующие действия по устранению ошибок.

Современному проектировщику методика проектирования зачастую кажется простой и ясной, и возможность допущения ошибки минимальна. Однако, при разработке проектов инженеру приходится сталкиваться с большим количеством неопределенностей, которые характеризуются либо неполнотой или неточностью данных, либо отклонения исходных данных в процессе жизненного цикла объекта строительства.

Причины возникновения ошибок проектирования можно классифицировать следующим образом:

- ✓ бездумное копирование проектных решений, базирующееся на проектах-аналогах, без учета специфики проектируемого объекта;
- ✓ применение современных программных комплексов без оценки правильности создания расчетной схемы и правильности полученных результатов;
- ✓ формальный подход к созданию расчетной схемы проектируемого объекта, без оценки ряда особенностей и реальной работы проектируемых конструкций;
- ✓ несоответствие принятой методики расчета действительной работе конструкции;
- ✓ отсутствие информации о причинах и последствиях возникновения аварий в различных подобных сооружениях;

Для предотвращения или минимизации возникновения подобных ошибок рекомендуется принимать следующие меры:

- ✓ выполнение предварительного экспертного или вероятностного анализа на возможность возникновения отказов в конструктивном элементе (конструктивной системе), приводящего к аварийной ситуации и, возможно, к аварии;
- ✓ учет вероятности отказа в процессе принятия решения при проектировании (регулируется введением коэффициента по надежности);
- ✓ введение мер конструктивной безопасности при проектировании.

При составлении расчетной схемы следует учитывать следующие особенности:

- ✓ учет реальной работы материала;
- ✓ учет условности расчетных характеристик грунтов;
- ✓ учет возможностей отклонения нагрузок от их расчетных значений;
- ✓ учет изменения расчетной схемы в процессе монтажа.

**Причинно-следственный анализ (ПСА)** выявляет причины возникновения аварийной ситуации (аварии) и является составной частью общего анализа опасностей.

Для проведения обоснованного прогноза (моделирования) поведения объекта строительства на этапе эксплуатации, в том числе и предупреждения аварий, необходимо построить ряд точек причинно-следственных связей, ведущих к процессу аварийности (обрушения, трещинообразования и т.д.). И как следствие, избежание аварийности (уменьшение вероятности) уже при проектировании.

ПСА включает следующие этапы:

- ✓ сбор информации о точном и объективном описании аварии;
- ✓ составление перечня реальных событий, предшествовавших аварии;
- ✓ построение ориентированного графа – «дерева причин», начиная с последней стадии развития событий, т.е. с самой аварии;
- ✓ выявляют логические связи «дерева причин»;
- ✓ формулирование предупредительных мер с целью исключения аварии данного типа или для избегания аналогичных аварий.

На основе анализа всех факторов, приводящих к отказам конструктивных элементов и конструктивных систем, и в ходе проведения

причинно-следственного анализа возникновения аварийной ситуации установлено следующее. Если не принимать во внимание и исключить конструктивные дефекты, отказы конструктивных элементов и конструктивных систем можно разделить на две группы:

- ✓ параметрические отказы, возникающие в нормальных условиях эксплуатации в результате естественных процессов старения, износа, коррозирования и т. д.;
- ✓ внезапные катастрофические отказы, возникающие в результате внешних воздействий, превышающих пределы устойчивости строительных объектов, например сейсмическое воздействие, взрыв, удар и прочие форс-мажорные факторы.

Отказы первой группы, как правило, выявляются при обследованиях строительных объектов и устраняются. Для их прогнозирования используется параметрическая модель отказов «параметр – граница допуска». Их распределения во времени  $F(t) = P(T < t)$ , где  $T$  – время (период) работы конструкции до возникновения отказа, наиболее хорошо описываются вероятностно-физическими законами распределения.

Отказы второй группы возникают непосредственно в процессе развития аварии.

Для прогнозирования отказов второй группы используются модели типа «нагрузка – несущая способность», а их распределение во времени практически повторяет распределение внешних инициирующих событий. В общем случае необходимо рассматривать отказы первой и второй группы совместно в рамках одной модели, однако в предлагаемой монографии компьютерные модели для каждой из групп отказов рассмотрены отдельно (см. глава 4).

Таким образом, после проведения классификации методов анализа опасностей необходимо разработать предупредительные мероприятия, препятствующие возникновению аварийных ситуаций. Эти мероприятия направлены на снижение уровней негативных факторов, действующих фактически или тех, которые могли бы действовать потенциально (форс-мажор) на объект строительства.

Мероприятия по безопасности делятся на меры снижения риска возникновения негативных событий и меры по смягчению последствий произошедших негативных событий.

Безопасность объекта строительства рассматривается:

- ✓ как свойство объекта не приводить к авариям при внешних форс-мажорных воздействиях;
- ✓ как свойство объекта не причинять вреда жизни и здоровью людей в случае возникновения аварийных ситуаций.

На рис. 1.8 приведен алгоритм исследования отказов на примере высотного здания.

Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов позволяют, определить их воздействие на другие близлежащие элементы и систему в целом [69, 70, 71]. Причинно-следственный анализ отказов конструктивной системы высотного здания осуществляют в следующем порядке:

1) При анализе конструктивной системы прежде всего необходимо учитывать совокупность воздействий, приводящих к аварийной ситуации. По степени влияния воздействия классифицируются на регламентированные и нерегламентированные. К регламентированным воздействиям относятся параметрические отказы, возникающие в нормальных условиях эксплуатации в результате естественных процессов старения, износа, коррозирования и т. д. К нерегламентированным воздействиям относятся внезапные катастрофические отказы, возникающие в результате внешних воздействий, превышающих пределы устойчивости строительных объектов, например сейсмическое воздействие, взрыв, удар и прочие форс-мажорные факторы.

2) Конструктивная система (объект) состоит из конструктивных элементов. Несущий каркас объекта – это сложная конструкция, представляющая собой организованную совокупность групп унифицированных конструктивных элементов, таких как основание, фундамент, колонны, пилоны, стены, перекрытие и т.д. Каждый из этих элементов имеет свой критерий важности, свою категорию ответственности, согласно нормативным документам [42, 43, 44, 104, 105, 106].

Аварийная ситуация [4] приводит к полному или частичному отказу конструктивного элемента или системы в целом. Для оценки последствий возникновения аварийной ситуации (отказа) в конструктивном элементе необходимо учитывать критерий важности элемента в системе и учитывать его расположение. Например, отказ колонны первого этажа ведет к

перерастанию аварийной ситуации в аварию, а отказ колонны среднего этажа при правильном проектировании ведет к перераспределению усилий в конструктивной системе.

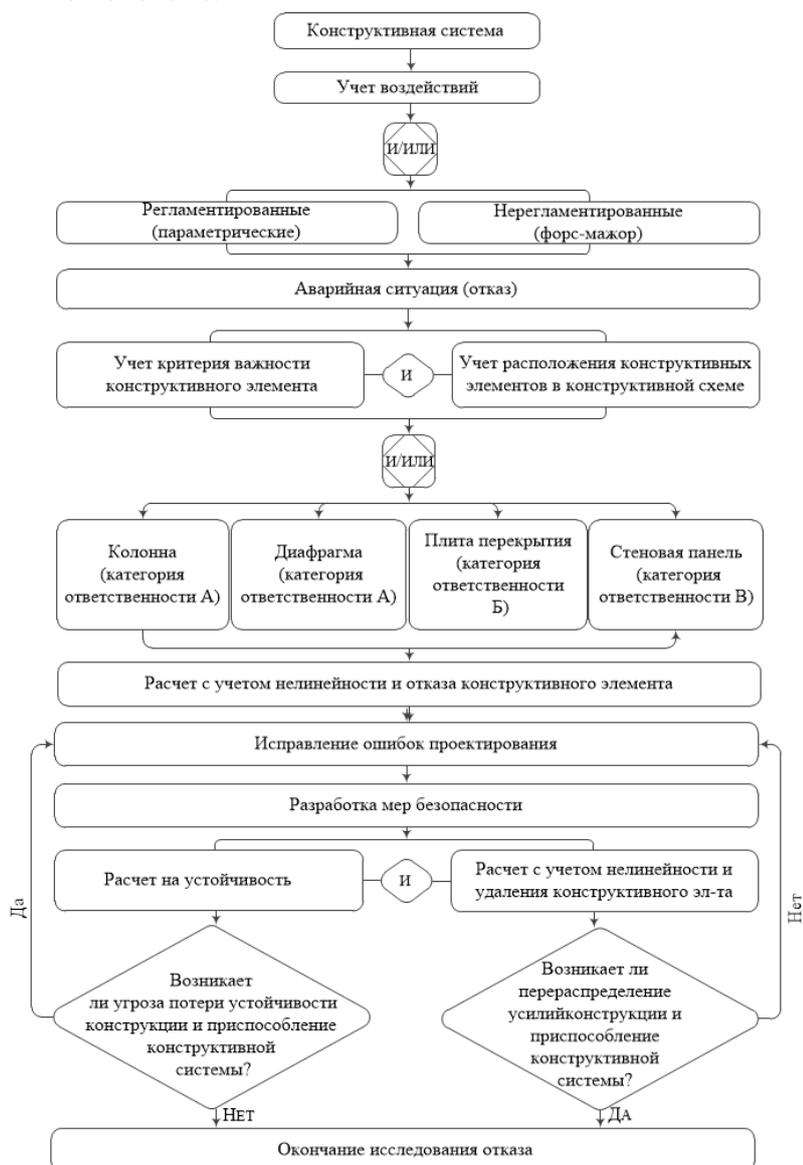


Рис. 1.8. Алгоритм причинно-следственного анализа отказов для конструктивной системы

3) Согласно нормативным документам [106] назначаются различные уровни надежности, конструктивным элементам или всему каркасу. При этом под стандартным уровнем надежности унифицированных групп

несущих конструкций следует понимать такой уровень надежности, при котором риск аварии становится стандартным: нормальным или предельно-допустимым. К нормальному уровню надежности относится уровень  $P_i$ , при котором обеспечивается нормальный (естественный)  $R_i$  риск аварии объекта, а к предельно-допустимому – уровень  $P_j$ , который соответствует предельно-допустимому значению  $R_j$  риска аварии.

Соответственно к нормальному риску аварии объекта приводят параметрические воздействия, а к предельно-допустимому приводят внезапные нерегламентированные воздействия [5, 7]. Поэтому при проектировании необходимо разрабатывать предупредительные меры для обеспечения безопасности объекта в течении заданного периода времени при возникновении аварийной ситуации.

4) В качестве предупредительных мер обеспечения безопасности объекта предлагается выполнять расчет на устойчивость и расчет с учетом нелинейности. Расчет на устойчивость выполняется для выявления устойчивости системы. Расчет с учетом нелинейности выполняется для выявления критической нагрузки в элементе, потенциально подвергающемуся аварийному воздействию. Если критическая нагрузка в элементе возникла, необходимо проанализировать работу конструктивной системы при учете исключения из работы этого элемента и оценить вероятность приспособляемости конструктивной системы к вновь возникшим условиям работы. По результатам этого расчета следует выявить перераспределение усилий, которое возникает после удаления элемента, если перераспределения не произошло, то может возникнуть аварийная ситуация, которая может привести к аварии большого участка либо всего объекта. Для предотвращения этой ситуации рекомендуется предпринять проектные меры по усовершенствованию конструктивной системы в целом, с учетом взаимовлияния конструктивных элементов.

В 5-ой главе будут рассмотрены некоторые методы обеспечения надежности и жизнестойкости объектов строительства.

## **Глава 2 . АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КАК БАЗОВЫЙ ЭТАП ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА**

### **2.1. Анализ процесса проектирования**

Архитектурно-строительное проектирование представляет собой сложный технологический процесс, требующий большого объема знаний, связанных со знанием традиций проектирования, анализов проектных решений, действующей государственной и региональной нормативной документации, методов расчета и многое другое.

Именно проектирование конструкций в процессе всего жизненного цикла строительного объекта занимает наиболее ответственное место, т.к. именно конструкции влияют на материалоемкость объекта, во многом определяют его жизненный цикл – включая стадии возведения и эксплуатацию сооружения [34].

На рис. 2.1 приведена обобщенная схема архитектурно-строительного проектирования. В самом процессе проектирования выделено 11 этапов, которые определены на основе анализа проектов промышленных и гражданских зданий [14, 15, 20].

Процесс проектирования начинается с этапа (П1) – получение и осмысливание задания на проектирование. Как правило, задание на проектирование разрабатывает технолог проекта (для объектов гражданских и жилых зданий – это архитектор) или главный инженер проекта. Проектное задание содержит общие сведения о проектируемом объекте и его функциональное назначение. Так, например, для каркасного жилого или гражданского здания – это планы этажей с указанием на них типов помещений, (которые определяют нагрузку на перекрытия), размещение лифтовых шахт и отверстий для коммуникаций, тип и размещение ограждающих конструкций (наружных стен и перегородок). Для промышленного здания – это шаг колонн, грузоподъемность кранов, размещение технологического оборудования, тип теплоизоляции – наличие фонарных ферм и т.п.

На основе этого задания конструктор формирует топологию конструктивной схемы (П2) – вариантное формирование топологии конструктивной схемы и набора данных для проектных решений. Для каркасного многоэтажного здания предварительно определяет место расположения колонн, ригелей, диафрагм, фундаментов и назначает их предварительные размеры. Конструктор принимает также решение о типе самих конструкций: сборный железобетон, и какая серия; монолитные конструкции, и какой тип перекрытий – безригельный или с балочным ростверком; металлические колонны и монолитные перекрытия – или другие варианты. Для промышленного здания конструктор определяет систему покрытия – наличие подстропильных ферм, вид связи по верхнему или нижнему поясу, места расположения вертикальных связей, тип подкрановых балок, тип колонн – (железобетонные или стальные, сквозного или сплошного сечения) и многое др.

Нельзя не отметить постоянно возникающие противоречия в работе архитектора, технолога и конструктора. Эти противоречия можно обосновать разными типами мышления этих специалистов. Архитектор всегда представляет объект строительства с эстетической стороны, оперируя не логическими категориями, а категориями формообразования и цвета. Инженеры -конструкторы и инженеры-технологи мыслят концептуально. Их задача обеспечить прочностные характеристики здания и соблюсти технологию его возведения.

Нередко между технологами и конструкторами также возникают определенные противоречия. Технолог и конструктор должны всегда работать в тандеме, так как именно конструктор несет ответственность за надежность строительного объекта, поэтому он при создании проекта должен учитывать технологические возможности его исполнения, а технолог должен максимально учесть все конструктивные требования и не нарушать технологию возведения.

Применение информационной технологии проектирования позволяет эти противоречия сгладить, так как концепция виртуального строительного объекта дает возможность устранить некоторые нестыковки между архитектором и конструктором, и корректная, адекватная компьютерная модель объекта строительства позволяет учесть технологические особенности возведения и избежать грубых нарушений на этом этапе.

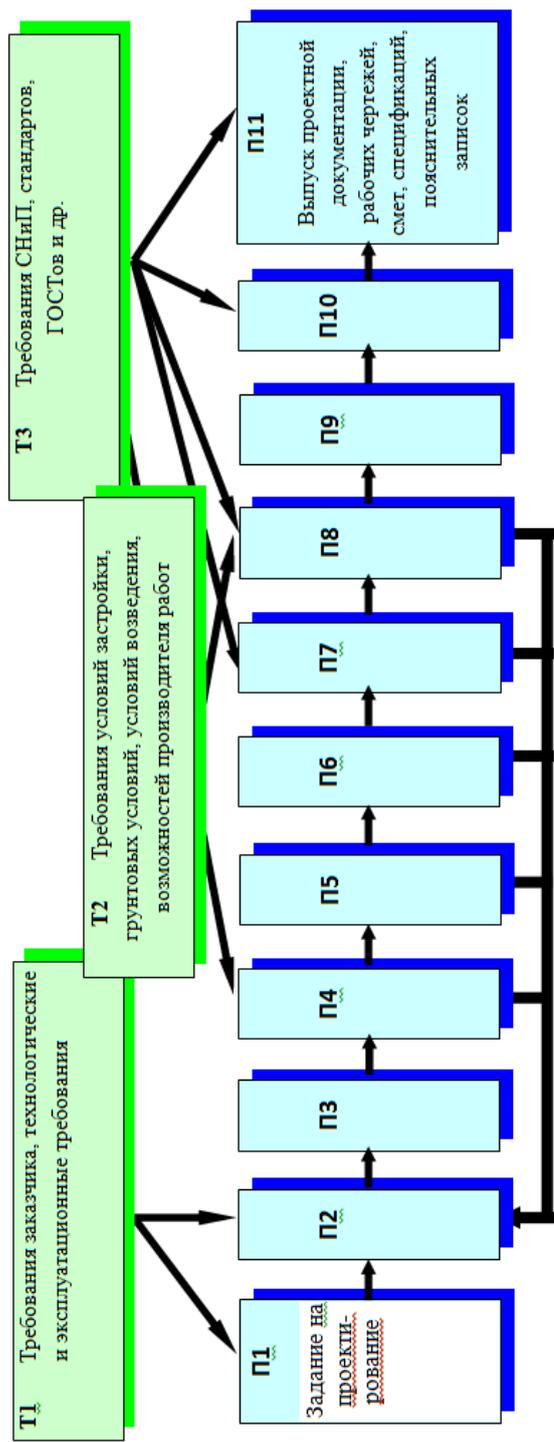


Рис. 2.1. Обобщенная схема процесса архитектурно-строительного проектирования

T1, T2 – наборы требований;

P1, P2, ..., P*i* – процессы проектирования

При этом он должен руководствоваться требованиями (Т1, Т2) и ему необходима определенная информация. Информацию по выбору целесообразных параметров проектных решений он приобретает на основе своего опыта, на основе изучения проектов-аналогов или на основе рекомендаций специальной справочной литературы. На основе этой информации конструктор предварительно определяет рациональные пролеты ригелей и плит, исходя из чего, производит расстановку колонн, предварительно определяет расстановку диафрагм, исходя из необходимой жесткости всего здания на горизонтальные нагрузки. При этом он должен руководствоваться ограничениями, содержащимися в специальных требованиях (Т1, Т2) – эти требования характерны для данного объекта. Исходя из грунтовых условий, он может назначить тип фундаментов – отдельно стоящие или ленточные, свайные фундаменты, фундаментные плиты; исходя из возможностей производителя, он может выбрать те или иные типы сечения колонн (исходя из типа опалубки), или назначить толщину вертикальных несущих стен (исходя из требований технологии бетонирования) и многое др.

Информацию по формированию набора проектных данных проектировщик приобретает на основе своего опыта, на основе знания всего процесса проектирования. На основе этой информации проектировщик формирует набор данных необходимый для дальнейшего процесса проектирования: расстановка и назначение сечений колонн, ригелей, диафрагм; назначение отверстий в диафрагмах и плитах; определение нагрузок, действующих на конструктивную схему; назначение материалов конструкций. В дальнейшем после этапа (П8) - анализ результатов расчета и синтез проектных решений, этот набор данных может быть откорректирован[154].

(П3) – состав работ по составлению расчетных схем, назначению типов сечений стержневых элементов и толщины плит, диафрагм; а также по назначению конструкций узлов, назначению нагрузок во многом зависит от инструментария, на основе которого будет выполняться собственно расчет. До появления современных программных комплексов в основном использовались очень упрощенные схемы, так как возможности человека по выполнению большого количества вычислений были очень ограничены. В настоящее время этот этап автоматизирован. Однако требует высокой квалификации проектировщика, так как возможность построить адекватные

расчетные модели требует обширных знаний по идеализации объекта проектирования. Адекватное отображение конструктивных свойств объекта требует определенного опыта, связанного с декомпозицией задач, при этом, как правило, для моделирования тех или иных конструктивных свойств могут быть использованы различные расчетные схемы. Например, для расчета плит перекрытий под вертикальную нагрузку на этаже достаточно рассматривать независимые расчетные схемы каждого отдельного перекрытия, в котором плита расчленяется на достаточно густую сетку конечных элементов и рассчитывается совместно с балочным ростверком, а колонны и диафрагмы являются жесткими опорами. В последнее время проектировщики отходят от этой концепции и рассчитывают перекрытия в общей конструктивной схеме совместно с грунтовым или свайным основанием. При расчете же на горизонтальные нагрузки плиты перекрытий могут рассматриваться как диски, моделирующие перераспределение горизонтальных нагрузок между диафрагмами и колоннами. При составлении расчетных схем для одноэтажных промышленных зданий, как правило, используются плоские поперечные разрезы; вертикальные продольные связи рассчитываются как отдельные системы, подкрановые балки рассчитываются как система неразрезных балок на жестких опорах.

Выполнение собственно статического и динамического расчета (П4) – расчет на статические воздействия (силовые, температурные, деформационные); (П5) – расчет на устойчивость и динамические воздействия (сеймика, ветер с учетом пульсации, вынужденные колебания и др.); (П6) – определение усилий в элементах, расчетных сочетаний усилий, расчетных сочетаний нагружений – до появления современных программных комплексов требовали от проектировщика обширных знаний методов строительной механики и математической физики, знаний о напряжениях и деформациях конструкций, знаний о законах состояния и теориях, и других проблемно-ориентированных знаний.

Сейчас же, когда для этой цели используются специализированные расчетные комплексы (ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР) [11,90,91,102], эти знания нужны проектировщику в основном для составления расчетных схем. А так как компьютерные модели позволяют моделировать свойства конструкций, учет которых ранее был невозможен – физическая и геометрическая нелинейность, учет многих форм колебаний, общая устойчивость – то иногда эти знания должны быть более глубокими. В этом

случае наличие экспертных систем с развитой базой знаний во многом улучшает качество проектных решений принимаемых на этих этапах (МОНОМАХ-САПР).

Этап (П7) связан с подбором сечений железобетонных, стальных и деревянных элементов по усилиям, полученным на этапах (П4, П5, П6). Как правило, для этого также используются специализированные программные средства, в которых реализованы государственные и региональные нормы, методы расчета элементов, информация о конструкциях и материалах, и требования (Т3). Ранее до появления современных программных комплексов этот процесс выполнялся «вручную», но затем уже на ранних этапах создания САПР был автоматизирован. На этапе (П8) проектировщик должен проанализировать полученные результаты, в ряде случаев уменьшить сечение элементов, если на этапе (П2) они были приняты завышенными, или увеличить сечения, если они оказались недостаточными, провести унификацию сечений и элементов, если необходимо откорректировать исходные предпосылки, а иногда и изменить конструктивные схемы, принятые на этапе (П2) – изменить сечения, изменить схемы балочных ростверков перекрытий, добавить или убрать колонны, добавить, убрать или изменить расстановку диафрагм, если жесткость здания на горизонтальные нагрузки оказалась недостаточной. Изменения в конструктивных схемах, принимаемые на этом этапе более обоснованы, так как оперируют с более обширной информацией о напряженно-деформированном состоянии конструкций, которая отсутствовала на этапе П2. Этот процесс является сугубо творческим, по сути определяет профессиональное качество проекта и требует от проектировщика специального опыта о стратегиях решения проектных задач, специфических знаний, на основе которых он выполняет анализ проектных решений в условиях ограничений, содержащихся в наборе требований (Т1, Т2, Т3).

На этапе (П9) выбирается окончательный вариант проектного решения. Для этого требуются знания по оценке промежуточных проектных результатов и знания о критериях оценок их достоверности.

Этап (П10) предназначен для подсчета объемов работ, оформления позиций для смет, выработки проекта производства работ (ППР) и проекта организации строительства (ПОС).

На этапе (П11) происходит выдача проектной документации на основе проектных решений, принятых и сформулированных на этапе (П10).

Для этого проектировщику необходимы знания по объяснению проектных решений, а также выполнение требований (Т2, Т3) по оформлению проектной документации.

## **2.2. Задачи автоматизации процесса проектирования**

Для определения задач автоматизации проектно-конструкторского процесса рассмотрим процентное соотношение различных проектных процедур.

Статистическое обследование ряда строительных и проектных предприятий показывает (табл. 2.1), что в прямых затратах времени, которые непосредственно служат процессу конструирования, чертежные работы составляют более 30 %, в то время как творческие элементы проектных работ – только 15%.

Доля расчетных работ, по сравнению с другими этапами проектирования, включая и чертежные работы, в процентном отношении довольно незначительна, хотя эти работы являются наиболее важными и определяющими творческий вклад в проектные работы. Остальные, так называемые косвенные проектные работы, занимающие примерно одну треть общего времени на конструирование, могут быть в основном охарактеризованы как «рутинные» этапы, которые по временным затратам примерно равноценны.

Распределение отдельных видов работ в фазе проектирования приведено в табл. 2.2. Результаты представленных обследований отчетливо показывают, что на «рутинные» процедуры приходится большая доля временных затрат в процессе проектирования, причем детализация и в дальнейшем остается «рутинной» работой независимо от вида и организации проектирования почти на всех предприятиях. Поэтому первым направлением рационализации процесса проектирования было стремление автоматизировать «рутинные» этапы с помощью средств вычислительной техники. На сегодняшний день наибольшие успехи достигнуты при автоматизации расчетов и разработке различного вида текстовой и табличной документации. До конца не решен, из-за существенных трудностей, вопрос об автоматизации чертежно-графических работ, несмотря на то, что процесс выполнения чертежей вручную ушел в прошлое, и чертежно-графические работы выполняются с помощью

двумерных САД-систем, которые получили широкое распространение в проектировании всех отраслей промышленности, в том числе и строительства. Процесс создания проектно-конструкторской документации остается рутинным, кропотливым и достаточно трудоемким.

Накопленный опыт показывает, что автоматизация архитектурно-строительного проектирования – это не автоматизация отдельных этапов проектирования, не разработка алгоритмов инженерных расчетов, а комплексная автоматизация всего жизненного цикла объекта, начиная с этапа эскизного проектирования, когда только прорисовываются контуры будущей конструкции, и заканчивая эксплуатацией строительного объекта (табл. 2.3, 2.4). Такой подход основывается на стремлении осуществить основную задачу — повысить качество принимаемых проектных решений за счет применения методов рационального проектирования [171].

Приведенные в таблицах соотношения зависят от сложности проекта. Больше всего такие соотношения подходят для проектов, имеющих аналоги.

Эти соотношения актуальны для каркасных и панельных зданий гражданского и общественного назначения.

Таблица 2.1

## Соотношение между процедурами процесса конструирования

Виды процедур	Время отдельных операций, %	Виды затрат времени
Создание эскизного проекта	15	Прямой
Расчеты	10-12	Косвенный
Вычерчивание	25-35	Прямой
Прочие работы	10	Косвенный
Составление спецификаций	5	Прямой
Контроль чертежей	2	Косвенный
Поиск повторяющихся узлов, элементов	2	Прямой
Составление описаний	4-6	Косвенный
Предварительное нормирование	3	Косвенный
Поиск аналогов проекта	1-4	Косвенный
Согласование проекта	3	Косвенный

Таблица 2.2

Распределение видов работ на основных этапах конструирования

Вид процедуры	Затраты времени на этапах разработки, %		
	Общего вида	узлов	детализация элементов
Проектирование	10-20	10-15	10-20
Расчеты	6-8	3-5	6-10
Вычерчивание	8-10	20-22	25-30

Таблица 2.3

Распределение трудозатрат по стадиям проектирования, %

Стадия проектирования	Уникальный объект	Типичный объект
Эскизный проект	10-12	-
Стадия «Проект»	28-33	38-42
Стадия «Рабочая документация»	58-63	58-62

Таблица 2.4

Распределение трудозатрат по этапам проектирования, %

Этап проектирования	Стадия «Проект»	Стадия «Рабочая документация»
Архитектурная часть	45-47	25-27
Конструктивная часть	13-15	36-38
Сантехническая часть	8-10	10-12
Электротехническая часть	10-12	13-14
Сметно-финансовая часть	2-5	2-5
Другие работы (охрана окружающей среды, наружные сети, проект организации работ и др.)	8-12	-

Автоматизация «рутинных» операций освобождает конструктора для творческой деятельности и повышает производительность процесса проектирования на оформительских этапах работ. Однако автоматизация только отдельных этапов проектирования, или широкого использования расчетных программных комплексов для проведения инженерных и прочностных расчетов не вносит существенных изменений в сроки проектирования [19, 88].

### **2.3. Инструментальные средства и существующие подходы к автоматизации процесса проектирования объектов строительства**

Наиболее распространенной САД-системой в мире является AutoCAD от компании Autodesk. Скоро уже четверть века, как компания Autodesk занимается разработкой системы автоматизированного проектирования AutoCAD. На данный момент в мире насчитывается уже около шести миллионов пользователей AutoCAD. За прошедшие годы были созданы тысячи дополнений и специализированных решений от сторонних фирм и самой компании Autodesk. Одними из лидеров в проектировании рельефов и ландшафтов являются программные продукты Autodesk Land Desktop и Autodesk Civil 3D. И Autodesk Land Desktop и Autodesk Civil 3D программные решения базируются на использовании AutoCAD. Но, несмотря на широкое распространение и популяризацию продуктов компании Autodesk, серьезным недостатком этих продуктов является отсутствие возможности создания параметрической модели. AutoCAD был и остается хорошим инструментом для черчения, имеющим мощный аппарат для создания на экране компьютера графического отображения объекта и способным выдавать проектные документы, соответствующие, однако, только экранному отражению. Как следствие этого к недостаткам этого мощного продукта можно отнести моральное устаревание и слабые 3D возможности.

Среди САД-систем, специализирующихся на автоматизации процесса создания архитектурной модели сооружения, стоит отметить программные комплексы ArchiCAD (Graphisoft), Revit (Autodesk), AllPlan (Nemetschek), САПФИР (ООО «ЛИРА САПР», ООО «СОФОС», Украина). Проведем краткий анализ этих комплексов. Все эти программные продукты являются инструментами архитектора. Перечисленные программные комплексы реализуют (или пытаются реализовать) BIM-технологии, то есть технологию информационного моделирования здания, то есть подход, при котором в единую базу данных вносится информация обо всех аспектах здания, начиная с проекта и заканчивая эксплуатацией, а вся техническая документация и визуализация проекта – выдается по результату запроса в единую базу данных. Программы включают в себя визуализаторы с трассировкой лучей. Программные комплексы состоят условно из двух частей - параметрической трехмерной части с объектами, библиотечными

элементами и двумерной чертилки для доработки технической документации по стандартам СПДС. Программы являются не просто определенным программным обеспечением, но и платформами. Под ArchiCAD есть, к примеру, небольшие программы для проектирования бревенчатых домов, а Revit, помимо архитектурного Revit Building, еще подключает инструмент конструктора Revit Structure, и теперь еще и аналог ABS (проектирование инженерных сетей) на платформе Revit - Revit systems. Программный комплекс САПФИР имеет уникальную систему САПФИР-КОНСТРУКЦИИ (будет описана в этой главе далее), которая позволяет подготовить архитектурную модель к расчету в прочностных расчетных комплексах, путем создания аналитической модели [11].

ArchiCAD - программный пакет, обеспечивающий разработку любых архитектурно-дизайнерских решений. В ArchiCAD можно одновременно работать над созданием проекта и составлять сопутствующую строительную документацию, так как программа хранит информацию о проектируемом здании: планы, разрезы, перспективы, перечень необходимых стройматериалов, а также замечания архитектора, сделанные в процессе работы. На любом этапе работы можно увидеть проектируемое здание в трехмерном виде, в разрезе, в перспективе, сделать анимационный ролик.

В 1982 году Graphisoft стала первой компанией, предложившей 3D-моделирование на персональном компьютере. Основным понятием ArchiCAD является «Виртуальное Здание» (Virtual Building). «Виртуальное Здание» – это трехмерная модель проекта, которая содержит всю информацию необходимую по работе с ним, и существует вместе с проектом в течение всего времени проектирования. Таким образом, при работе в ArchiCAD не просто создаются отдельные чертежи. Приобретается полный набор проектной документации в одном файле: поэтажные планы, разрезы и фасады, данные о помещениях, спецификацию материалов и изделий, строительно-техническую документацию, рисунки и изображения фотореалистичной качества, демонстрационные видеоролики и сцены виртуальной реальности.

Среди основных концепций ArchiCAD – способность обрабатывать 3D-модель и 2D-чертежи в одном рабочем документе. Это достигнуто с помощью понятия «Интеллектуальные Компоненты Здания» (Intelligent Building Components), которые несут полную информацию об объекте, и является частью глобального «Виртуального Здания».

Благодаря тому, что используется «Встроенная база данных Виртуального Здания» (Virtual Building's Integrated Database), строительно-техническая документация и другие файлы могут быть получены автоматически непосредственно из 3D-модели здания без использования дополнительного программного обеспечения и лишних действий. Использование базы данных «Виртуального Здания» имеет еще одну положительную черту, – если в проекте что-то изменено, это изменение вносится только один раз в ArchiCAD, при этом все документы, а именно планы, разрезы/фасады, 2D-и 3D-виды, автоматически изменяются. Такой подход позволяет сократить время разработки проекта и избежать возможных ошибок.

В отличие от других САПР, написанных для инженеров, а позднее адаптированных для архитектуры, ArchiCAD изначально разрабатывался исключительно для работы в области строительной индустрии. Поэтому интерфейс и инструментарий программы являются средствами, привычными для архитекторов. К преимуществам этого программного комплекса можно отнести следующие факторы: самая популярная и нейтральная архитектурная платформа, обладающая понятным, интерактивный и легко усваиваемым пользовательским интерфейсом. Интеграция с широким спектром систем инженерного анализа (CAE): Scia Engineer, SAP 2000, ETABS, FEM Design, а также с широким спектром систем автоматизированного проектирования (CAD): Tekla Structures; Revit. ArchiCAD может работать с большими моделями (разделение и фрагментирование), однако при этом низкая производительность.

Недостатки Archicad. Система не интуитивна и, все-таки, довольно чужеродна к Windows. Много неудобств от того, что программа была когда-то рассчитана на слабые компьютеры и потому имеет принципиальные ограничения. Здание рассматривается только поэтажно, используются слои, плохая система подсказок при построении. Есть параметрические ограничения при моделировании, а также ограниченная масштабированность.

Поскольку конструкторы, проектировщики инженерных сетей и прочие смежники работают в AutoCAD, приходится сохранять информацию в формате dwg. А модуль экспорта/импорта directDWG не доработан, так что присутствуют проблемы с ошибками в передаваемых файлах. Библиотечные объекты не вносятся в проект, то есть при передаче приходится их копировать отдельно или синхронизировать все библиотеки.

Из-за этого часто возникают разночтения одного и того же проекта на разных компьютерах. Модуль экспорта в расчетные программные комплексы отсутствует и аналитическую модель в ArchiCAD создать невозможно.

Основным конкурентом ArchiCAD является продукт компании Autodesk – REVIT. Специализированное решение для архитектурного и строительного проектирования на базе AutoCAD может применяться архитекторами, строителями, проектировщиками и дизайнерами. Программа является независимым «вертикальным» решением на базе AutoCAD. В REVIT добавлены собственные «интеллектуальные» параметрические объекты, на основании которых ведется концептуальное и рабочее проектирование. REVIT – это специализированное решение для архитектурного и строительного проектирования с поддержкой обмена данными с AutoCAD. REVIT реализует BIM-технологии. Нативный экспорт в DWG-формат. Есть возможность сделать весь проект на одной трехмерной платформе. Архитектор запроектировал здание в REVIT Building, конструктор расставил колонны, спроектировал несущие конструкции в REVIT Structure, далее есть возможность подключить расчетный модуль Robobat (СКАД, ЛИРА-САПР) и вернуть результаты расчетов обратно в REVIT. Инженер проложил водопровод и канализацию и все это в одном проекте.

Недостатки REVIT. Платформа молодая. Недостаточная параметризация, много ручной работы при внесении изменений. Ограниченная связь с другими промышленными платформами. Structure и Systems пока не локализованы. Слабо реализованы отечественные нормы, проблематично создать автоматические спецификации по отечественным стандартам. Ложное объектное моделирование (ARX object подменяет Solid). Ограниченная масштабируемость, низкая производительность при работе с большими моделями.

Программный комплекс Allplan от Nemetschek сочетает в себе удобство при пользовании обменом данными и эффективным планированием расходов. Allplan, в качестве платформы BIM, обеспечивает основу для проектирования 3D-модели. Allplan САПР позволяет выявить и устранить разногласия на ранней стадии при создании 3D-модели на основе здания. Если модель верна, то соответствующие чертежи общего расположения и армирования созданной арматуры также будут

правильными. В Allplan реализована поддержка многопользовательской платформы и конкурентных операций при работе с одним объектом, но пока идея реализована несовершенно, так как масса не контролируемой информации. Программа очень хорошо связывает все разделы проектирования (архитектуру, инженерии, водоснабжение и канализацию и т.д.). Положительным является наличие огромного количества библиотек и постоянное дополнение к ним. Имеется возможность создания своих элементов и библиотек. Хорошая 3-D визуализация. Нельзя не отметить высокую производительность при детализации железобетонных конструкций.

Недостатки Allplan. Система очень громоздкая, достаточно сложный пользовательский интерфейс, смешанная технология 2D – 3D плана; недостаточно развито проектирование металлоконструкций; отсутствует хорошая связка с расчетными программными комплексами.

Все современные архитектурные программные комплексы, такие как ArchiCAD, REVIT, Allplan и другие ориентированы на параметрическое моделирование, но, несмотря на это, ни один из них не интегрируется качественно с расчетными программными комплексами, что позволяет программный комплекс нового поколения САПФИР.

Уникальной характеристикой этого программного комплекса является возможность доработки в автоматизированном режиме несовершенной архитектурной модели, созданной в любом архитектурном программном комплексе, поддерживающем IFC-формат, и приведение модели к расчетной схеме для последующей передачи в расчетные программные комплексы. После выполнения прочностного расчета, подбора арматуры, результаты армирования возвращаются в программный комплекс САПФИР для создания в автоматизированном режиме проектно-конструкторской документации в системе САПФИР-ЖБК.

САПФИР-КОНСТРУКЦИИ не просто является мощным средством решения общих композиционных и графических задач, но еще и укрепляет связь между творческим характером концептуального проектирования и детальной разработкой проекта. С помощью САПФИР-КОНСТРУКЦИИ проектировщики могут добиться общего понимания взаимосвязи между композиционной формой и формой здания на протяжении всего рабочего процесса.

В последнее время получило широкое распространение в архитектурно-строительном проектировании, а также и в машиностроении понятие комплексных САПР. При этом комплексность может быть разной – комплексность, связанная с автоматизацией всех этапов проектирования от архитектуры до создания смет, с акцентом на подсчет объемов работ с привязкой к нормативам в позициях смет и автоматизацией процесса управления строительством. С другой стороны, весьма актуальным и востребованным, является комплексность, связанная со связкой архитектурного проектирования и конструирования, предусматривающая создание в автоматизированном режиме компьютерной модели для подготовки адекватной расчетной схемы, и выдачей рабочей конструкторской документации. Ниже в таблице 2.5 приведен сравнительный анализ существующих на мировом рынке основных комплексных САПР с точки зрения разработки конструкторской документации.

Приведенная таблица является субъективным мнением автора, при этом сравнительные результаты можно принять во внимание при покупке комплексного программного обеспечения в проектную организацию.



1	2	3	4	5	6	7	8
2.7	Односторонняя связь с расчетными программами (экспорт модели)	+ (Revit Structure, AutoCAD SD Железобетон)	-	+ (поддержка различных форматов обмена данными. • PDF 8 (2D и 3D импорт/экспорт) • IFC 2x3 (импорт/экспорт) • DWG 2007/2008/2009/2010 (импорт/ экспорт) • DGN V8 (импорт/ экспорт) • DWF, DXF • SKP • ODBS • AVI • gbXML • BMP, JPG, TGA, PIF	+	+ (через API и нейтральные форматы)	-
2.8	Автоматизированное создание детальной 3D модели КЖ	+ (Revit Structure)	-	+ (высокая производительность)	±	+ (детальное проектирование металлоконструкций и сборных и монолитных ЖБ конструкций)	-
2.9	Автоматизированное создание спецификаций на основании 3D модели	+ (Revit Structure, AutoCAD SD Сталь)	-	+ (не достаточно локализованы отечественные нормы)	+	+	±
2.10	Соответствие актуальным нормам проектирования	+	-	+	+	-	±
3	Автоматизированная разработка плоских чертежей						
3.1	Автоматизированное создание детальной 2D модели КЖ	+ (AutoCAD SD Железобетон)	+	-	+	+ (Автоматическая генерация детальных чертежей по выбранному шаблону);	-
3.2	Автоматизированное создание спецификаций на основании модели	+ (AutoCAD SD Железобетон) ± (Revit Structure, необходимо создание баз данных)	+	-	+	(Изменения модели требуют трудоемкой работы по обновлению чертежей)	±

Сейчас много пишется о технологии информационного моделирования строительных объектов BIM. Как правило, при этом основное внимание уделяется общим принципам данной технологии и опыту зарубежных фирм по ее использованию [13, 17].

Проблема выбора BIM (3D) технологий для проектирования строительных конструкций является актуальной задачей для проектных организаций. Несмотря на стремительное развитие BIM технологий в реальном проектировании перейти на моделирование всех разделов в одной среде не удается. Наиболее продвинутым продуктом с точки зрения комплексных САПР по ряду показателей, приведенных в сравнительной таблице, является, на первый взгляд, Autodesk Revit Structure Suite. Но при проведении реального проектирования продукт, к сожалению, в настоящее время не обладает необходимым функционалом и не выдерживает критики. В плане раздела КЖ достаточно хорошо проработан Allplan Конструирование 2013, но архитекторы, как правило, работают в среде Archicad и, поэтому, для получения чертежей КЖ приходится конвертировать архитектурную модель по схеме Archicad > IFC > Allplan ЖБ (корректировка геометрии опалубки для расчетной схемы) > ЛИРА-САПР > Allplan ЖБ (армирование опалубки). Схема далеко не идеальна, но решает некоторую часть поставленных задач.

Комплексная САПР, разрабатываемая на основе программных комплексов семейства ЛИРА, интенсивно развивается и нацелена непосредственно на нужды проектировщиков. Позволяет работать по схеме **Архитектурная программа (Archicad, Allplan и т.д.) > IFC > САПФИР > ЛИРА-САПР > САПФИР-ЖБК.**

Каркас здания может создаваться в любой архитектурной программе (или же в программе САПФИР). При создании каркаса здания в программе САПФИР конструктивные элементы каркаса сразу реализуются со всеми характеристиками типов сечений в соответствии с нормами. В свойствах таких элементов (например, колонн) отображаются геометрические характеристики поперечного сечения колонны, тип материала, длина и многое другое. Здесь же можно задать марку бетона (стали) и прочее. Вся эта информация затем автоматически используется в спецификациях. Создавая из конструктивных элементов каркас здания, автоматически создается и расчетная схема. В дальнейшем, задается тип сопряжения в узлах (жесткое, шарнирное), автоматически создаются АЖТ в местах

пересечения конструктивных элементов, типы закреплений (граничные условия), прикладываются все действующие на здание нагрузки. Затем аналитическая модель со всей содержащейся в ней информацией передается из САПФИР–(САПФИР–КОНСТРУКЦИИ) в программный комплекс ЛИРА-САПР, где выполняется расчет. По завершении расчета все результаты в виде полей арматуры возвращаются в САПФИР для получения рабочих КЖ – чертежей в САПФИР–ЖБК (автоматизированная раскладка арматуры, формирование спецификаций в автоматическом режиме).

Говоря о внедрении BIM-технологии, следует отметить, что даже при различной для каждой из организаций специфике ее реализации общая схема останется неизменной. Поэтому, при выборе комплексной САПР следует обратить внимание на возможности и достоинства предлагаемых BIM-программ с конструкторской точки зрения.

Таблица 2.6

Анализ корректности (адекватности) аналитической модели

	<b>Autodesk Revit Structure Suite</b>	<b>Nemetschek AllPlan 2012 BIM</b>	<b>САПФИР</b>
Варьируемость параметров конструктивных элементов	+	+	+
Создание сечений конструктивных элементов	–	–	+
Автоматическая генерация абсолютно жестких тел (АЖТ)	–	–	+
Возможность создания расчетных моделей капителей	–	–	+
Графическое задание нагрузок, формирование загружений	+	–	+
Автоматический сбор ветровой нагрузки	–	–	+
Задание условий опирания	+	+	+
Моделирование процесса возведения (монтаж)	-	–	+

### **2.3.1. Методы организации обмена информацией между участниками процесса проектирования**

Рассмотрев все этапы проектирования зданий и сооружений и САД-системы и программные комплексы, используемые при этом, делаем вывод, что при таком их разнообразии обмен данными между ними становится нетривиальной задачей. Если даже в упрощенном виде предположить, что на каждом этапе проектирования используется только одна САД-система или программный комплекс, то и тогда получаем минимум семь разных программных средств, используемых на этапе проектирования здания и процессе управления строительством. Но в реалиях современной жизни при разработке больших проектов, как правило, задействованы несколько проектно-изыскательских организаций, проектные институты, архитектурные организации, генподрядчик, подрядчики и субподрядчики выполнения строительства. Гарантий, что все участники проекта на соответствующих этапах проектирования используют одни и те же программные средства, нет. В качестве примера можем рассмотреть один из завершающих этапов проектирования объекта строительства – создание сметно-финансовой документации. Этот этап завершает весь процесс собственно проектирования и продолжается параллельно с этапом управления строительством до сдачи объекта в эксплуатацию. Во время этого этапа минимум ежемесячно создаются отчеты о выполненных работах, израсходованных материалах, сводятся балансы перерасхода или экономии с учетом текущих цен на ресурсы и т.д. Указанные документы предоставляются главной проектной организации непосредственно подрядчиками, которые выполняют работы по возведению объекта строительства. Если объект строительства достаточно большой, то подрядчик может распределять некоторые работы между субподрядчиками, и тогда они передают отчеты о выполненных работах подрядной организации, а она в свою очередь проектной. Как видим, в создании сметно-финансовой документации участвуют две и более организации. И каждая из них может использовать отличающиеся между собой программные средства.

Как уже отмечалось, рынок информационных технологий в настоящее время насыщен специализированными программными средствами для автоматизации отдельных этапов проектирования зданий и

сооружений. Каждое из этих программных средств имеет свою модель представления объекта строительства и оперирует теми атрибутами элементов модели, которые необходимы для решения задач автоматизации определенного этапа проектирования строительного объекта. На современном этапе развития средств автоматизации проектирования зданий и сооружений ведущей концепцией становится следующая: данные создаются один раз, а затем, при необходимости, изменяются или обновляются, но никогда не вводятся заново вручную. Ее реализация базируется на использовании соответствующих технологий обмена и совместного управления данными для интеграции всех участников проекта, что позволяет минимизировать дублирование данных. Современное развитие систем автоматизированного проектирования характеризуется тенденциями интеграции отдельных программных комплексов и автоматизированных систем. Многочисленные информационные объединения между системами архитектурного проектирования, таких как REVIT, ARCHICAD, AllPlan и программными комплексами для расчета и проектирования конструкций, таких как ЛИРА-САПР, МОНОМАХ, SCAD, ROBOT, HYPER-STEEL и многие другие свидетельствуют о том, что интеграция востребована современными технологиями проектирования.

Интеграция между упомянутыми программными средствами, в основном, обеспечивается путем обмена файлами экспорта/импорта. Чаще всего это файлы формата DXF, которые практически обеспечивает передачу только геометрических параметров объекта в виде простых графических примитивов и их блоков. Элементы модели и их атрибуты при этом теряются. Только лидеры среди программных средств САПР, такие как ArchiCAD, Revit имеют возможности более глубокой интеграции, но и они не обеспечивают обмен между собой всеми необходимыми данными [27].

Особенностью проблемы интеграции является большое количество разнообразных моделей представления данных об объекте строительства на разных этапах проектирования. В таких условиях задача интеграции различных программных комплексов с учетом особенностей архитектурно-строительного проектирования и основных общесистемных принципов САПР (включение, системного единства, развития, комплексности, информационного единства, совместимости, инвариантности, унификации и стандартизации) является достаточно сложной задачей.

Проектирование, строительство и эксплуатация здания – это обычно очень сложный процесс, который требует тесного сотрудничества специалистов, работающих в разных областях. Схема, представленная на рис. 2.2, отражает возможных участников процесса строительства, включая владельца здания, застройщиков, подрядчиков, инженеров, специалистов по организации производства и, конечно, архитекторов. Архитектор играет одну из главных ролей в этой иерархии, так как он единственный, кто постоянно должен предоставлять информацию о текущем статусе проекта для всех остальных участников. Если архитектурная фирма не приспособлена к такой форме обмена информацией и сотрудничества, ее не будут допускать в большие проекты. BIM-технология предоставляет довольно рациональную и автоматизированную компьютерную систему для строительной промышленности. При использовании BIM-модели на практике, не только архитектор выигрывает от использования виртуального проекта. Владелец и другие участники проекта также получают ряд преимуществ.

Понятие BIM проекта позволяет перейти от «среды, основанной на отдельных файлах» к «единой среде данных».

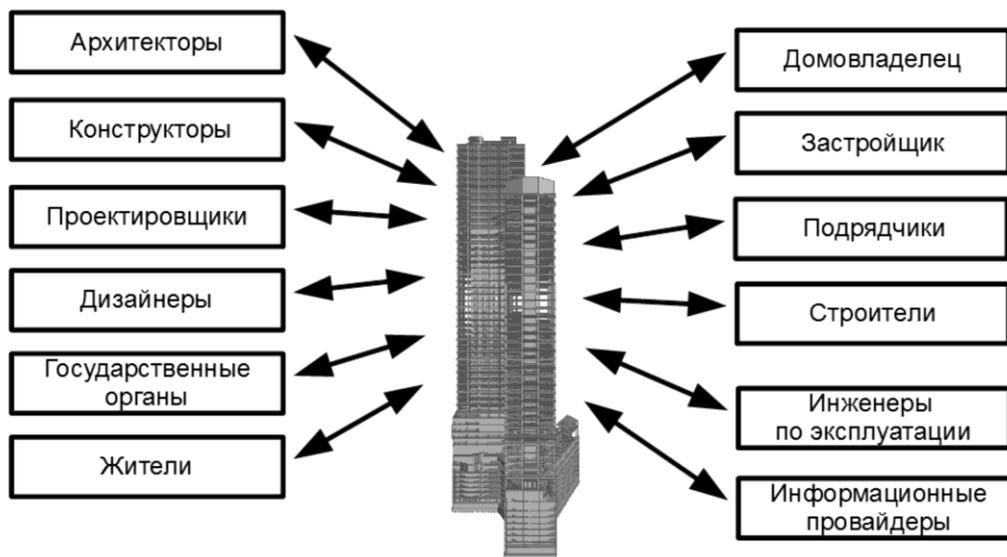


Рис. 2.2. Участники сотрудничества на основе информационной модели здания

## Форматы файлов

Одной из основных проблем организации жизненного цикла сооружения является то, что для различных участников требуются различные виды информации от проектировщиков. Данные, необходимые для строительной компании значительно отличаются от данных, которые необходимы для эксплуатации здания во время его срока службы. В BIM-приложениях имеется возможность обмена информацией с другими программами через несколько форматов файлов. Наиболее важные из них приведены на рис. 2.3. Далее мы рассмотрим их подробнее.

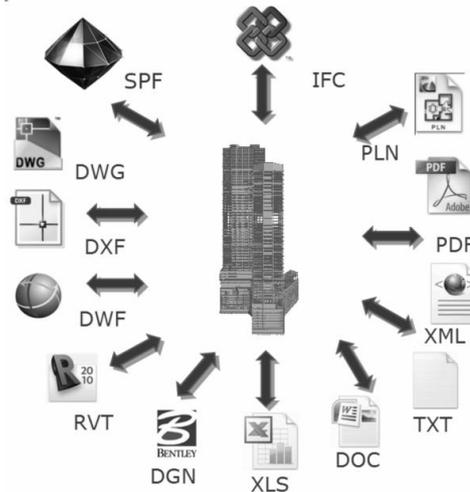


Рис. 2.3. Форматы файлов, применяемые в BIM-приложениях

Когда в начале семидесятых годов появились устройства для вывода графической информации (плоттеры), были созданы предпосылки для объектной интеграции автоматизированных процессов проектирования. В этот период были начаты разработки интегрированных систем, для достаточно широкого класса строительных объектов автоматизировали основные процессы проектирования инженерно-технические расчеты, конструирование, проектирование инженерного оборудования, выпуск рабочих чертежей, сметно-финансовую часть. Разработка интегрированных систем шла по разным направлениям. По-прежнему достаточно важной оставалась проблема интеграции. Одним из вариантов интеграции программных комплексов был ряд разработок, основанных на объединении отдельных самостоятельных систем под управлением единой СУБД на основе единой базы данных. Примером такой разработки появилась технологическая линия проектирования (ТЛП) Лирика (ЛИРА и КАРКАС),

разработанная специалистами НИИ Автоматизированных систем строительства (НИИАСС) еще в 80-х годах для автоматизированного проектирования каркасных зданий по разным сериям из сборного железобетона. Как видно, тенденция интеграции программных комплексов в архитектурно-строительном проектировании не нова, проблема интеграции стоит уже давно и до сих пор не решена на должном уровне. Состояние интеграции современных САПР и программных комплексов базируется на принципе монополизации рынка. Это означает, что программные продукты производства одной компании (или группы компаний – партнеров) имеют достаточно мощные средства для обмена данными между собой. В то же время интеграция с аналогичными программными продуктами конкурентов находится на достаточно низком уровне. Причины такого положения вещей довольно просто объяснить, взглянув на это с коммерческой точки зрения. Если конечный пользователь не хочет заниматься рутинным созданием одной и той же модели в разных программных средствах вручную, то самым простым выходом для него является приобретение программных средств автоматизированного проектирования объекта строительства у одного и того же производителя. Примером могут служить компании Autodesk, Nemetschek. При рассмотрении САД-систем и программных комплексов автоматизации различных этапов процесса проектирования зданий и сооружений, было установлено, что для каждого из них присутствуют решения от этих компаний, а на некоторых этапах даже не одно.

Разработчики отечественной BIM-технологии на основе программного комплекса ЛИРА-САПР предлагают альтернативный подход, который заключается в предоставлении возможностей пользователю работать в привычном ему архитектурном программном комплексе для создания архитектурной модели, которая будет доработана и скорректирована средствами программы САПФИР и передана в расчетный модуль программного комплекса ЛИРА-САПР.

Еще одной особенностью интеграции современных САПР и программных комплексов является ориентация на обмен данными между программными средствами, которые автоматизируют один и тот же этап проектирования. Например, для САПР общего назначения и САПР в машиностроении, таких как AutoCAD, КОМПАС, T-flex, стандартом фактически является формат DXF. Этот формат был разработан фирмой Autodesk, как открытый формат для обмена данными между своими

программными решениями. Но поскольку Autodesk является «законодателем моды» на рынке коммерческих САПР, этот формат был подхвачен менее крупными компаниями и стал общепринятым. С тех пор он постоянно развивается и дополняется. Но, на современном этапе развития САПР в строительстве почти отсутствуют стандарты (или хотя бы унифицированные форматы) для представления данных, полученных на разных этапах проектирования. Лишь сравнительно недавно появился формат обмена данными IFC, который предусматривает возможность интеграции специализированных архитектурно-строительных комплексов.

### **2.3.2. Специализированные программные средства автоматизации проектных работ**

Задача конструирования является одной из важных и наиболее трудоемких в САПР. Конструированием является прочностной расчет конструкции, с последующим представлением конструкторской документации.

При конструировании:

- ✓ определяется (или уточняется) геометрическая схема объекта проектирования, материалы, нагрузки;
- ✓ выполняется расчет всей конструкции, отдельных элементов, узловых соединений;
- ✓ выполняется чертежи конструктивных элементов, узлов, маркировочных схем;
- ✓ привязка смежных конструкций (фундаментов, конструкций существующих объектов, технологического оборудования, отделочных конструктивных элементов);
- ✓ оформление конструкторской документации;
- ✓ согласование полученной конструкции с технологами и архитекторами.

На стадиях эскизного и рабочего проектирования выбираются и обосновываются варианты проектного решения, принимаются и разрабатываются окончательные решения.

При этом выполняются следующие основные виды работ:

- ✓ принятие основных проектных решений;

- ✓ разработка структуры объекта проектирования и ее взаимосвязи с другими участниками процесса проектирования на протяжении всего жизненного цикла (определение функциональности объекта строительства, разработка объемно-планировочных решений, определение несущей конструктивной системы, уточнение типов материалов, определение взаимосвязей между всеми участниками процесса проектирования (проектирование инженерных сетей, разработка технологии возведения и т.д.));
- ✓ определение методов, математических моделей для проектных операций и процедур, определение и сбор видов нагрузок и воздействий на проектируемое сооружение в соответствии с действующими нормативными документами;
- ✓ формирование состава необходимого программного обеспечения, способного обеспечить полный цикл процесса проектирования;
- ✓ принятие окончательного проектного решения по результатам прочностного расчета;
- ✓ предварительный расчет стоимости строительства, расчет технико-экономических показателей.
- ✓ оформление всей документации, поставляемой на строительную площадку.

В системах инженерных расчетов и анализа прочностных свойств и характеристик центральное место занимают программы компьютерного моделирования и расчета конструкций, прежде всего это программы анализа прочности, основанные на методе конечных элементов (МКЭ).

Считается, что МКЭ впервые был предложен Курантом [181] в 1943 г. Конечно метод является численным и связан с большим количеством вычислений. Его практическое применение началось в 60-х годах прошлого столетия, когда ЭВМ стали доступными специалистам, работающим в области строительного проектирования [56, 57, 58, 61, 68, 79, 152, 153]. Появились программные комплексы для анализа и моделирования конструкций на основе МКЭ.

Вообще, количество конечно-элементных программных комплексов по некоторым оценкам приближается к нескольким сотням. Большинство из них выполнено небольшими группами исследователей (в основном это разработки отечественных, американских и европейских научно-исследовательских лабораторий) и ориентированы на решение узких

научных проблем. Характерной их особенностью является очень неудобный интерфейс пользователя, а иногда его отсутствие. Задание исходных данных и обработка результатов расчета в этих случаях усложняется, зачастую требует знаний основ программирования. Вместе с тем наличие таких программ нельзя недооценивать, так как именно они являются генераторами идей в области совершенствования МКЭ или разработки альтернативных методов [37].

Пользователей, прежде всего, интересуют программные комплексы массового применения. Их отличительными особенностями в первую очередь являются:

- ✓ наличие многочисленных приемов, облегчающих построение компьютерных моделей, автоматизированное построение конечноэлементных сеток, диагностика формальных ошибок, режимы undo, redo, графический и табличный анализ результатов (изополя напряжений и перемещений, формы собственных колебаний, анимация перемещений при динамических воздействиях и многое другое).
- ✓ безупречная компьютерная реализация, обеспечивающая работу в режиме реального времени, быстрое действие ресурсоемких алгоритмов, отсутствие сбоев, зависаний и т.д.
- ✓ строгое математическое обоснование реализованных методов (сходимость реализованных типов конечных элементов, сходимость методов решения нелинейных уравнений, сходимость геометрических аппроксимаций – замена криволинейных поверхностей вписанными треугольниками и др.), наличие трассировки расчетов и т.д.

Можно описать две группы программных комплексов, применяемых при расчете строительных конструкций. Первая группа – это наукоемкие «тяжеловесные» программные комплексы, ориентированные на решение широкого спектра задач математической физики, механики деформированного твердого тела, гидравлики, гидродинамики, магнитостатики и многое другое. К таким комплексам можно отнести АБАКУС, NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis), ANSYS, COSMOS и другие. Вместе с тем, использование этих программных комплексов для расчета строительных конструкций в ряде случаев может оказаться нецелесообразным. Так, специфика расчета стержневых систем (шарниры,

учет сдвига, депланация тонкостенных сечений, стержни на упругом основании, устойчивость и многое другое), как правило, реализуется на основе трехмерного подхода. Это приводит к неоправданному увеличению размерности решаемой задачи, увеличению вероятности появления различных ошибок, сложности анализа результатов, представляемых в непривычном для инженера строителя виде. Часто в этих комплексах отсутствует реализация необходимых для строителя средств и инструментов – например, средства учета процесса возведения.

Ну и конечно, определенные затруднения у инженера-строителя вызовет отсутствие конструирующих подсистем железобетонных и стальных конструкций.

Вторая группа программных комплексов массового применения ориентирована именно на расчет и проектирование строительных конструкций. К таким комплексам относятся SAP 2000, ROBOT, STRUDL, STAAD, АРМ СТРУКТУРА, STARK, MICRO FE, SCAD, ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР. Последние три программы разработаны в Украине и ориентированы на нормативную базу стран СНГ и Украины.

Рассмотрим теперь программные комплексы, предназначенные для разработки рабочей конструкторской документации.

За последние 25 лет CAD – системы, как системы геометрического моделирования, были значительно усовершенствованы. Появились средства 3D-поверхностного и твердотельного моделирования и параметрического конструирования, был значительно улучшен интерфейс.

Несмотря на все эти усовершенствования, касающиеся, в основном, геометрических функций, CAD – системы оказывают конструктору слабую помощь с точки зрения всего процесса конструкторского проектирования. Они обеспечивают описание геометрических форм и выполнение рутинных операций, таких как образмеривание, генерация спецификаций и т.п. в автоматизированном режиме. Эти ограничения и чисто геометрический интерфейс оставляет методологию конструкторской работы такой же, какой она была при использовании чертежной доски. Развитие получили также системы автоматизации проектирования технологических процессов (САПП). Однако, подобно CAD - системам, эти усовершенствования не затронули процесс проектирования. Помимо проектирования, инженерная деятельность связана с инженерным бизнесом и менеджментом. Сюда, в частности, входят автоматизированные системы управления производством

(АСУП). Эти системы, обычно, развиваются без какой - либо интеграции с САПР.

Итак, до последнего времени концепция автоматизации труда конструктора базировалась на принципах геометрического моделирования и компьютерной графики. Такое положение не удовлетворяет современным требованиям к автоматизации. Сейчас необходима комплексная компьютеризация инженерной деятельности на всех этапах жизненного цикла объекта строительства, которая получила название CALS (Computer Aided Life-cycle System) технологии. Традиционные САПР с их геометрическим, а не информационным ядром, не могут явиться основой для создания таких систем. Сегодня каждый строительный объект в процессе своего жизненного цикла должен представляться в компьютерной среде в виде иерархии информационных моделей, составляющих единое целое и имеющих соподчиненность.

Таким образом, развитие специализированных программных средств автоматизации проектных работ идет двумя путями — эволюционным и революционным. Эволюционно расширяются функциональные возможности продуктов, автоматизирующих каждый этап процесса проектирования в-отдельности, расширяются и совершенствуются возможности САД-систем. Но революцией можно назвать появление BIM-технологий, позволяющих использовать для хранения инженерных данных (чертежей, трехмерных моделей, списков материалов и т. д.) не файловые структуры, а стандартные базы данных SQL-типа. В результате инженерная информация структурируется, и управлять ею гораздо проще.

#### **2.4. Технология интеграции программных средств в архитектурно-строительном проектировании**

В настоящее время компьютерные технологии охватывают все разделы архитектурно-строительного проектирования.

Автоматизация архитектурной части проекта обеспечивается такими программными комплексами как САПФИР, ArchiCAD, REVIT, Allplan и др. Конструкторы имеют в своем распоряжении широкий набор программных комплексов, таких как ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР, SCAD, STARK, MicroFE, ROBOT, SAP2000, STRAP, ANSYS и др. Для автоматизации сантехнической части проекта проектировщики располагают такими

программными комплексами как CAD–profi, HVAC & Piping, AutoCAD Revit MEP Suite, AutoCAD MEP, APC ПС и др. Для автоматизации электротехнической части проекта набор программных средств также достаточно представительный: ЭЛЬФ, НТЕ, nanoCAD ONC, nanoCAD СКС, nanoCAD ЭЛЕКТРО, Bentley promis, CAD–profi, Electrical, CADElectro, WinElso и др. Для автоматизации сметно–финансовой части проекта имеются такие программы как АВК, ИСС, АСС–4 и др., хотя следует отметить, что наиболее трудоемкая часть работ – подсчет объемов, до сих пор остается вне поля зрения разработчиков программного обеспечения.

Среди существующего программного обеспечения в отдельную группу можно выделить сугубо графические программы, такие как AutoCAD, ZWCAD, nanoCAD, БудКАД, BricsCAD и др. Значение этих программ сильно фетишизируется. Это объясняется тем, что сейчас практически все чертежи выполняются с использованием этих программ, что создает иллюзию 100% автоматизации проектных работ именно благодаря этим программам. Программы типа NANO CAD (Россия) и БудКАД (Украина) объявляются национальными САПР. Все это неправильно расставляет акценты в намечаемых планах развития САПР. Необходимо иметь в виду, что, во–первых, сугубо графические системы автоматизируют только часть самых рутинных проектных работ, а именно – чертежные работы, являясь, по сути, электронным кульманом, а, во–вторых, эти программы основываются на компьютерной модели чертежа, а не на компьютерной модели объекта. В этом смысле прототипом будущих САПР являются такие программные комплексы как САПФИР, ArchiCAD, REVIT, Allplan, ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР и др., которые основываются на компьютерной модели рассматриваемого объекта. Пока эти модели носят узкопроблемный характер. Так, компьютерные модели, синтезируемые архитектурными программными комплексами, в основном содержат элементы архитектурной части проекта – форма и расположение стен, колонн, лестниц, окон, дверей, перегородок, отделка полов, стен и потолков и др. Компьютерные модели, синтезируемые конструктивными системами, естественно содержат элементы необходимые для автоматизированного расчета и проектирования конструкций – топология и геометрия элементов несущих конструкций, сечения и материал несущих конструкций, величина и характер нагрузок, условия опирания и др.

Для поддержки принятия решений в области комплексного управления возникает необходимость получения результатов на основе всех данных, собираемых и обрабатываемых различными программами. Актуальной проблемой разработчиков и пользователей архитектурно-строительных программных комплексов является достижение надлежащего уровня интеграции специализированных приложений путем создания таких технологий их взаимодействия, которые обеспечивают возможность совместного использования и обмена данными в унифицированных форматах, отличных от тех, которые были использованы на этапе создания самих приложений. Перспективным направлением решения проблемы интеграции специализированных архитектурно-строительных программных комплексов является разработка комплексной цифровой модели объекта (ЦМО), которая будет содержать описание объекта строительства на основных этапах его жизненного цикла (проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция).

Ориентировочная схема функционирования такой системы представлена на рис. 2.4.

ЦМО – представляет собой базу данных, где информация о каждом элементе организуется в виде фрейма, где указываются его атрибуты – местоположение, материалы, ссылки на категории и др.

Применение технологии интеграции, основанной на использовании комплексной ЦМО, позволяет решить многие проблемы, возникающие в процессе проектирования зданий и сооружений. Во-первых, поскольку информация из разных этапов проектирования находится в одной модели, это обеспечит полноту, целостность и корректность данных об объекте строительства. Во-вторых, каждый архитектурно-строительный программный комплекс или САД-система, участвующий в процессе проектирования будут получать входные данные из комплексной ЦМО, что снимает необходимость их повторного ввода. И, в-третьих, поскольку одна и та же информация никогда не вводится заново вручную, это поможет предотвратить возникновение многих произвольных ошибок, и обеспечит непротиворечивость и согласованность данных.

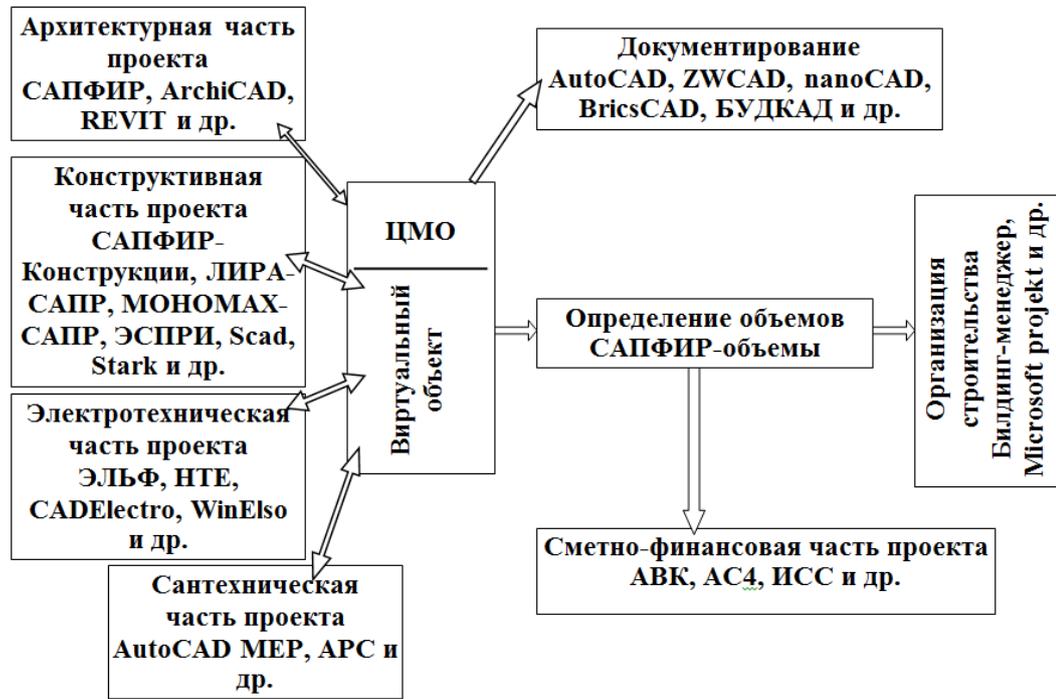


Рис. 2.4. Обобщенная схема интегрирования на основе ЦМО

Процесс проектирования зданий и сооружений в последние несколько десятилетий остается неизменным. Он базируется на последовательно-параллельной итерационной работе многих специалистов в различных областях строительства. Первым этапом проектирования зданий и сооружений является выбор земельного участка для застройки. При этом происходит геологическая разведка грунта, для определения характеристик и правильного выбора фундамента. Также изучается сейсмологическая активность, преобладающее направление и сила ветра, максимальная глубина промерзания почвы, толщина снежного покрова, максимальные и минимальные сезонные температуры и другие климатические условия, которые необходимо будет учесть инженеру-проектировщику при возведении сооружения. Сейчас этот этап проектирования довольно неплохо автоматизирован, поскольку по каждому региону существуют справочники с перечнем всех необходимых статистических данных. Параллельно с первым этапом проектирования может проводиться второй этап - архитектурная планировка здания. На этом этапе архитектор создает архитектурную модель объекта. Этот этап проектирования автоматизирован различными архитектурными программными комплексами и постоянно

совершенствуется. Существует целый набор программных средств автоматизации этого этапа проектирования, о которых речь пойдет далее.

Третьим этапом проектирования является конструирование – создание расчетной схемы; расчет напряженно-деформируемого состояния объекта на основе полученной архитектурной модели и данных о местности строительства, назначении объекта, нагрузок, действующих на объект; разработка рабочих чертежей (КЖ, КМ, КМД и т.д.). На этом этапе проектирования инженер-проектировщик создает компьютерную модель здания, в которой определены несущие конструктивные элементы, производит прочностной расчет здания с учетом заданных нагрузок и внешних воздействий. Этот этап проектирования достаточно хорошо автоматизирован и постоянно совершенствуется. Следующим, четвертым этапом, является проектирование инженерных сетей – сантехнических сетей (отопления, водоснабжения, канализации, вентиляции, газоснабжения) и электротехнических сетей (расчет и расстановка электроприборов). Инженер-сантехник получает данные о помещениях здания, их назначении, тепло- и звукоизоляционные характеристики окружающих стен. Исходя из этих данных выполняется расчет необходимого количества элементов отопления и вентиляции и выполняется проектирование сантехнических сетей и расстановка различных сантехнических приборов (кондиционеры, элементы отопления, газовые котлы и др.). Для автоматизированного проектирования сантехнических сетей используются специализированные программные комплексы. Инженер-электротехник получает данные о составе помещений здания, технологическое оборудование, характеристики помещения (назначение, среда помещения, материалы поверхностей и т. д.). Производится расчет необходимых мощностей поставщиков электроэнергии, производится подбор проводников и их прокладки. Также определяется необходимость установки дополнительных устройств (распределительные щиты, шкафы, рубильники, предохранители и т. д.). Этап проектирования электротехнических сетей также автоматизирован и проводится в специализированных программных комплексах. Пятым, этапом проектирования объекта строительства является подсчет сметной стоимости строительства. На этом этапе инженер создает различные сметы для подсчета стоимости строительства. В сметах учитывается объем всех работ, которые необходимо выполнить, определяется перечень всех необходимых материалов, машин, механизмов и оборудования.

Определяются размеры всех необходимых сборов, платежей и отчислений и получается конечная сумма стоимости строительства. Этап составления и подсчета строительных смет автоматизирован довольно широко. Существуют десятки программных комплексов, занимающихся расчетом строительных смет в странах СНГ, но практически отсутствуют программные комплексы, позволяющие правильно посчитать объемы работ в позициях смет.

Хотя процесс проектирования заканчивается после выдачи сметной документации, непосредственное выполнение работ еще не начинается. Перед этим есть еще очень важный этап, связанный с процессом управления строительством. Этот этап - календарное планирование строительства. На этом этапе выполняется разбиение объекта строительства на «захватки» и создаются графики выполнения работ. Это могут быть линейные графики, циклограммы или сетевые графики. Для выполнения этого этапа необходимо иметь информацию о работах, которые должны выполняться на объекте. В результате календарного планирования устанавливается протяженность строительства во времени. Существует несколько программных комплексов (MS Project, Spider, Building Manager и др.), позволяющих автоматизировать процесс календарного планирования и управления строительством, включающих также планирование авторского надзора.

Как видно из описанного выше, в процессе проектирования зданий и сооружений задействовано много специалистов. Причем каждый из них использует специализированный программный комплекс для выполнения своей части проекта, но при этом почти каждый из них зависит от результатов работы своего коллеги на предыдущем этапе. На рис. 2.5 приводится схематическая последовательность этапов проектирования зданий и сооружений.

Программные средства, поддерживающие ЦМО, должны иметь открытые форматы. Это необходимо и при создании ЦМО, и для дальнейшего применения ЦМО в процессе проектирования. При создании ЦМО любое существующее или вновь созданное программное средство (САПФИР, ArchiCAD, REVIT, AllPlan и др.) может принимать участие в формировании ЦМО, и в дальнейшем быстром и удобном извлечении необходимой информации из ЦМО (подсчет объемов, составление смет, документирование). Для реализации идей открытости необходим единый

стандарт ЦМО. Такой подход, с одной стороны, обеспечивает принцип демократичности, так как позволяет коллективам проектировщиков применять эту технологию используя привычные для них программные средства, не ломая традиций, с другой стороны, по сути, новая технология использует уже накопившийся богатый опыт автоматизированного проектирования и имеющиеся программные средства. Уже сейчас считается хорошим тоном, если программное средство имеет многочисленные конверторы.

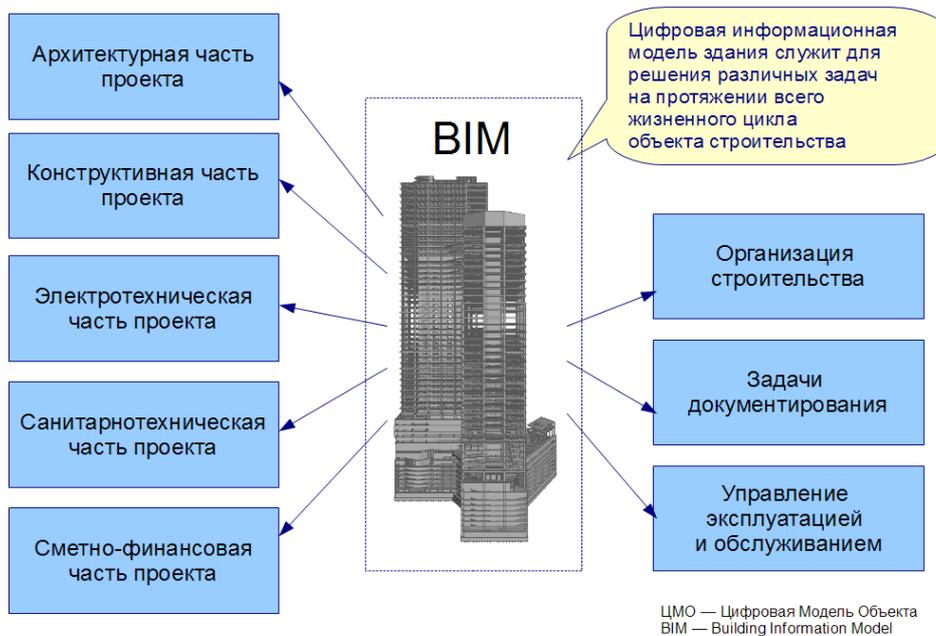


Рис. 2.5. Схема интеграции этапов проектирования строительного объекта

На рис. 2.6 представлена информационная связь ПК ЛИРА-САПР с другими программами на основе конверторов.

Компьютерное моделирование на основе информационной модели безусловно является новым этапом развития компьютерных технологий в архитектурно-строительном проектировании, так как, помимо интеграции разнородных по проблематике программ, исключает избыточность, повторный ввод, потерю данных при передаче и преобразовании.

Возможная ориентация на создание новой технологии ни в коем случае не отрицает, а даже способствует дальнейшему наращиванию функциональных возможностей уже имеющихся программных средств. Эти работы проводятся по различным направлениям – совершенствование пользовательского интерфейса, интеллектуализация программ, реализация современных методов трехмерного моделирования, методов математической физики и строительной механики и др.

Примером совершенствования пользовательского интерфейса может служить программа нового поколения САПФИР–Конструкции. Программа САПФИР – Конструкции предназначена для синтеза различных схем на основе управляемой процедуры преобразования 3 D и 2 D архитектурных моделей, созданных в различных графических программах (САПФИР, ArchiCAD, REVIT, Allplan, AutoCAD и др.). Программа САПФИР – Конструкции включает библиотеку триангуляционных алгоритмов и набор инструментальных средств для корректировки конечно-элементных моделей. Нагрузки в виде сосредоточенных или распределенных по произвольным штампам сил (перемещений) задаются на произвольных поверхностях без привязки к конечно-элементной сетке. Имеется система диагностики правомерности созданной расчетной схемы.

Примером интеллектуализации программ могут служить некоторые процедуры программного комплекса МОНОМАХ–САПР. Наличие экспертной системы, которая информирует пользователя о правомерности принятых проектных решений, наличие процедуры автоматического построения эскизов рабочих чертежей свидетельствует о том, что программный комплекс МОНОМАХ–САПР автоматизируют этапы проектирования, являющиеся уделом интеллектуальной деятельности человека. Примером реализации современных методов математической физики и строительной механики могут служить реализации методов расчета конструкций в ПК ЛИРА–САПР.

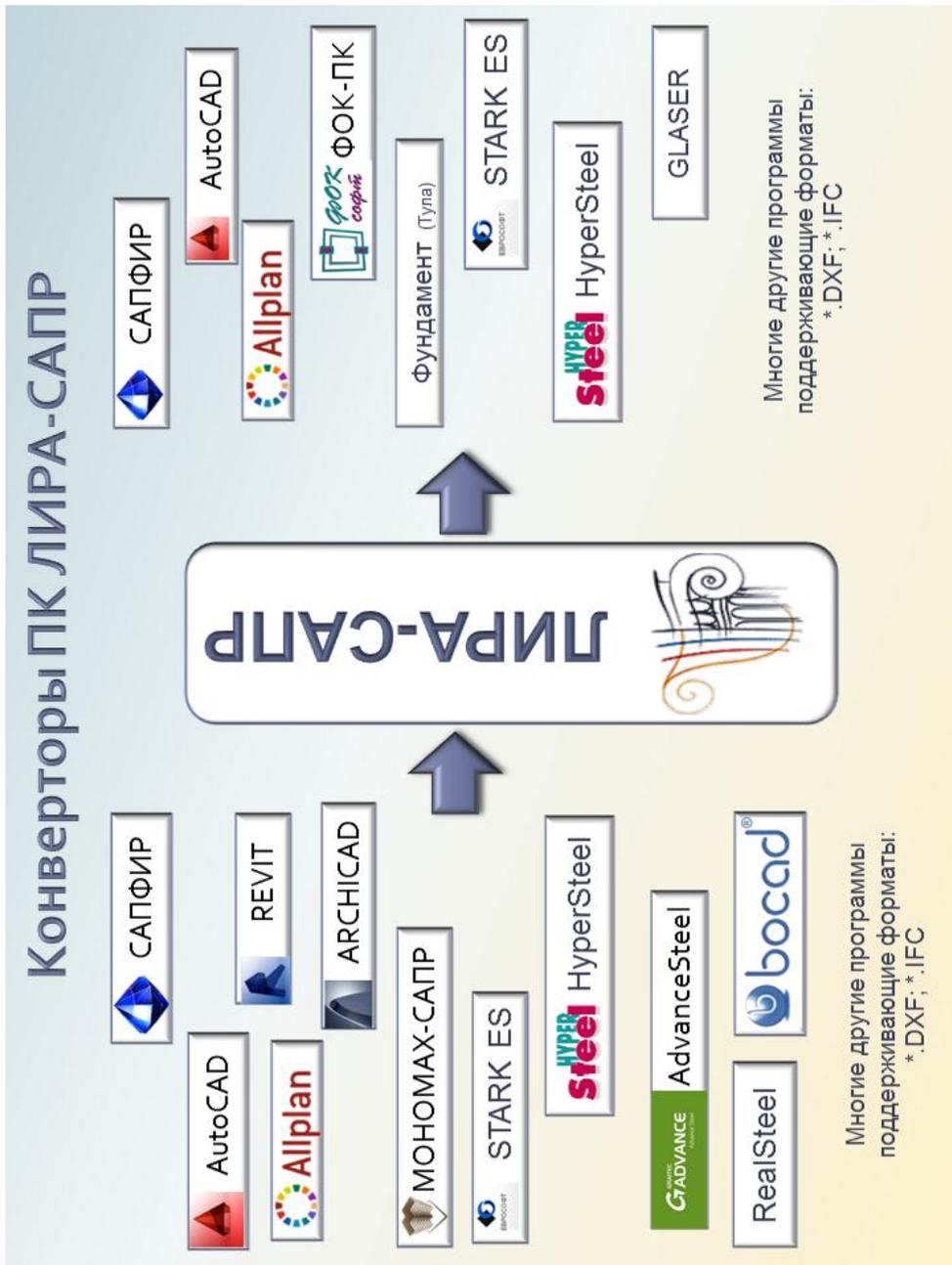


Рис. 2.6. Информационная связь ПК ЛИРА-САПР с другими программами на основе конверторов

## 2.5. Концепция информационной модели объекта строительства

В свете современных тенденций развития информационных технологий и программных комплексов разработана новая концепция проектирования программного и информационного обеспечений, получившая название виртуального объекта строительства или информационной модели объекта строительства.

Концепция виртуального объекта строительства заключается в создании единой взаимосвязанной системы управления всеми инженерными системами объекта строительства, которая обеспечивает комфортную и безопасную среду обитания внутри здания, с обязательной минимизацией расходов на поддержание этой среды. Таким образом, виртуальный объект строительства – это виртуальное отображение здания или комплекса зданий в натуре. В проектировании, строительстве и эксплуатации виртуальный объект используется для управления всем жизненным циклом здания и его подсистемами как единым целым на основе современных технологий.

### **Основные черты информационной модели:**

- ✓ концепция единого файла: полная модель здания и все его виды включены в файл виртуального здания;
- ✓ для моделирования используются реальные архитектурные элементы;
- ✓ изменение модели влияет на все чертежи (и наоборот);
- ✓ автоматическое создание и обновление документации;
- ✓ обширные архитектурные библиотеки;
- ✓ вся информация о здании параметрически взаимоувязана со всеми элементами;
- ✓ дополнительные возможности визуализации (рендеринг, анимация, освещенность);
- ✓ автоматическое составление ведомостей расхода материалов, графиков;
- ✓ взаимосвязь с расчетными программами, а также программами по расчету инсоляции, электросилового оборудования и др.
- ✓ автоматическая координация чертежей.

На рис.2.7 представлена схема функционирования САПР на базе информационной модели здания.



Рис.2.7. Схема функционирования САПР на базе информационной модели

Концепция информационной модели (BIM-модели) имеет два главных преимущества перед так называемыми САД-технологиями, использовавшимися ранее.

- ✓ Модели и объекты – это не просто графические объекты, это информация, позволяющая автоматически создавать чертежи и отчёты, выполнять анализ проекта, моделировать график выполнения работ, производить эксплуатацию объектов и т. д. Наличие такой информации предоставляет коллективу строителей неограниченные возможности для принятия наилучшего решения с учётом всех имеющихся данных;
- ✓ Различные системы проектирования могут эффективно и совместно использовать информацию на протяжении всего жизненного цикла здания, что исключает избыточность, повторный ввод и потерю данных, ошибки при их передаче и преобразовании.

Построение BIM модели выполняется из специфических прикладных элементов, адекватных соответствующим элементам реальной конструкции архитектурного объекта. Эти элементы корректно отображаются во всех видах в соответствии с местными архитектурными стандартами. Более того,

неграфическая информация может быть внесена в модели элементов здания, а затем извлекаться и использоваться как основа для различных расчетов.

Информация, хранящаяся в BIM-модели, доступна во многих форматах файлов для внешних приложений, в том числе для программных комплексов, выполняющих прочностной расчет, расчет и расстановку электросилового оборудования, сантехнического оборудования. IFC-формат является стандартной универсальной основой, которая позволяет осуществлять обмен информацией и взаимодействие на всех этапах жизненного цикла здания.

Модель BIM, импортируемая во внешние программы, позволяет проводить широкий спектр аналитических действий, включая прочностной расчет, анализ энергоэффективности, и позволяет осуществлять контроль обнаружения коллизий. Координация с другими этапами проекта (прочностной расчет, вентиляция и отопление, электрика и др.) помогает свести к минимуму риск возникновения ошибок.

Достигнуть необходимого уровня безопасности зданий и сооружений невозможно, если не учитывать в рамках данной концепции напряженно-деформированное состояние несущих конструкций. Поэтому необходимо создание информационной модели несущей системы здания, учитывающей напряженно-деформированное состояние на любой стадии жизненного цикла объекта строительства. Эффективность использования информационной модели для решения возникающих задач прямо пропорциональна адекватности такой модели, адекватность достигается применением конкретных математических моделей. В связи с этим несущую систему здания необходимо рассматривать не только в период эксплуатации, но и учитывать процесс формирования конечных внутренних усилий, возникающих в конструктивных элементах. Это становится возможным при рассмотрении здания с момента проектирования до момента утилизации, т.е. на протяжении всего жизненного цикла.

## **2.6. Концепция аналитической модели**

Как уже говорилось, отечественным инструментом создания информационной модели является программный комплекс САПФИР. Информационная поддержка процессов жизненного цикла объектов

строительства обеспечивается именно на основе программного комплекса САПФИР, так как описания многих составных частей, как процесса проектирования, так и конструктивных элементов объекта строительства, запроектированного ранее, хранятся в унифицированных форматах данных, доступных любому пользователю интегрированной технологии. Технология организована таким образом, чтобы существенно облегчить решение проблем вариантного проектирования, интеграции программного обеспечения, информационного сопровождения строительного объекта в меняющихся условиях эксплуатации, приспособляемость к специализации проектных организаций и т. п. Построение открытой распределённой автоматизированной системы для проектирования и управления в строительстве составляет основу CALS-технологии, применяемой при создании платформы САПФИР. Главная методика построения информационной модели – обеспечение единообразного описания и интерпретации данных, независимо от места и времени их получения в общей системе. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки её представления стандартизированы. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и строительства.

На стадии разработки проекта архитектор должен помнить о том, что модель затем поступит к инженеру-проектировщику. Например, архитектор может задать конструктивное назначение строительному элементу; задать первоначальные материалы, которые необходимо использовать; выбрать колонны и балки стандартного профиля; задать основную несущую часть для составных элементов. В дополнение, он может отфильтровать модель для того, чтобы сузить информацию для обмена: при этом, будет экспортирована только конструктивная схема, содержащая только конструктивные элементы (аналитическая модель). Естественно, что архитектор может экспортировать полную архитектурную модель, если программа инженера-проектировщика имеет возможность отфильтровать и выбрать данные модели, с которыми ему придется работать. Проект в системе САПФИР может содержать подготовительную информацию для конструирования, представленную одной или несколькими вариантами

аналитических моделей конструкции здания или сооружения. Архитектурная модель проекта может быть импортирована из другой архитектурной программы, поддерживающей IFC-формат. В среде ПК САПФИР возможно доработать модель, устранить ошибки и неточности, скорректировать пересечения и нестыковки конструктивных элементов. Эффективность таких правок обеспечивается благодаря концепции дуального представления модели: архитектурная и аналитическая модель конструкции.

Обобщенно схема работы инженера-проектировщика показана на рис. 2.8 [62].

При выполнении архитектурно-конструкторских работ обычно требуется несколько раз согласовывать информацию и обмениваться моделью при согласовании информации. Например, в зависимости от результатов расчета на прочность и расчетных предположений, проектировщик может предложить изменения в размере (толщина, высота, профиль и т.п.) и в расположении конструктивных элементов. В программном комплексе САПФИР существует возможность автоматически определить и управлять такими геометрическими изменениями. При внесении изменений в расчетном программном комплексе (ЛИРА-САПР, МОНОМАХ-САПР) модель экспортируется в САПФИР и дорабатывается.

Аналитическая модель служит основой для построения расчетной схемы, используемой расчетным комплексом ЛИРА-САПР для прочностного расчёта и анализа напряжённо-деформированного состояния.

Акцентируем внимание на том факте, что архитектурная и конструктивная части проекта неразрывно и тесно взаимосвязаны. Архитектурная часть обеспечивает функциональность объекта, а конструктивная – надежность и прочность. Аналитическая модель представляет собой визуально упрощённую и геометрически идеализированную модель конструкции, в которой колонны и балки представлены одномерными стержнями, а стены и плиты перекрытий представлены двумерными пластинами. При использовании многослойных ограждающих конструкций пластины формируются с учётом положения несущего слоя.

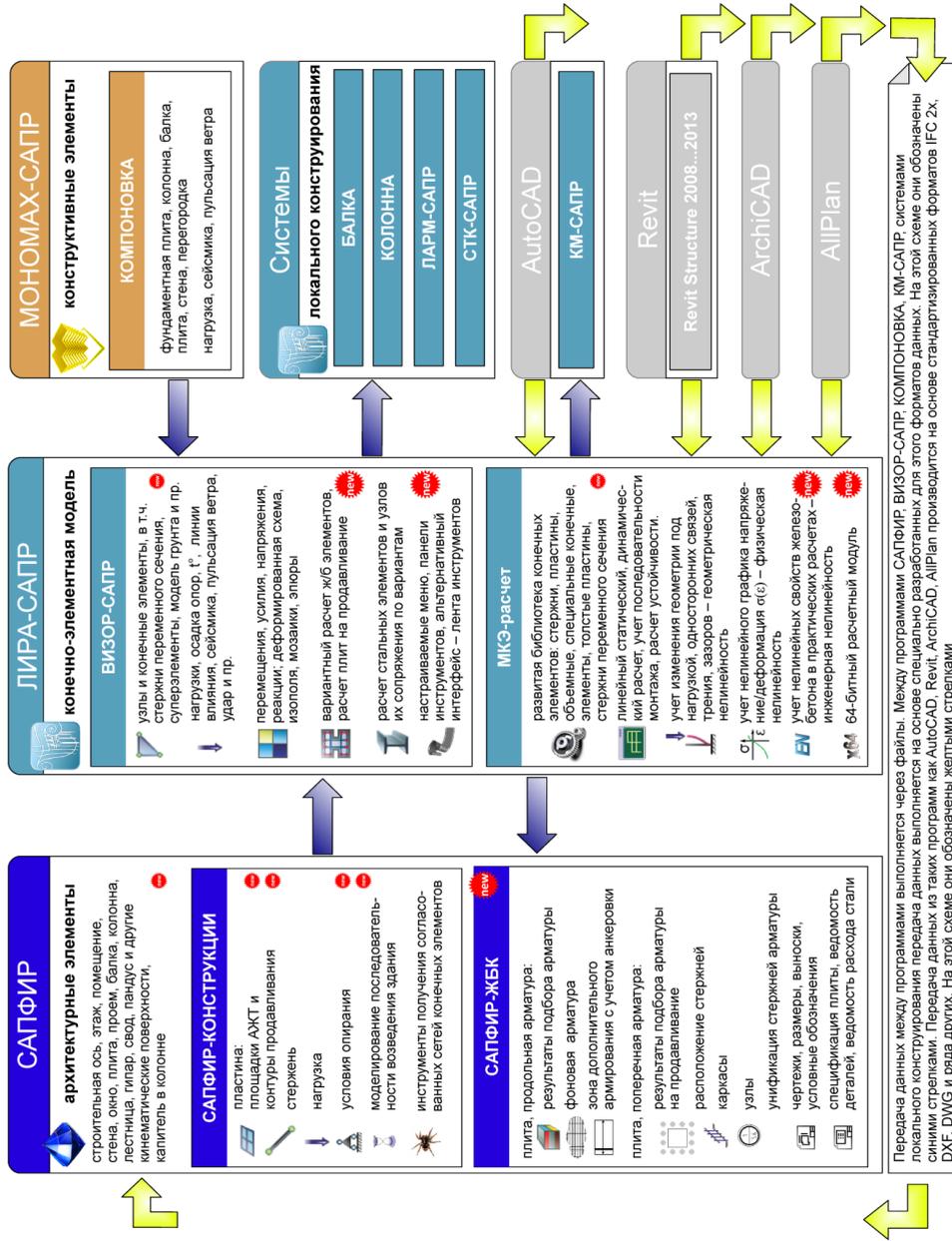


Рис.2.8 Обобщенная схема автоматизированного выполнения архитектурно-конструкторских работ

В аналитической модели присутствуют только несущие элементы здания (рис. 2.9). Другие элементы либо заменяются нагрузками, либо игнорируются.

Инструменты управления изменениями дают возможность:

- ✓ сравнить две последующие версии конструктивной/аналитической модели (IFC файлы);
- ✓ определить различия между этими двумя версиями (новые, удаленные и измененные элементы);
- ✓ вставить изменения в текущую модель или в пустой файл проекта;
- ✓ представить список изменений.

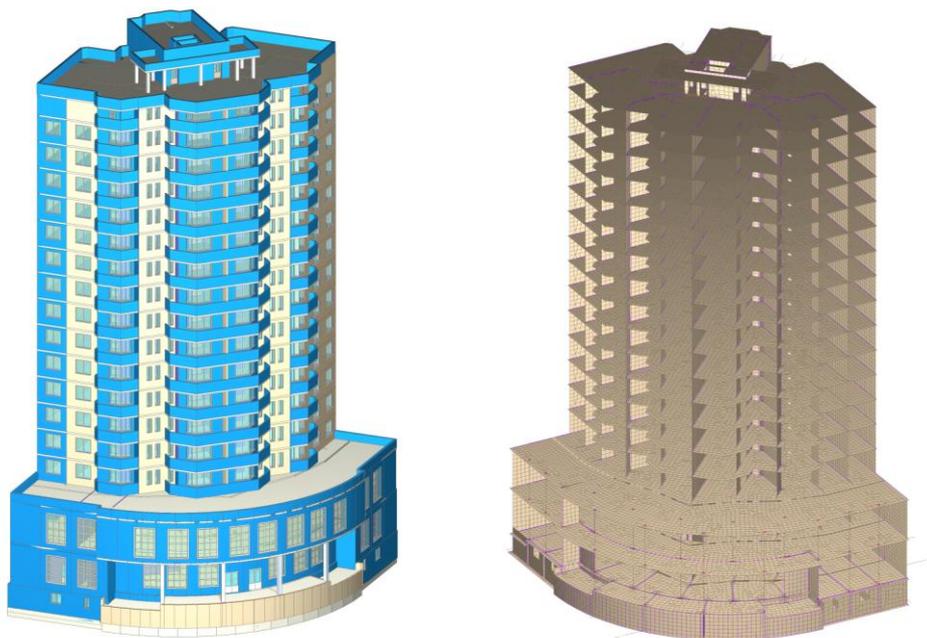


Рис. 2.9. Представление архитектурной и аналитической моделей здания

Трёхмерная модель здания, либо другого строительного объекта, связана с информационной базой данных, в которой каждому элементу модели можно присваивать дополнительные атрибуты. Особенность такого подхода заключается в том, что модель сопровождает строительный объект в течение всего жизненного цикла, изменяясь, дополняясь и объединяясь. Таким образом, модель, описывающая текущее состояние здания

(разумеется, с историей изменений), является своеобразным «виртуальным» зданием.

Параметрическая модель здания, создаваемая ПК САПФИР, облегчает задачу выполнения последующих прочностных расчетов, так как содержит все данные, необходимые для этого. При построении модели в ПК САПФИР используются материалы с реальными физико-механическими свойствами (для прочностного расчёта), с реальными текстурами (для визуализации) (рис. 2.10), и они могут использоваться при расчётах физических объёмов работ при переходе к составлению смет. Детальная и надежная модель позволяет выявить все ошибки и неточности уже на ранних стадиях проектирования.

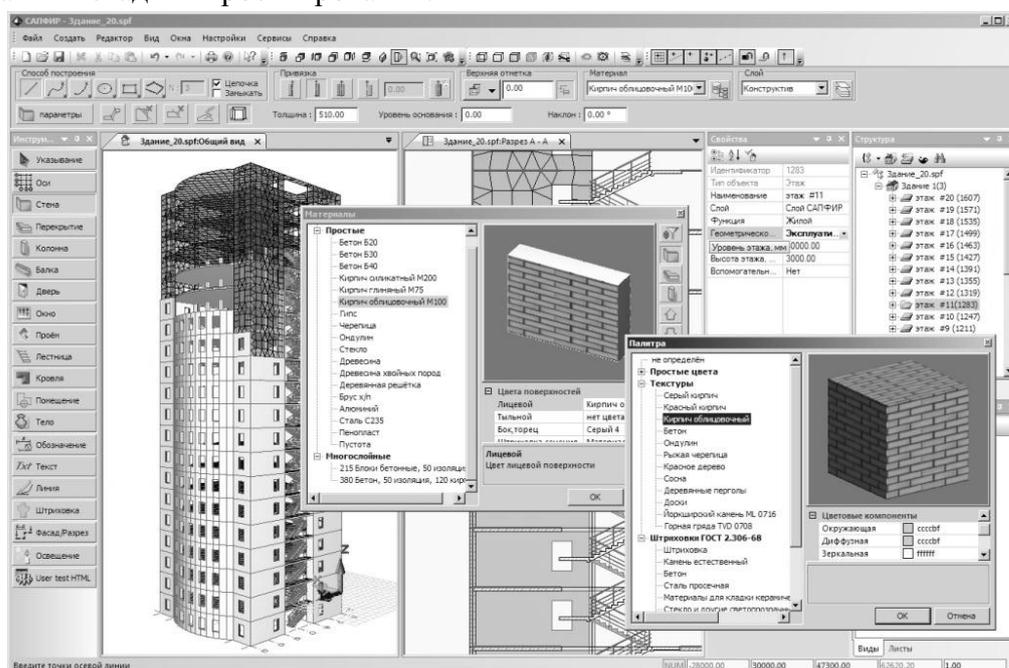


Рис. 2.10. Настройка свойств параметрических материалов

Проектировщик может в любой момент преобразовать отдельные грани формообразующих элементов в такие компоненты модели, как стены, крыши, перекрытия, стеновые ограждения и т.д. Хотя эти компоненты модели в общем случае не повторяют расположение граней, ПК САПФИР устанавливает связь между геометрией концептуальной модели и строительными компонентами, которые из нее формируются. Таким

образом, изменения концептуальной модели могут переходить в детальную проектную модель и в рабочую документацию.

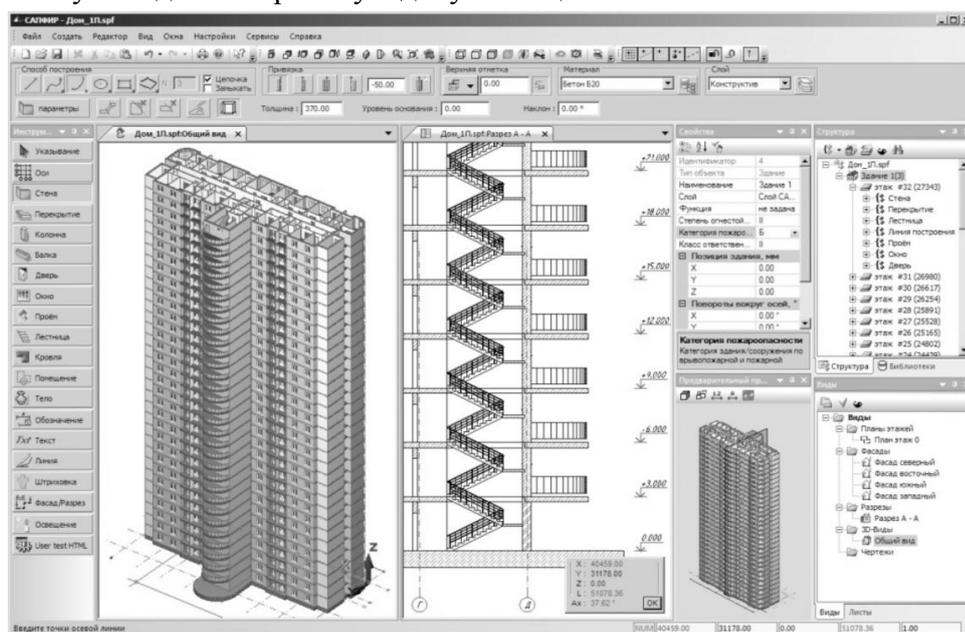


Рис. 2.11. Архитектурная модель

Одним из наиболее важных моментов в функционировании BIM-технологий является тесная информационная взаимосвязь между архитектурной и аналитической моделями. Архитектурная модель содержит все основные элементы, определяющие эксплуатационные качества и технологию функционирования объекта: назначение и взаиморасположение помещений, стены, колонны, балки, окна, двери, лестницы и др. (см. рис. 2.11). Аналитическая модель включает только конструктивные элементы: несущие стены, колонны, пилоны, балки, плиты перекрытий, фундаментные плиты, т.е. элементы, которые отвечают за прочность и устойчивость сооружения (рис. 2.12, 2.13).

BIM-модель представляет собой полную информационную базу данных. Вся необходимая информация по конструктивным элементам, их параметрам, помещениям, этажам, захваткам, объемам, количеству элементов, планам и другим типам данных может быть получена из модели. Элементы BIM модели указаны в документации под своими уникальными идентификаторами.

Нередко архитектор в связи с различным назначением верхних и нижних этажей здания (например, нижние этажи – паркинг, верхние этажи – гостиничный комплекс) вынужден прибегнуть к различному расположению вертикальных несущих конструкций на верхних и нижних этажах. В этом случае конструктор должен будет организовать переходную толстую плиту или пространственную систему из двух плит, связанную раскосами и стойками (рис. 2.14). Тогда архитектор организует в этом месте технический этаж и эту коллизию легко можно будет решить на основе тесной информационной взаимосвязи архитектурной и аналитической модели.

Такая информационная взаимосвязь не только определяет адекватное построение аналитической модели, но и в процессе проектирования помогает достичь компромисса между архитектором и конструктором.

Если конструктору понадобится введение дополнительной колонны или балки, то архитектор всегда на 3D модели может проверить возможность таких изменений с точки зрения эксплуатационных качеств объекта.

Наиболее распространенные задачи, решаемые ПК САПФИР, представлены ниже:

- 1). архитектурное проектирование новых объектов строительства;
- 2) информационное моделирование зданий и сооружений на основании уже имеющейся проектной документации:
  - а) в электронной форме в виде трёхмерной геометрической модели,
  - б) в электронной форме в виде плоской модели в векторном виде,
  - в) в электронной форме в растровом формате,
  - г) в форме твёрдых копий (бумажные чертежи и эскизы, прочее);
  - д) информационная поддержка объекта строительства на всех этапах его жизненного цикла (от проекта до утилизации);
  - е) адаптация информационных моделей, в том числе, созданных с помощью других программ, к использованию для прочностного анализа.

Одной из основных функций программы САПФИР является подготовка пространственной архитектурной модели объекта строительства для прочностных расчётов и анализа напряжённо-деформированного состояния конструкции. В основе теоретических предпосылок разработки программы САПФИР лежит концепция дуального представления модели.

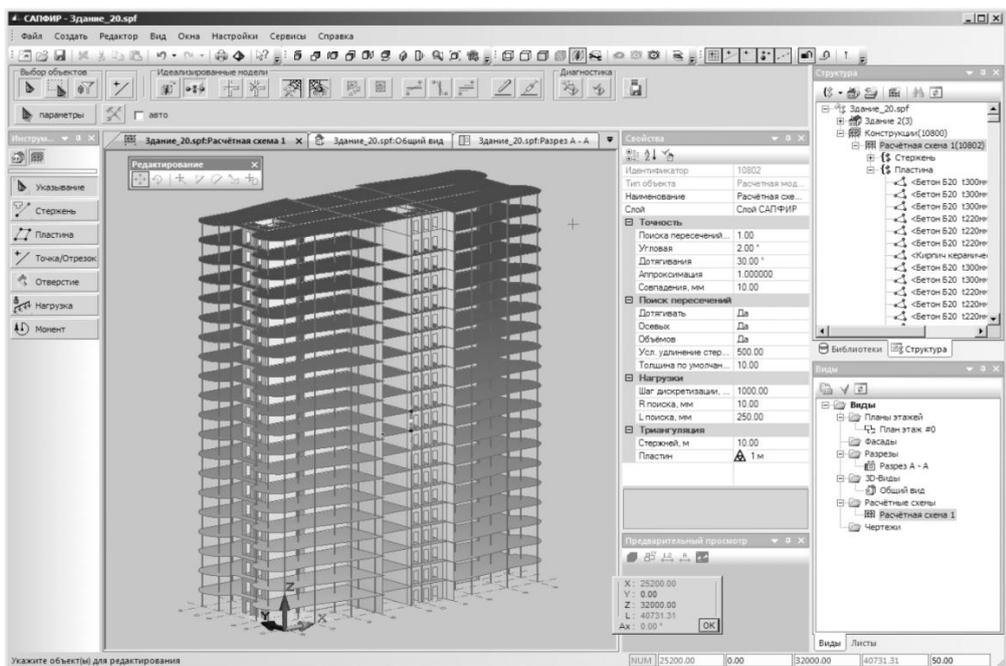


Рис. 2.12. Аналитическая модель

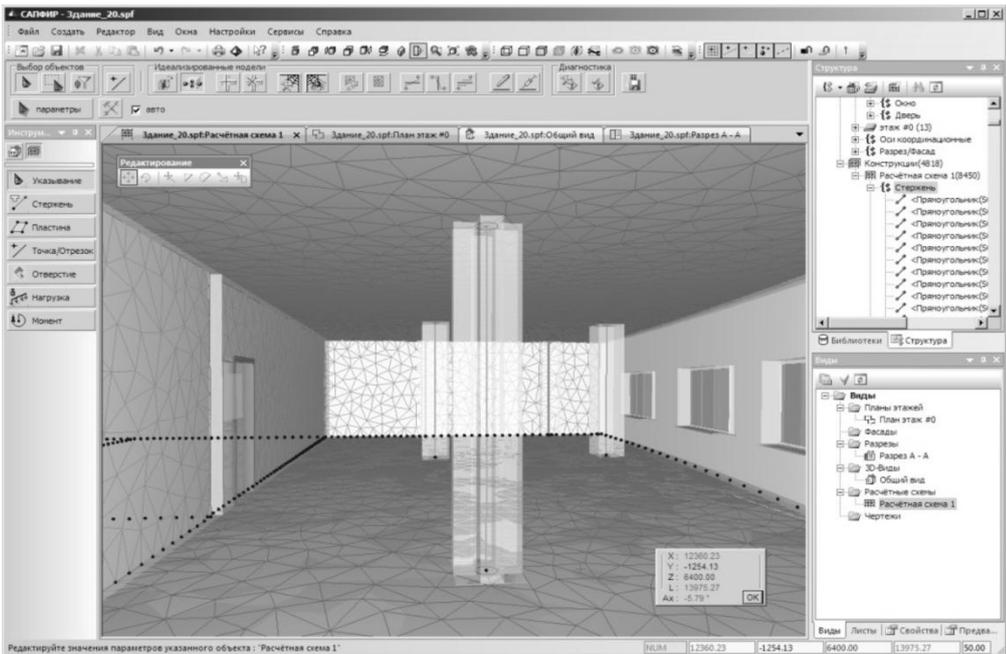


Рис.2.13. Визуализация фрагмента аналитической модели совместно с архитектурной

Это значит, что параллельно с архитектурной моделью на программном уровне поддерживается аналитическое представление каждого конструктивного элемента. Из аналитических моделей отдельных элементов с учётом их взаимодействия формируется аналитическая модель здания в целом.

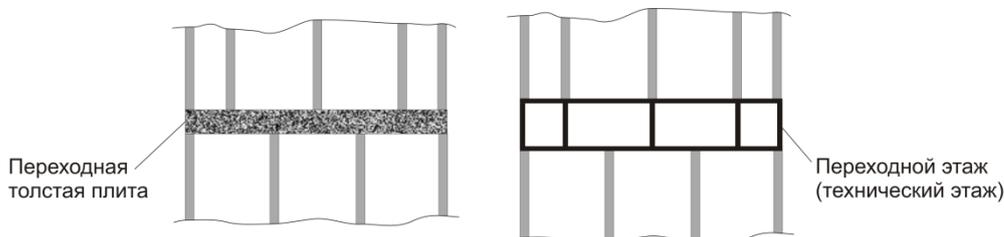


Рис. 2.14 Пространственная схема расположения вертикальных несущих элементов

### 2.6.1. Методы организации обмена данными между программными комплексами

На рис. 2.15 представлена обобщенная схема преобразования архитектурной модели в расчетную схему.



Рис. 2.15. Обобщенная схема преобразования архитектурной модели в расчетную схему

Существует две цели построения аналитической модели:

- ✓ извлечение из архитектурной модели максимальной информации необходимой для дальнейшего расчета;
- ✓ представление этой информации в виде, приемлемом для дальнейшего применения ее в расчетных программных комплексах.

Информация, необходимая для расчета на прочность и устойчивость, которая извлекается из архитектурной модели:

- ✓ места расположения и сечения несущих элементов: колонн, пилонов, балок, несущих стен, плит перекрытий, фундаментных плит. Сечения колонн, пилонов и балок архитектор может задавать в

- архитектурной модели. Интеллектуальные программы типа САПФИР умеют распознавать сечения автоматически;
- ✓ топология несущих элементов – расстояния между стенами, колоннами, балками. Местонахождение и размеры оконных, дверных проемов и технологических проемов в перекрытиях. Информация о проемах в несущих стенах и перекрытиях необходима для определения их жесткости и прочности, а о проемах в ненесущих ограждающих стенах и перегородках необходима для определения нагрузок от собственного веса;
  - ✓ характеристика (назначение) помещений для определения величин полезных нагрузок на соответствующие участки перекрытий;
  - ✓ конструкции ограждающих наружных стен, перегородок, полов, лестничных клеток, что необходимо для определения нагрузок от собственного веса этих элементов.

Подготовка аналитической модели включает также определение нагрузок (величины и контуры площадок) от собственного веса конструкций полов, перегородок, ограждения стен и полезных нагрузок [148].

Проект, разрабатываемый в программе САПФИР, может содержать конструкторскую часть, представленную одной или несколькими вариантами аналитических моделей конструкции здания или сооружения.

Последовательность работ по подготовке расчетной схемы здания в САПФИР–КОНСТРУКЦИИ представлена на рис. 2.16.

Можно использовать два метода подготовки расчетной схемы. Первый метод – это подготовка расчетной схемы из так называемой «подложки» – плоского чертежа из \*.dxf - файла «AutoCAD», или обычного рисунка \*.jpg, \*.png, \*.bmp. Такую подложку легко «поднимать», то есть выстраивать на ней стены плиты, колонны, балки. Второй метод - доработка трехмерной модели из \*.ifc - файла «REVIT» или «ArchiCAD». При этом архитектурные элементы, не «поднимаются», а преобразуются к черновой расчетной схеме с помощью инструментов распознавания формы объектов, а затем, методами дотягивания и выравнивания доводятся до необходимого представления в расчетной схеме. Распознавание формы объектов позволяет из произвольных линий, тел или поверхностей получать элементы аналитической модели: стержни и пластины.

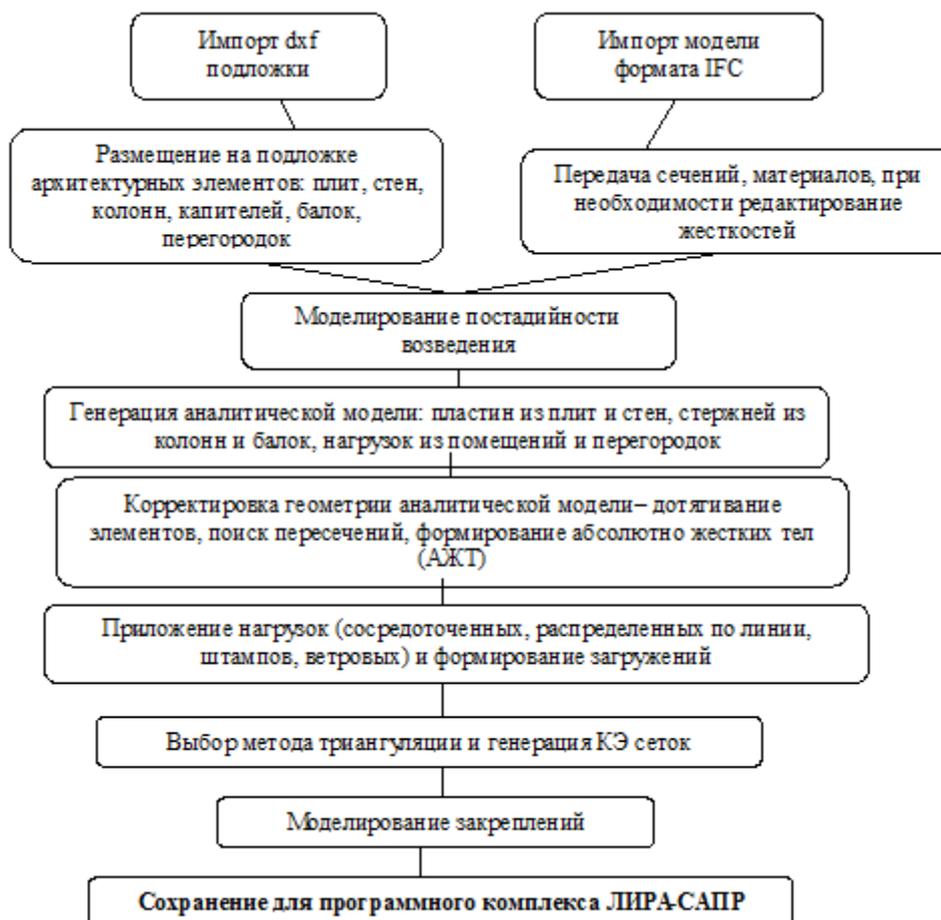


Рис. 2.16 Подготовка расчетной схемы в САПФИР-КОНСТРУКЦИИ

Наличие «подложки» или трехмерной модели ни в коем случае не является обязательным, можно начинать строить модель здания в ПК САПФИР с чистого листа. Но поскольку работа конструктора, как правило, начинается, когда архитектура здания уже определена, и ее использование весьма удобно при построении модели конструкций, первым звеном последовательности мы обозначим импорт такой плоской или трехмерной подложки.

Следующий шаг – создание модели здания из архитектурных элементов, которые для удобства можно разнести по разным этажам. Архитектурную модель можно создавать из следующих объектов: строительная ось, стена, плита перекрытия, колонна, балка, разнообразные

лестницы и крыши, а также различные поверхности, образованные движением линии по образующей: пандус, свод, купол, цилиндр, конус седло и т.д. Колонна может иметь капитель разной формы, а плита – отверстия и вставки отличной от основной толщины.

Таким образом, существует два основных варианта передачи данных из ПК САПФИР в расчётные комплексы.

**Первый вариант.** Как правило, применяется, если конструктивная схема здания достаточно сложная, модель здания была получена из другой моделирующей программы или из «подложки». В этом случае аналитическая модель может требовать доработки до её передачи в программу прочностного расчета.

**Второй вариант.** Архитектурная модель здания создается средствами ПК САПФИР. Аналитическая модель проектируемого объекта на любом этапе проектирования может быть экспортирована в программный комплекс ЛИРА–САПР. Для доработки аналитической модели конструкции здания или сооружения перед передачей ее в прочностной расчет предназначена специальная подсистема САПФИР–КОНСТРУКЦИИ. Эта подсистема позволяет редактировать аналитическую модель, создавая в ней дополнительные элементы и корректируя существующие элементы. Корректировка модели выполняется путем доведения конструктивных элементов и удаления наложений, при необходимости. Также в рамках подсистемы САПФИР–КОНСТРУКЦИИ выполняется триангуляция в соответствии с заданными параметрами, создаются нагрузки, абсолютно жесткие тела (АЖТ), сложные условия опирания и т. д. Таким образом, подсистема САПФИР–КОНСТРУКЦИИ позволяет подготовить полную и готовую к прочностному расчету модель здания или сооружения. Во время редактирования аналитической модели архитектурная часть проекта остается неизменной, в каждый момент времени, позволяя сверить расположение элементов аналитической модели с расположением архитектурных элементов. Можно выполнить проверку модели на корректность по целому ряду параметров с выдачей диагностических сообщений об ошибках и некорректностях.

Созданная аналитическая модель служит только основой для построения расчетной схемы. В аналитической модели невозможно и не нужно задавать специфические граничные условия, такие как жесткие узлы,

шарнирные узлы, платформенные стыки и др., в аналитической модели отсутствует необходимая информация для подготовки расчета на сейсмические и ветровые воздействия, организацию нелинейного расчета возможно осуществить только на конечно-элементной модели и мн. др. Однако, имеется явная тенденция к максимальному приближению аналитической модели к расчетной схеме.

В настоящее время аналитическая модель решает два очень важных вопроса:

- ✓ во-первых, обеспечивается адекватная связь архитектурной и расчетной модели с развитой визуальной и содержательной диагностикой. Так на рис. 2.17 показан фрагмент аналитической модели с конечно-элементной сеткой, отображенной на архитектурной модели, как на подложке; на рис. 2.17 показаны результаты диагностики автоматически созданной конечно-элементной сетки. Инструмент диагностики целостности аналитической модели позволяет выявлять возможные коллизии, например, когда два объекта занимают один объем в пространстве; или нагрузки, для которых невозможно определить, к какой пластине или стержню аналитической модели они приложены.
- ✓ во-вторых, информация, подготовленная в аналитической модели, уже на данном этапе развития составляет примерно 60 – 70% необходимой полной информации для расчетной схемы и существует тенденция к развитию этой части.

Для рядовых типовых проектов обеспечивается полнофункциональность аналитической модели, т.е. аналитическая модель преобразуется в расчетную схему и передается в расчетный программный комплекс. При необходимости учета в проекте различных специальных случаев, таких как учет трения, проскальзывания, необходимость организации нелинейного расчета аналитическая модель передается в расчетный комплекс и дополняется средствами препроцессора расчетного программного комплекса.

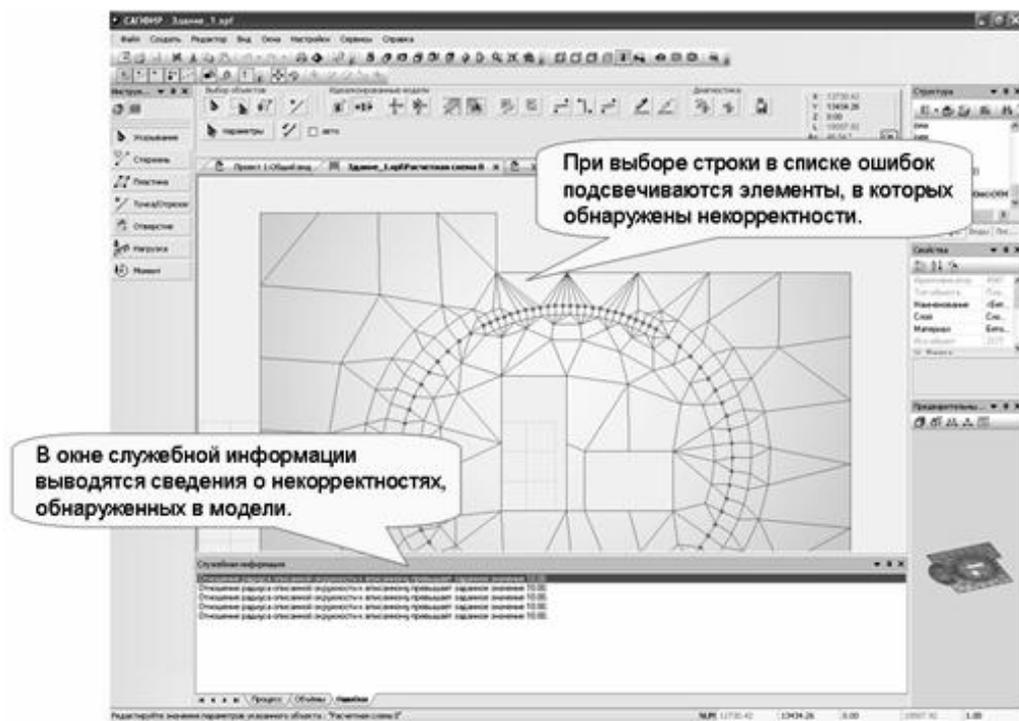


Рис. 2.17. Фрагмент отображения визуальной и текстовой диагностики о некорректностях модели

После доработки аналитической модели инструментами САПФИР–КОНСТРУКЦИИ, модель передается в расчетный программный комплекс ЛИРА–САПР. Первый вариант взаимодействия с расчетными комплексами также может осуществляться посредством экспорта в формате IFC (Industrial Foundation Classes). В файл IFC записываются модели несущих элементов конструкции: колонн, балок, плит перекрытия, стен. Этот формат позволяет передать модель, как в ПК ЛИРА–САПР, так и в другие программы для прочностных расчетов. Для простых строительных объектов такой метод передачи модели в программу для прочностного расчета является вполне приемлемым. Безусловно, всегда будет необходимо доработать аналитическую модель инструментарием ПК ЛИРА–САПР. Хотя объем этих доработок с каждой последующей версией будет уменьшаться. Вторым вариантом – передача модели с помощью созданного формата S2L (рис. 2.18).

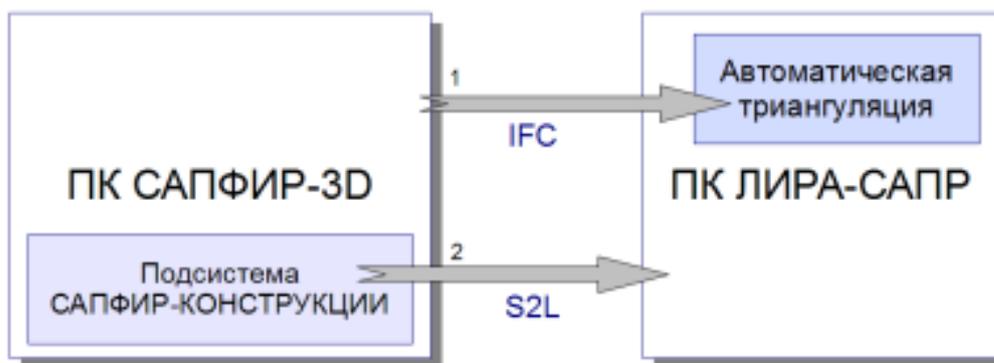


Рис. 2.18. Варианты передачи данных в расчётный комплекс ПК ЛИРА–САПР

Каждый из вариантов имеет свои преимущества, поэтому оба могут применяться в реальном проектировании, правда, на разных этапах.

Первый вариант наиболее прост и оперативен. Благодаря тому, что аналитическая модель всегда присутствует и автоматически корректируется параллельно с архитектурной моделью, можно перейти к прочностному расчёту на любом этапе проектирования, включая самые ранние. Это позволяет уже на начальных стадиях выявить прочностные тенденции конструкции проектируемого объекта. Этот вариант может оказаться вполне достаточным для простых конструкций либо для проверочного расчета, либо для работы на стадии «Проект».

Второй вариант предполагает несколько дополнительных этапов ручной доработки аналитической модели. При этом, аналитическая модель передается в ПК ЛИРА–САПР в полном объеме со всеми заданными параметрами, свойствами, характеристиками. На каждом из этих этапов проектировщику доступно для редактирования множество параметров, существенным образом влияющих на результаты. Этот вариант позволяет сформировать адекватную аналитическую модель для более сложных объектов и для тех объектов, архитектурные модели которых подготовлены со значительными погрешностями. Это относится к моделям, полученным путём импорта из архитектурных программ, не поддерживающих достаточно точной системы пространственных построений.

## 2.6.2. Методы, средства и инструменты создания аналитической модели

Подготовка аналитической модели включает ряд методов, средств и инструментов.

Метод «дотягивания» связан с тем, что в архитектурной модели все элементы трехмерные (рис. 2.19.а), а в аналитической модели, как правило, плиты и стены двумерны, а балки и колонны одномерны (рис. 2.19.б)

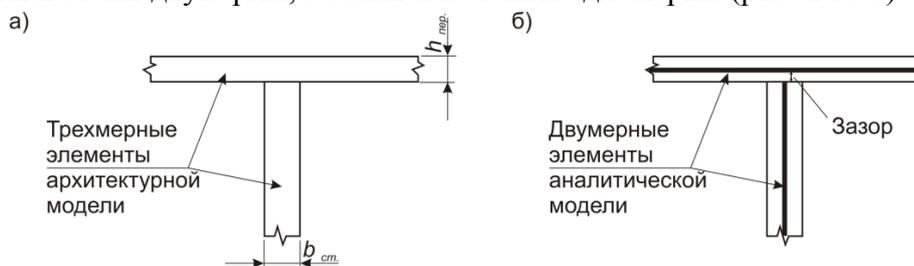


Рис. 2.19 Пример организации аналитической модели на стыке плиты и колонны

Метод «дотягивания» в автоматическом режиме устраняет зазоры, обуславливая линии пересечения конструктивных элементов. Так, на рис. 2.20 команда дотягивания удалила консольный край плиты, расширила дверной проем до угла, заменила ряд мелких отверстий одним большим. Дотягивание не является обязательной операцией и может быть пропущено, если в нем нет необходимости.

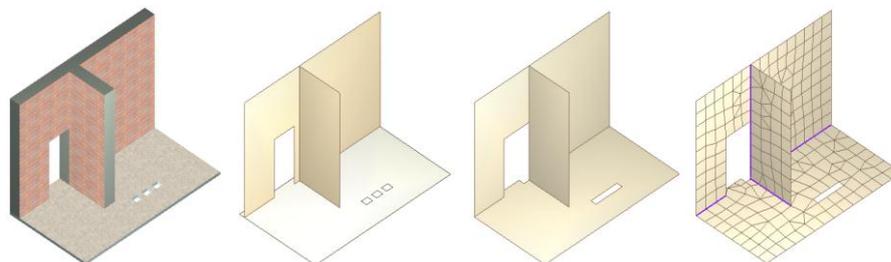


Рис. 2.20 Архитектурная модель → аналитическая модель → дотягивание → пересечение и создание МКЭ-сеток.

Метод «поиск пересечений» находит линии (стены с перекрытиями) и точки (колонны с перекрытиями) пересечения, создает общие узлы у пересекающихся элементов при генерации конечно-элементной сетки.

С использованием методов дотягивания контуров и пересечения элементов можно находить пересечения близких, но не пересекающихся элементов, и можно просто дотянуть один элемент до другого. Другими

словами, перед пересечением выполняется дотягивание, а линии пересечения находятся уже между дотянутыми объектами. Таким образом, можно в каждой конкретной ситуации выбирать: следует дотянуть элемент до опоры или оставить его как есть, чтобы учесть уменьшение пролета за счет ширины опоры.

Методы создания конечно-элементных сетей позволяют получить сети конечных элементов, состоящие из пластинчатых четырехугольных, треугольных конечных элементов и стержневых конечных элементов. При выполнении триангуляции модели, необходимо обеспечить согласованность конечно-элементных сеток для последующего корректного прочностного расчета. (рис. 2.21) Пользователь может управлять созданием конечно-элементных-сетей, выбирая метод их генерации, шаг триангуляции и создавая дополнительные точки и отрезки, в которых в обязательном порядке должны образоваться соответственно узлы и ребра конечно-элементной сети во время ее создания.

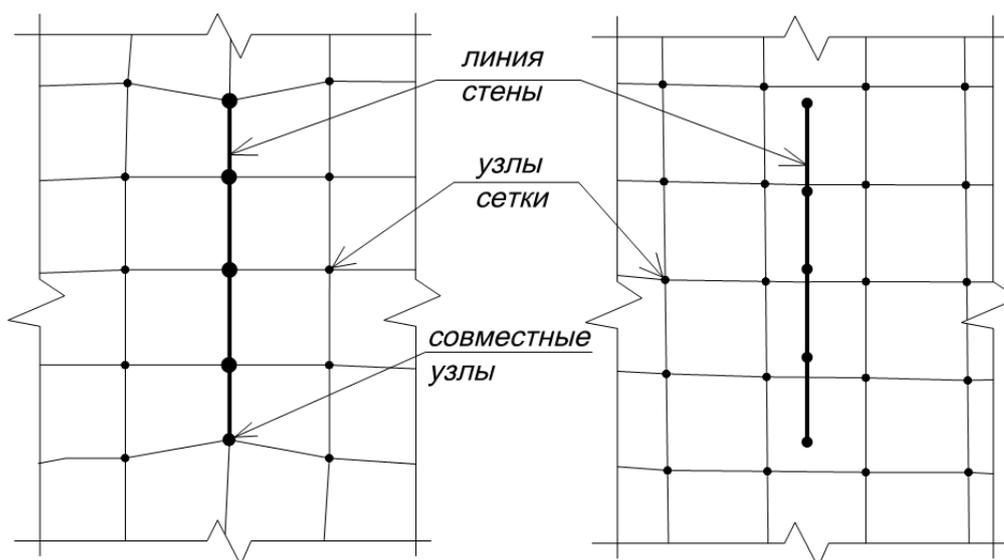


Рис. 2.21. Схема согласованности КЭ-сетки при триангуляции пересекающихся конструктивных элементов

- а) *правильная триангуляция, которая использует наличие определяющих линий;*
- б) *неправильная триангуляция, нет совместных узлов у стены и плиты*

На рис. 2.22 представлены варианты триангуляции при использовании различных генераторов конечно-элементных сеток.

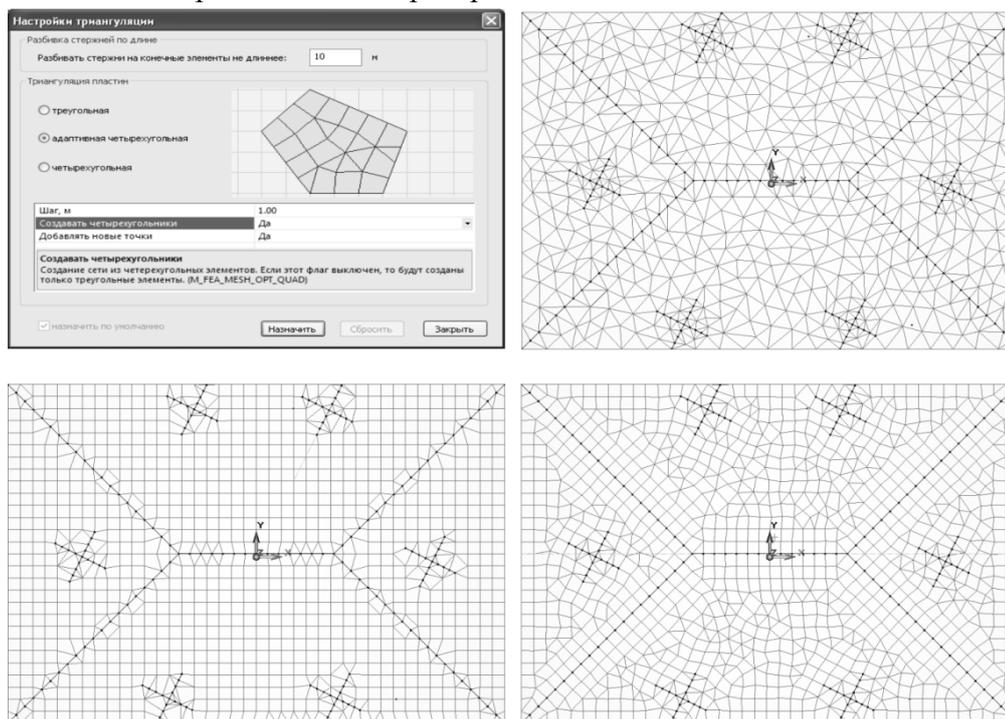


Рис. 2.22. Настройки триангуляции и результат генерации различных сеток:  
*треугольной, четырехугольной – слева и  
 адаптивной четырехугольной – справа*

Основным параметром генерации сеток пластин является **Шаг**, который определяет, максимальную длину ребра треугольника или четырехугольника сетки. Для генерации стержневых конечных элементов предусмотрен только один параметр: **Разбивка стержней по длине**, определяющей максимальную длину конечных элементов, на которые разбивается стержень.

Каждому стержню и пластине аналитической модели могут быть присвоены индивидуальные настройки триангуляции (**Шаг**). Триангулировать можно как аналитическую модель всего объекта, так и любой его фрагмент. При триангуляции пересекающихся пластин, важен порядок применения к ним алгоритма триангуляции. В первую очередь следует триангулировать пластины с меньшим шагом триангуляции, а затем – с большим шагом. Иначе конечно-элементные сетки окажутся

несогласованными. Например, у нас есть две пересекающиеся между собой пластины с разным шагом триангуляции (рис. 2.23). Если мы сначала выполним триангуляцию одной пластины с большим шагом, а другой - с меньшим, то их конечно-элементные сети окажутся *несовместными* (рис. 2.23, а). В этом случае при выполнении конечно-элементного расчета возникают разрывы (висящие узлы) на стыке пластин. Для обеспечения согласованности сеток пластин, необходимо сначала выполнить триангуляцию пластины с меньшим шагом. Необходимо назначить узлы триангуляции на линии пересечения, которые должны быть обязательными для всех элементов, примыкающих к этой линии. Затем, в ходе триангуляции второй пластины (с большим шагом) будут задействованы узлы, полученные при триангуляции первой пластины (рис.2.23, б). Согласованность конечно-элементной сетки в этом случае будет обеспечена, что мы видим по характеру картины деформаций, полученной в результате прочностного расчета.

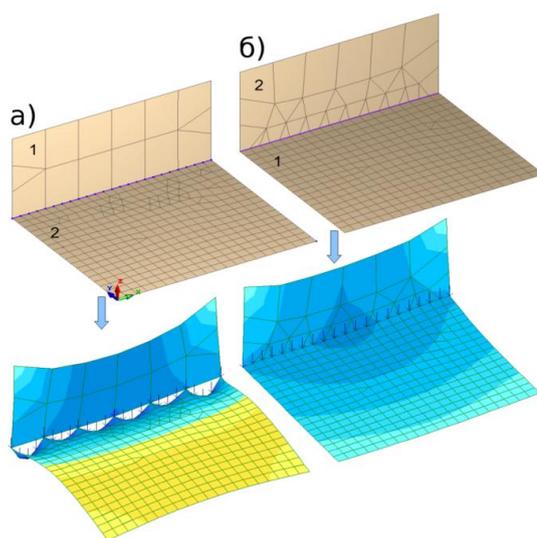


Рис. 2.23. Варианты согласованности конечно-элементной сетки,  
а) *несогласованность*; б) *согласованность*

Для корректировки конечно-элементной сетки, возможно принудительно ввести точки и отрезки триангуляции, которые являются дополнительными опорными точками для триангуляции. Точки и отрезки пересечения также как и введенные опорные точки и отрезки триангуляции служат для организации совместности конечно-элементных сетей. Поясним

этот процесс более подробно. Отличие между созданными вручную точками/отрезками и точками/отрезками, которые являются пересечениями, проявляется во время записи файла для расчета в ПК ЛИРА–САПР. Точки, являющиеся следами одного и того же пересечения, в конечно-элементной схеме становятся одним узлом.

Предназначение АЖТ – в некоторой степени компенсировать погрешности, вносимые упрощающими допущениями, принятыми при построении расчетных схем. Так, плиту или стену принято заменять для расчета на двумерную пластину, а колонну или балку – на одномерный стержень. В этом случае введение АЖТ в плоскости плиты, которое соответствует сечению примыкающей колонны позволит уменьшить перемещения, устранить концентрации напряжений и т. д., т.е. делает модель более адекватной своему реальному трехмерному прообразу. До появления программы САПФИР–КОНСТРУКЦИИ формирование АЖТ в местах опирания плит можно было делать вручную в ПК ЛИРА–САПР. В ПК МОНОМАХ–САПР АЖТ создавались автоматически, но лишь для схем, состоящих только из вертикальных и горизонтальных элементов. САПФИР–КОНСТРУКЦИИ позволяет автоматически генерировать АЖТ на произвольно ориентированных элементах. После передачи расчетной схемы в ПК ЛИРА–САПР в местах пересечений образуются АЖТ. Имеются случаи, когда АЖТ являются необходимой составляющей компьютерной модели. На рис. 2.25 приведено 2 случая, когда без применения АЖТ нельзя построить адекватную компьютерную модель.

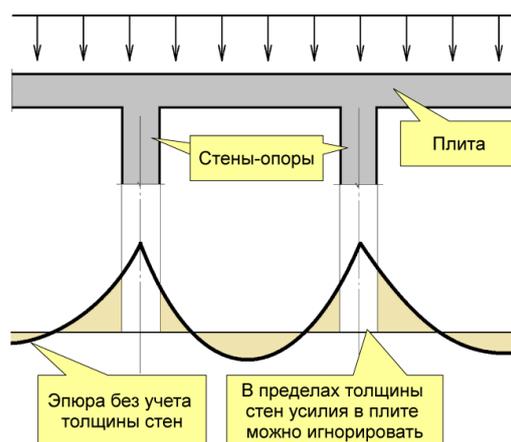


Рис. 2.24. Уменьшение пиковых усилий на плиту или балку при учете тела опор

АЖТ в местах опирания плит можно было делать вручную в ПК ЛИРА–САПР. В ПК МОНОМАХ–САПР АЖТ создавались автоматически, но лишь для схем, состоящих только из вертикальных и горизонтальных элементов. САПФИР–КОНСТРУКЦИИ позволяет автоматически генерировать АЖТ на произвольно ориентированных элементах. После передачи расчетной схемы в ПК ЛИРА–САПР в местах пересечений образуются АЖТ. Имеются случаи, когда АЖТ являются необходимой составляющей компьютерной модели. На рис. 2.25 приведено 2 случая, когда без применения АЖТ нельзя построить адекватную компьютерную модель.

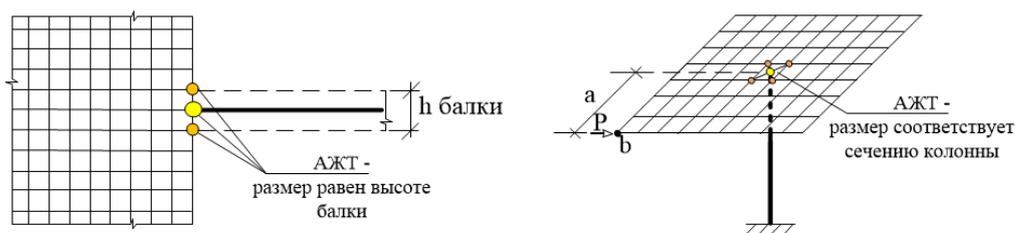


Рис. 2.25. Применение АЖТ для получения адекватной компьютерной модели пересекающихся конструктивных элементов

При примыкании балки к диафрагме без АЖТ невозможно получить адекватный момент в балке в месте заземления. При примыкании колонны к плите перекрытия без АЖТ невозможно получить адекватное перемещение в плоскости перекрытия. Так, перемещения узлов «В» вдоль действия силы  $P$  должно равняться  $U_b = a \times \varphi$ , где  $\varphi$  – угол закручивания колонны в ригелях. В обоих случаях использование шестой степени свободы и отказ от АЖТ дает неправильные результаты.

На рис. 2.26 АЖТ сформированы как от стены на плите, так и от плиты, на стене.

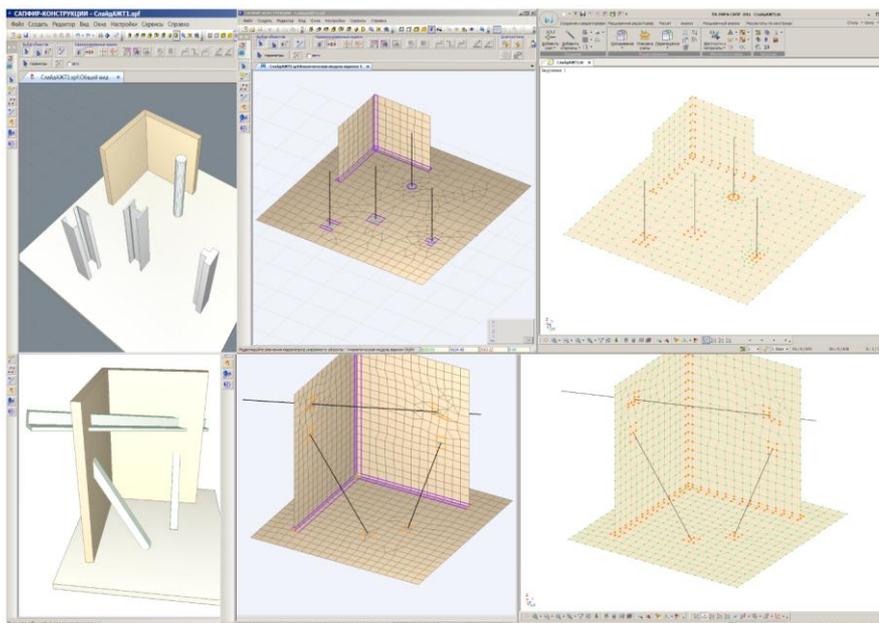


Рис. 2.26 Формирование абсолютно жестких тел в САПФИР–КОНСТРУКЦИИ

На рис. 2.27 приведены примеры согласования конечно-элементных сеток. На рис. 2.27 (а) и (б) показаны случаи пересечения двух стержней. В

случае (а) след вертикального стержня на наклонном и след наклонного на вертикальном совпадают. Поэтому в конечно-элементной модели пересечение этих двух стержней будет представлено одним общим узлом. В случае (б) следы стержней друг на друге не совпадают в пространстве, поэтому, чтобы согласовать конечно-элементные сетки используется абсолютно жесткое тело, в которое входит два узла. На рис. 2.27 (в) показано согласование конечно-элементных сеток пластин, которые хотя и не пересекаются в своих срединных плоскостях, но по какой-то причине – например, они входят в одну и ту же стену между ними – их следует считать пересекающимися. Отрезки пересечения при триангуляции переходят в ребра конечно-элементной сетки, соответствующие узлы которых должны быть объединены. Если бы соответствующие узлы оказались в одинаковых точках пространства, то образовался бы один узел вместо каждой пары узлов, как на рис. 2.27 (а), но в нашем случае (в) узлы оказались в разных точках и будут объединены в абсолютно жесткие тела, в каждом теле по 2 узла.

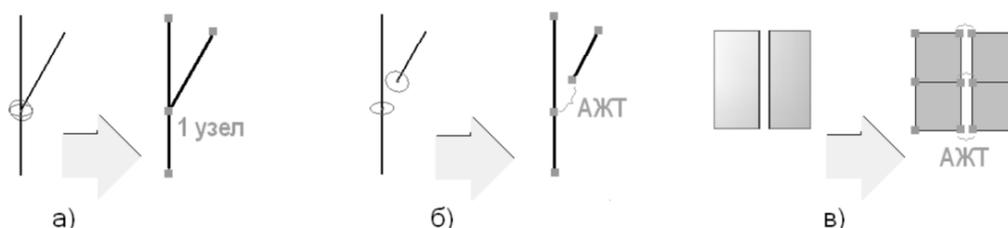


Рис. 2.27. Согласование сеток конечных элементов:  
 а) стержней при совпадении точек пересечения;  
 б) стержней, точки пересечения не совпадают;  
 в) пластин, отрезки пересечения не совпадают

### 2.6.3. Многокритериальный контроль качества модели с интерактивным отчётом об ошибках и некорректностях

Библиотека алгоритмов верификации позволяет выявлять некорректности и потенциально проблемные места в аналитической модели объекта. Ошибки перечисляются в интерактивном списке, позволяющем оперативно находить проблемные места на изображении модели в графическом виде.

Для этого предназначен ряд методов диагностики целостности аналитической модели здания. На рис. 2.28 показан фрагмент отображения визуальной и текстовой диагностики о некорректностях модели

Инструментарий диагностики ошибок включает более десяти проверок, каждую из которых можно включить, отключить, а для некоторых также настроить параметры. Параметры диагностики целостности аналитической модели следующие:

- ✓ проверка геометрии конечного элемента пластины по отношению радиусов  $R/r$ ;
- ✓ положение дополнительных точек или отрезков относительно контура;
- ✓ проверка близости параллельных стержней;
- ✓ проверка не пересечения параллельных пластин;
- ✓ проверка близости параллельных пластин;
- ✓ проверка расстояния между контурами объекта;
- ✓ проверка наличия поперечного стержня по умолчанию;
- ✓ проверка толщины пластины;
- ✓ проверка целостности пластины;
- ✓ проверка положения аналитической модели архитектурного элемента;
- ✓ проверка корректности приложения нагрузки.

Выборочно проанализируем важнейшие проверки, чтобы описать их возможности. Первая проверка – проверка геометрии конечного элемента пластины по отношению радиусов  $R/r$ . Это одна из базовых проверок, которая заключается в нахождении соотношения радиусов описанной ( $R$ ) и вписанной ( $r$ ) окружностей. ПК ЛИРА–САПР не обрабатывает элементы, если  $R/r > 50$ . Другие проверки – проверки близости параллельных пластин и параллельных стержней – ищут элементы аналитической модели, которые занимают одно и то же положение в пространстве. Третья проверка – проверка корректности приложения нагрузки – определяет, не осталась ли нагрузка или ее часть не приложенной, другими словами, нашелся ли под каждой нагрузкой элемент расчетной схемы, который ее воспринимает. Еще одна проверка – проверка положения аналитической модели архитектурного элемента – определяет, лежит ли хотя бы часть аналитической модели элемента в объеме архитектурного элемента, из которого она была создана.

При сохранении аналитической модели как расчетной схемы ПК ЛИРА–САПР автоматически создаются узлы и элементы конечно-элементной модели. Если элементы расчетной схемы имеют пересечения, то в местах пересечений обеспечивается совместность конечно-элементных сеток, нанесенных на элементы аналитической модели с помощью команд триангуляции. Как уже отмечалось при описании команд пересечения, если все следы одного пересечения совпадают, то в месте пересечения пересекающиеся элементы расчетной схемы будут иметь общий узел. Если же следы одного пересечения не совпадают в пространстве, то между соответствующими узлами пересекающихся элементов будут созданы абсолютно жесткие тела (АЖТ). Выбор в пользу создания АЖТ происходит в том случае, если расстояние между узлами, которые должны образовывать пересечение, больше, чем параметр **Точность объединения** объекта аналитическая модель. Если расстояние между узлами, образующими пересечение, меньше параметра **Точность объединения**, тогда вместо нескольких узлов, соединенных в АЖТ, образуется один общий узел с координатами, равными среднему арифметическому узлов, образующих пересечение, рис. 2.28. При этом могут несколько исказиться конечно-элементные сетки.

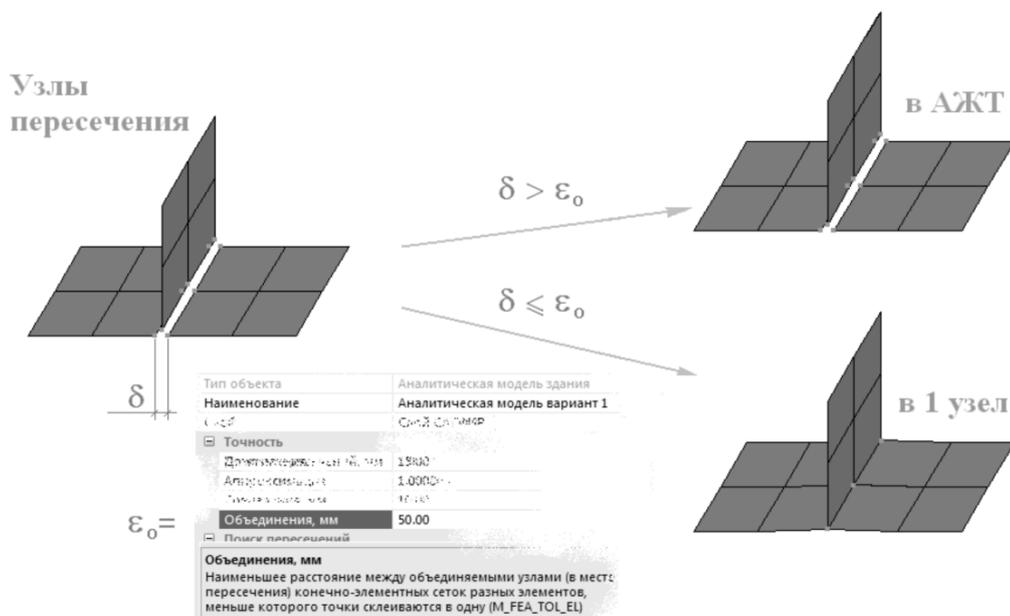


Рис. 2.28. Расчетная схема пересечения пластин в ПК ЛИРА–САПР

#### **2.6.4. Интерактивное графическое задание и редактирование нагрузок, формирование загрузений**

Проектировщик получает возможность наглядного моделирования нагрузок в пространстве проектируемого объекта с использованием графического инструментария. Кроме узлов и элементов конечно-элементной модели в программный комплекс ПК ЛИРА–САПР возможно передать нагрузки.

Инструменты создания нагрузок позволяют создавать нагрузки независимо от положения конечноэлементных сеток и вообще элементов. Можно создавать следующие виды нагрузок: сосредоточенная нагрузка; трапециевидная нагрузка по произвольной полилинии; равномерно-распределенная нагрузка внутри произвольного контура; сосредоточенный момент; трапециевидный момент по прямолинейному отрезку. Кроме того, нагрузки могут автоматически создаваться во время генерации аналитической модели из архитектурной. Так, в этот момент генерируется нагрузка от перегородок и жилых помещений, если они были заданы в архитектурной модели. Все нагрузки могут иметь произвольное направление в пространстве и могут быть разнесены по разным загрузениям.

Таким образом, САПФИР предоставляет три основных способа для моделирования нагрузок (см. рис. 2.29).

1. В состав информационной модели здания вводится некоторое множество элементов, способ интерпретации которых определяется как «Нагрузка». Это могут быть элементы, не являющиеся несущими. Создать такие элементы можно инструментами «Стена», «Колонна», «Тело/поверхность», «Пространство» и др., или добавить из библиотеки как «Прочие объекты». Для каждого из таких элементов можно присвоить параметру «Интерпретация» значение «Нагрузка», используя стандартные инструменты редактирования свойств и параметров объектов. В результате в аналитической модели здания такие объекты будут представлены в виде нагрузок. Например, кирпичная стена или гипсовая перегородка в составе здания из монолитного железобетона для прочностного расчёта интерпретируется в качестве нагрузки. При этом учитывается физический объём элемента и удельный вес назначенного ему материала. Для

абстрактных библиотечных объектов, представленных условными трёхмерными моделями иллюстративного характера, при интерпретации их в качестве нагрузок предоставляется возможность задать их вес. Заданный вес автоматически распределяется по площади, занимаемой моделируемым объектом.

2. Нагрузки могут быть введены в состав информационной модели здания как самостоятельные параметрические элементы, создаваемые и редактируемые графическими и параметрическими методами. В зависимости от типа нагрузки, определяется способ ее задания. Для нагрузки, распределенной по площади, задается контур приложения нагрузки. Для линейно приложенной нагрузки задается траектория приложения нагрузки. Для сосредоточенной силы задается точка приложения нагрузки.

При формировании конечно-элементной модели нагрузки дискретизируются и прилагаются к конечным элементам в виде штампа.

3. Распределённая нагрузка может быть задана в качестве параметра конструктивного элемента типа «Плита перекрытия». Такой способ задания нагрузки имеет ряд преимуществ. Во-первых, отсутствует необходимость задавать контур приложения нагрузки: нагрузка автоматически прилагается в пределах плиты перекрытия. При редактировании контура плиты перекрытия, опять же, не нужно редактировать контур приложения нагрузки. Для плиты можно задать два значения распределённой нагрузки: длительная и кратковременная. Соответственно, нагрузки на конечные элементы попадут в соответствующие загрузки. И, наконец, при формировании конечно-элементной модели (расчётной схемы здания) к конечным элементам, представляющим плиту перекрытия, будет приложена распределённая по площади нагрузка (а), в отличие от леса сил, получаемого первыми двумя способами (б).



Рис. 2.29. Основные способы информационного моделирования нагрузок  
 а) конечный элемент подвержен действию равномерно распределённой нагрузки; б) на конечный элемент действует несколько сосредоточенных сил, полученных в результате дискретизации нагрузок (лес сил)

Элементы, к которым приложены нагрузки, автоматически отыскиваются только в момент записи расчётной схемы для ПК ЛИРА–САПР, так что редактировать нагрузки в САПФИР–КОНСТРУКЦИИ можно свободно и независимо от положения всех других объектов.

Во время поиска конечных элементов, к которым приложены нагрузки, используется два параметра поиска: **L поиска** и **R поиска**. Если

нагрузка выходит за пределы конечных элементов, она будет помещена на конечный элемент, если расстояние от точки приложения нагрузки до конечного элемента не превышает **R поиска** в любом направлении или не больше **L поиска** вдоль или противоположно направления действия вектора нагрузки (рис. 2.30). Параметр **L поиска** можно назначить каждой нагрузке аналитической модели. Если параметр **L поиска** не назначен в параметрах нагрузки, т.е. в параметрах нагрузки задано **L поиска = 0**, то для поиска принимается значение по умолчанию, заданное в одноименном параметре текущей аналитической модели. Параметр поиска R поиска задается только в параметрах текущей аналитической модели.

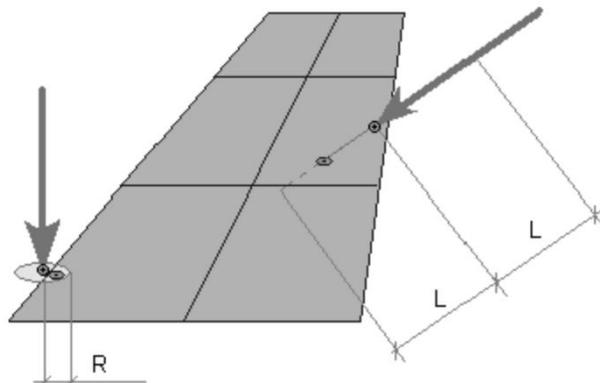


Рис. 2.30. Поиск элементов, на которые опираются нагрузки

Нагрузки и моменты, заданные в аналитической модели, передаются в расчетную схему сосредоточенными силами и сосредоточенными моментами.

1. Сосредоточенные нагрузки и моменты передаются в расчетную схему без изменений.

2. Линия каждой из распределенных по линии нагрузок или моментов разделяется на участки длиной не больше шага дискретизации, и в расчетную схему передается равнодействующая этому участку сосредоточенная нагрузка или момент.

3. Распределенные по площади нагрузки разбиваются на участки сеткой с преимущественно квадратными ячейками и размером ребра ячейки не больше шага дискретизации. В расчетную схему передается сосредоточенная сила – равнодействующая каждого участка.

Примеры передачи нагрузок изображены на рис. 2.31 а, б.

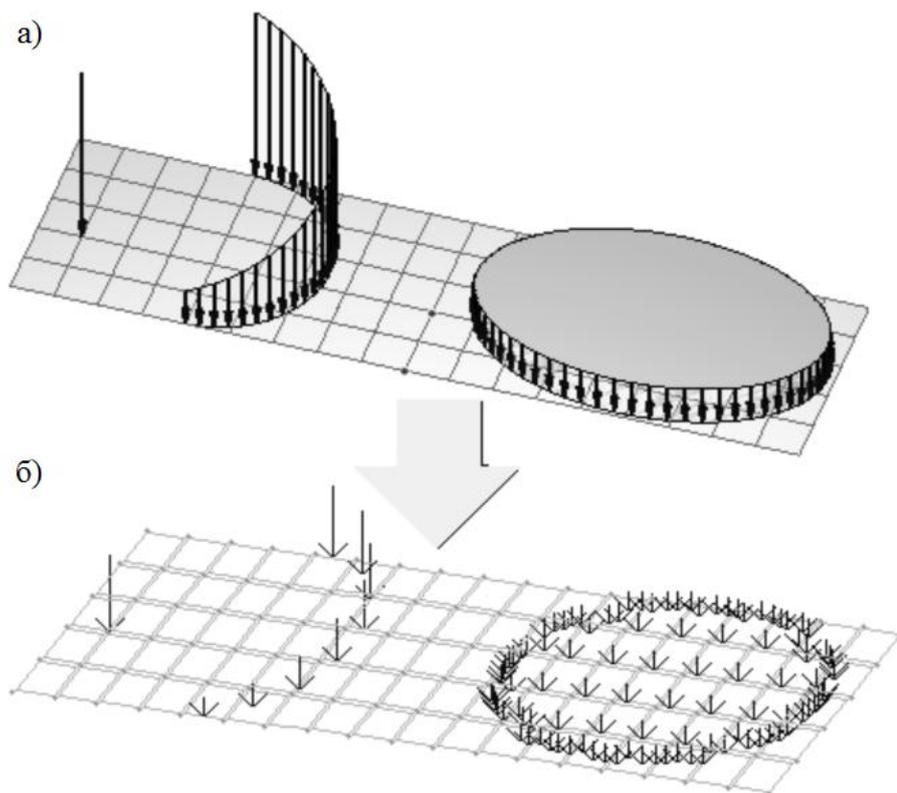


Рис. 2.31. Нагрузки в подсистеме САПФИР–КОНСТРУКЦИИ (а) и их представление в ПК ЛИРА–САПР (б)

**Генерация ветровой нагрузки.** Информационная модель здания содержит множество моделей ветров. Программа САПФИР генерирует ветровую нагрузку в виде распределенной в уровне перекрытий для зданий произвольной конфигурации. Ветровая нагрузка автоматически генерируется согласно нормативным документам в зависимости от направления воздействия, ветрового района, типа местности и аэродинамического коэффициента. Силуэт здания проецируется на плоскость, перпендикулярную направлению ветра. Далее, для каждого междуэтажного перекрытия определяется грузовая площадь в зависимости от высоты этажа. Грузовые площади показаны заштрихованными областями на рис. 2.32 б. И наконец, с грузовой площади на каждое перекрытие собирается ветровая нагрузка  $w = w_0 \cdot k \cdot c$ , где  $w_0$  – нормативное значение ветрового давления,  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение ветрового

давления по высоте,  $c$  – аэродинамический коэффициент. По умолчанию аэродинамический коэффициент принимается как сумма аэродинамических коэффициентов с наветренной стороны и подветренной стороны:  $c=0,8+0,6=1,4$ . Сгенерированные ветровые нагрузки прикладываются к аналитической модели, рис. 2.32 в. Может быть задано сколько угодно ветровых нагрузок на здание.

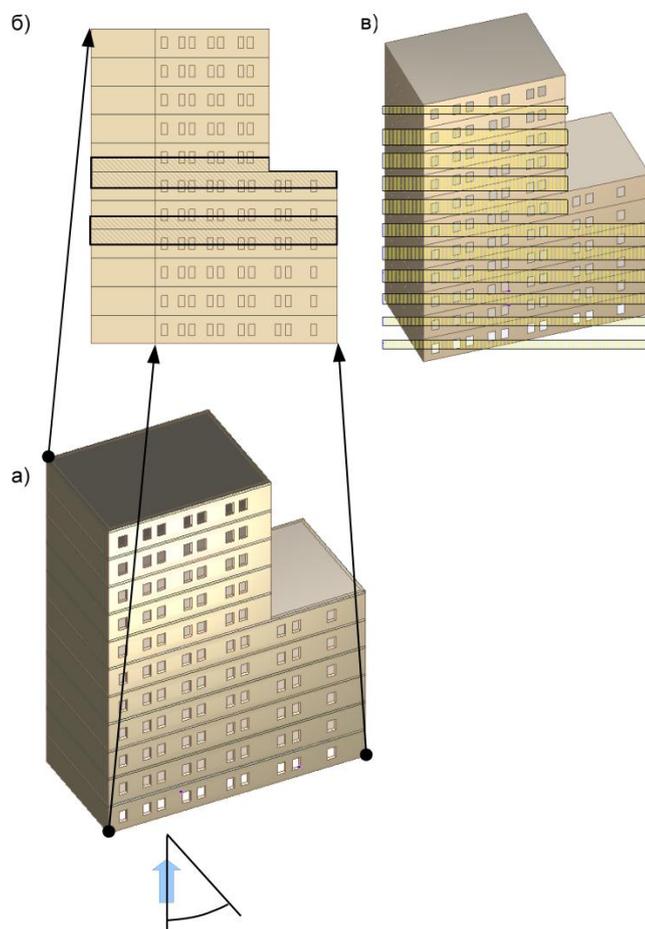


Рис. 2.32 Автоматическая генерация ветровой нагрузки в САПФИР-КОНСТРУКЦИИ

- а) *проецирование силуэта здания на плоскость, перпендикулярную направлению ветра;*
- б) *определение грузовых площадей;*
- в) *приложение собранной ветровой нагрузки к перекрытиям*

### 2.6.5. Методика задания последовательности возведения здания

В программе САПФИР–КОНСТРУКЦИИ реализован новый подход к заданию последовательности возведения конструкций, используя новое понятие: **монтажное событие**. Монтажное событие – это возведение, т.е. монтаж или, наоборот, демонтаж некоторой части здания. Событием может быть как монтаж или демонтаж несущих конструкций, так и приложение или снятие нагрузки. Одно или несколько монтажных событий, следующих одно за другим, образуют стадию монтажа, которая передается в ПК ЛИРА–САПР. Все события и стадии отображаются на временной шкале, обозначенной на рис. 2.33 термином «последовательность возведения». События можно генерировать как автоматически, например, включив в одно событие все элементы одного этажа, так и вручную, добавляя или исключая выделенные элементы из активного события. Процесс возведения здания можно раздробить на достаточное количество монтажных событий, чтобы потом, объединяя их в стадии, получить в результате расчетную схему с необходимым числом стадий монтажа. Подсистема «МОНТАЖ» в САПФИР–КОНСТРУКЦИИ предоставляет удобные и наглядные интерактивные инструменты для задания монтажных стадий, контроль объектов монтажных стадий, анимацию монтажа, автоматический сбор нагрузок от собственного веса элементов конструкции на каждой стадии монтажа и, наконец, автоматическое формирование монтажных таблиц в терминах ЛИРА–САПР, а в их числе – стадийных и дополнительных монтажных загрузений.

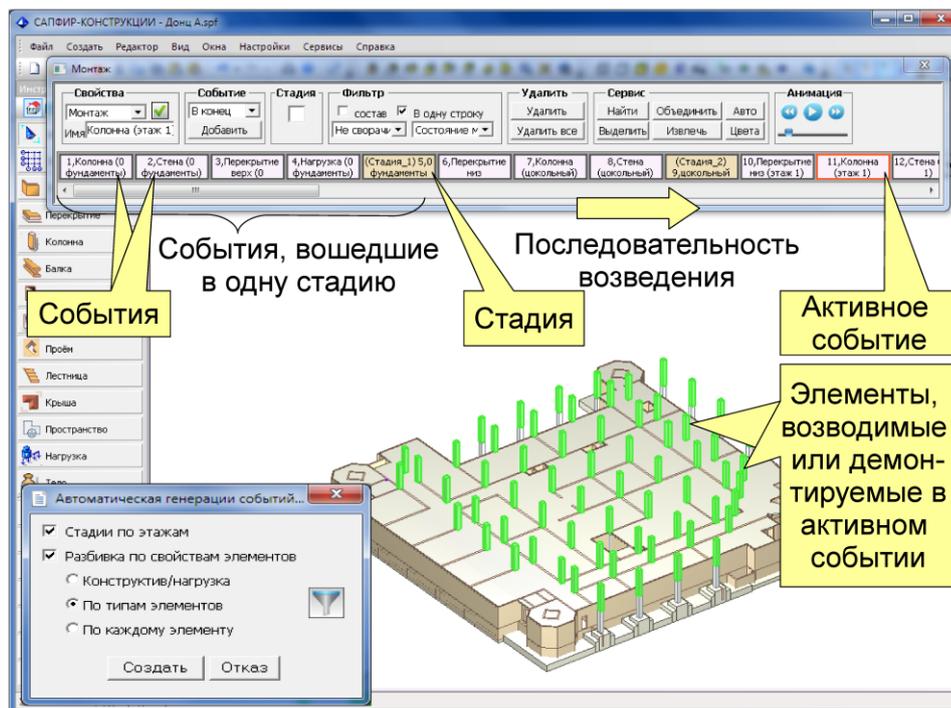


Рис. 2.33. Моделирование последовательности возведения здания в САПФИР-КОНСТРУКЦИИ

И еще один инструмент – инструмент наложения связей (граничных условий) и коэффициентов постели упругого основания. Связи можно наложить на конец стержня, нижний или верхний край пластины, на весь стержень, всю пластину, в произвольной точке стержня или пластины или по произвольному отрезку, лежащему на пластине. Линейные связи накладываются вдоль направлений осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  глобальной системы координат, а угловые связи – вокруг этих осей. Коэффициенты постели упругого основания  $C1$ ,  $C2$  накладываются на пластины и стержни целиком. Эта информация затем передается в ПК ЛИРА-САПР.

Таким образом, можно подытожить, что из одной архитектурной модели, могут быть сформированы несколько вариантов аналитической модели. В каждом из вариантов максимальное внимание может быть уделено некоторому конструктивному нюансу. Наиболее адекватная расчетная схема в ПК ЛИРА-САПР будет получена при максимальном учете всех факторов построения аналитической модели.

## **2.7. Решение проектно-конструкторских задач с помощью компьютерных технологий**

Основным технологическим средством автоматизации проектирования в строительстве является компьютер, оперирующий с информацией, представленной в цифровой форме и физически существующей в виде различных состояний их элементов. Поэтому возникает необходимость в разработке методов превращения разнообразной архитектурной, конструкторской документации в цифровую форму и представлении всех задач и элементов процесса проектирования только в виде операций над числами и логическими выражениями с доведением их до алгоритмов и компьютерных программ. Но при автоматизации проектно-конструкторского процесса следует постоянно помнить, что компьютер – это вспомогательное средство, а не замена конструктора. Наиболее эффективно компьютер и, соответственно, компьютерные технологии могут быть использованы, когда имеются математические модели, описывающие объект проектирования и имитирующие его функционирование в заданной окружающей среде.

Для действительного эффективного использования автоматизированных методов и средств проектирования необходимо учитывать, что любой эксперт, в том числе и генеральный конструктор, обладает вполне определенными и, к сожалению, весьма ограниченными физиологическими возможностями обработки информации. Следовательно, необходима декомпозиция проблемы.

Проектирование выступает как комплексная проблема, в которой в сложной взаимосвязи переплетаются задачи синтеза, моделирования, анализа, оценки, оптимизации и отбора альтернативных проектных решений [16]. Для решения таких сложных задач необходимо применение методологии системного подхода. При использовании методологии системного подхода для формализации процесса проектирования следует исходить из того, что специфика сложных объектов и процессов не исчерпывается особенностями составляющих его частей и элементов, а заключена в характере связей и отношений между ними. Расширение исходной базы за счет таких понятий, как, например, структура, функция, организация, связь, отношение, обеспечивает определенные преимущества

системному подходу перед традиционными методами исследований и позволяет создавать более адекватные действительности модели сложных объектов и процессов.

Исходя из основных положений системного анализа, последовательность решения многовариантных проектных задач с применением компьютерных технологий можно представить состоящей из ряда этапов (рис. 2.34).

Определяющим этапом проектирования является постановка общей задачи, при которой формулируется функциональное назначение объекта проектирования и вырабатывается концепция проекта на основе анализа системной модели. Адекватное описание такой модели возможно только при всестороннем рассмотрении проблемы. Системная модель строительного объекта, например, должна отражать взаимосвязи объекта со всеми участниками процесса проектирования, учитывать территориальное расположение объекта проектирования, уплотненность застройки, геологические условия, сложность возведения, особенности последующей эксплуатации.

На следующем этапе необходимо выполнить анализ общей задачи проектирования. Здесь на основе рассмотрения системной модели будущего объекта строительства выявляются связи объекта проектирования с окружающей средой, определяются компоненты проектной задачи, ограничения и критерии выбора рациональных вариантов проектного решения. Результаты данного этапа служат для поиска путей дальнейшего хода решения проектных задач. Если удастся использовать проект-аналог, то конструкторский процесс облегчается. Найденные аналоги могут лечь в основу будущего процесса конструирования.

При проведении конструкторских работ основной операцией является функциональный анализ объекта проектирования. Результаты этого этапа необходимы в первую очередь для определения стратегии решения общей задачи, необходимости ее декомпозиции.

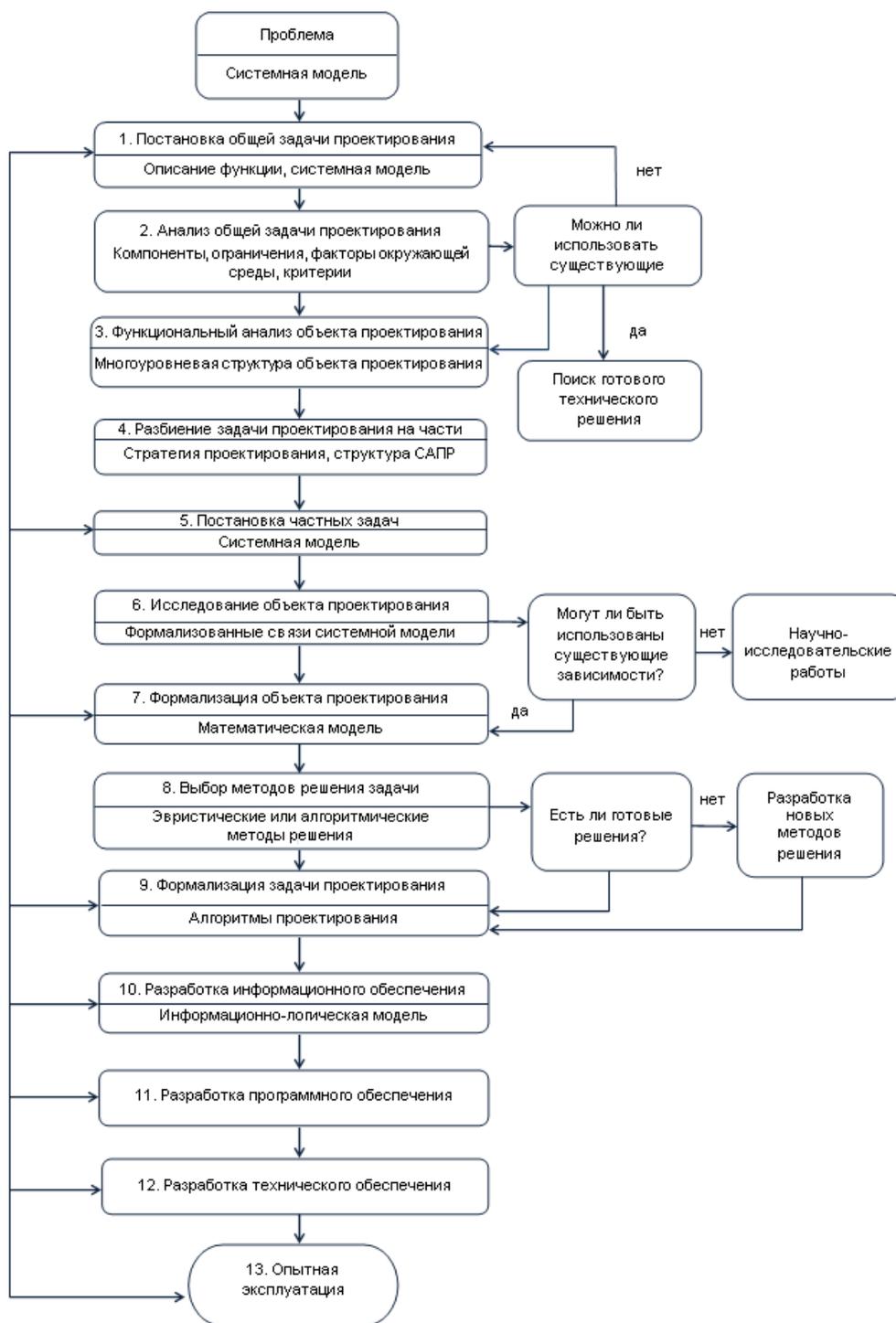


Рис.2.34. Схема создания специализированных САПР

При этом требуется проведение целого ряда научно-исследовательских работ, под которыми подразумевается: определение методов компьютерного моделирования объекта строительства, определение методов решения задачи, в зависимости от условий застройки, возможных сложных геологических условий, возможного учета сейсмичности, других форс-мажорных обстоятельств, необходимости учитывать в расчете геометрическую и/или физическую нелинейность, изменение расчетной схемы в процессе возведения и т.д.

Весьма важным является этап – формализация объекта проектирования. От полноты формального описания объекта зависит выбор метода решения задачи, а, следовательно, определяется возможность применения при проектировании того или иного программного комплекса. Если задача не формализована, то конструктор в дальнейшем пользуется одним из эвристических методов решения задачи. Если задача формализована полностью, т. е. имеется полная математическая модель объекта проектирования, современные программные комплексы решают ее автоматически. Если же задача формализована частично, т. е. не все связи системной модели удалось выразить в виде аналитических и логических зависимостей, то применяется вариантное проектирование и разрабатывается так называемый диалоговый метод решения, включающий вариант математической модели объекта и сценарий взаимодействия конструктора с программным комплексом.

После выбора одного из алгоритмических методов решения весь процесс проектирования можно формализовать и разработать алгоритмы автоматизированного конструирования.

Для решения сложных и нетиповых проектно-конструкторских задач необходима разработка информационного обеспечения автоматизированного проектирования, которое должно снабжать все проектные процедуры требуемой постоянной и переменной информацией для уменьшения рутинной работы проектировщика и повышения его производительности труда. Результаты проектно-конструкторского процесса документируются в виде текстовых и графических материалов.

Разработка процесса автоматизированного проектирования требует тесного сотрудничества ученых и инженеров разных специальностей – конструкторов, математиков, специалистов по автоматизированной

обработке информации, программистов, системщиков и организаторов производства. Следовательно, для наиболее полного и эффективного использования компьютерных технологий в проектно-конструкторской деятельности необходимы глубокие знания разработчиков программного обеспечения в вопросах теории проектирования, конструирования, математического моделирования, использования численных методов решения проектных задач, теории автоматизированной переработки информации и применения современных вычислительных средств.

### 2.7.1. Основные компоненты САПР

Теперь кратко опишем назначение каждого компонента средств САПР.

**Математическое обеспечение САПР.** Основа – математические методы, алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение САПР. Среди разнообразных элементов математического обеспечения имеются инвариантные элементы, принципы построения функциональных моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, методы поиска оптимальных, рациональных решений. Разработка математического обеспечения является самым сложным этапом создания САПР, от которого в наибольшей степени зависят производительность и эффективность функционирования САПР в целом [113].

**Программное обеспечение САПР.** Программное обеспечение САПР представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Программное обеспечение делится на общесистемное и специальное (прикладное) программное обеспечение.

Общесистемное программное обеспечение предназначено для организации функционирования технических средств, т. е. для планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов. В специальном программном обеспечении реализуется математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур.

**Информационное обеспечение САПР.** Основу составляют данные, которыми пользуются проектировщики в процессе проектирования непосредственно для выработки проектных решений. Эти данные могут быть представлены в виде тех или иных документов, параметрически структурированные в базе данных (знаний), содержащих сведения справочного характера о материалах, характеристиках конструктивных элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений.

**Техническое обеспечение САПР.** Это создание и использование компьютеров, оргтехники и всевозможных технических устройств, облегчающих процесс автоматизированного проектирования.

**Лингвистическое обеспечение САПР.** Основу составляют специальные языковые средства (языки программирования), предназначенные для описания процедур автоматизированного проектирования и проектных решений.

**Методическое обеспечение САПР.** Под методическим обеспечением САПР понимают входящие в состав документы, регламентирующие порядок эксплуатации. Причем документы, относящиеся к процессу создания САПР, не входят в состав методического обеспечения. Так в основном документы методического обеспечения носят инструктивный характер.

Важнейшим вопросом при создании САПР после формализации процесса проектирования является вопрос создания единой информационной платформы сопровождения проектно-конструкторской деятельности инженера.

### **2.7.2. Организация процесса автоматизированного проектирования**

В общем, виде процесс проектирования в САПР можно упрощенно представить схемой, показанной на рис. 2.35. 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. Инженер-проектировщик в САПР решает все неформализованные проектные задачи и задачи планирования работ. Современная САПР является инструментом

высококвалифицированного инженера-проектировщика, поэтому тесное взаимодействие человека и компьютера в процессе проектирования – один из важнейших принципов построения и эксплуатации САПР.

Основным блоком в схеме процесса автоматизированного проектирования (рис. 2.35) является блок проектных решений. В зависимости от полноты формализации наших знаний об объекте строительства проектное решение принимается 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).

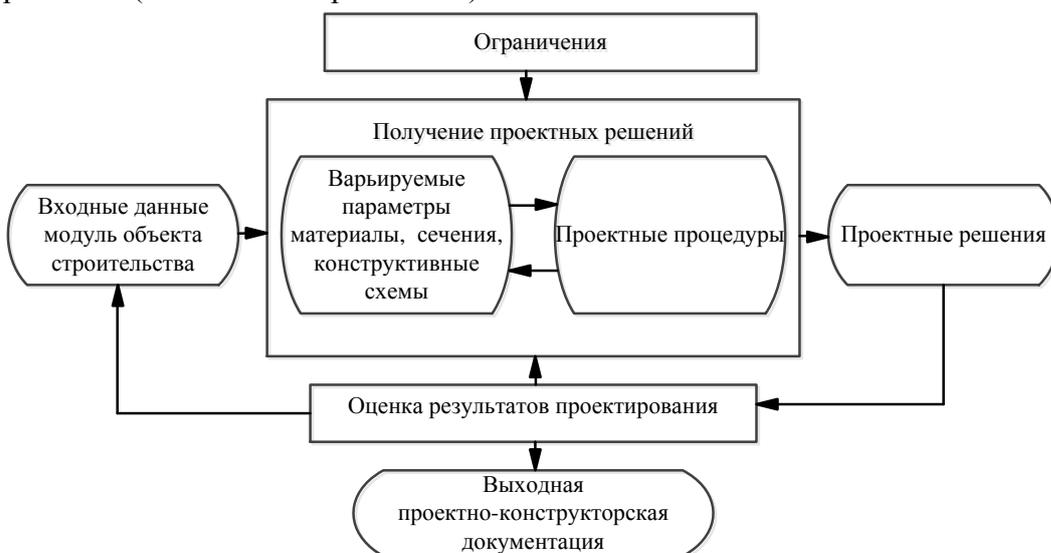


Рис. 2.35. Схема процесса автоматизированного проектирования

Результаты проектирования представляются в виде, удобном для восприятия человеком, и содержат информацию, на основе которой инженер выносит суждение о результатах проектирования. Если проектное решение утверждается, то оформляется требуемая проектная документация, если необходима корректировка проекта, инженер, уточняя варьируемые параметры, в интерактивном режиме добивается нужных результатов. Если же проектно-конструкторский процесс не приводит к намеченной цели, уточняются входные данные и ограничения, т.е. корректируются входные данные - сечения несущих конструктивных элементов, меняются поэтажные планы, меняется конструктивная схема объекта строительства.

Рассмотрение такой упрощенной схемы процесса проектирования позволяет уточнить разделение функции между инженером-проектировщиком и компьютером в САПР. Получение вариантов проектных решений и их представление в виде, удобном для восприятия человеком, возложено на компьютерные технологии, но даже при автоматическом получении вариантов проектных решений за инженером остаются важнейшие функции – подготовка исходных данных для проектирования, окончательная оценка и утверждение проектных решений. В интерактивном режиме проектирования инженер непосредственно участвует в ходе решения задачи, воздействуя на выбор факторов решения и уточняя независимые переменные. Получение проектной документации в соответствии с нормативными требованиями является операцией рутинной и пока автоматизировано лишь частично. Так, подсистема САПФИР–ЖБК позволяет в автоматизированном режиме создать детализированный чертеж армирования несущих конструктивных элементов (плита, диафрагма, колонна) с расстановкой основной и дополнительной арматуры продавливания и выдачей спецификации. Это первый шаг к созданию рабочей проектно-конструкторской документации в автоматизированном режиме.

Схема программного обеспечения автоматизированной проектной процедуры имеет ряд составляющих и показана на рис. 2.36. В общем виде каждая составляющая реализуется своим программным модулем.

Назначение модуля формирования входных данных состоит в формировании модели и контроля при вводе в систему. Структура и формат списка входных данных зависят от содержания проектной процедуры (расчетного модуля). Предусматривается существование нескольких версий списка входных данных, которые определяют впоследствии вариантное проектирование. Структура списка данных формируется либо в диалоговом режиме пользователем, либо генерируется автоматически проектными процедурами.

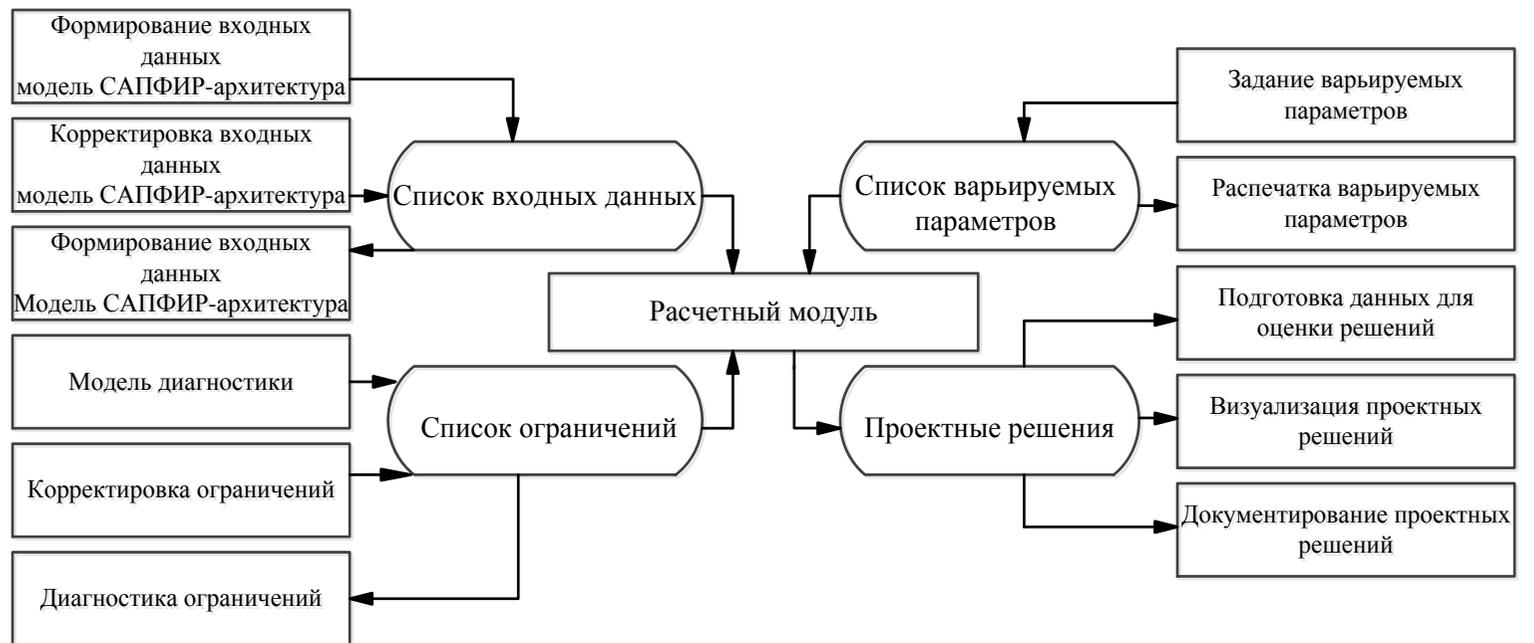


Рис. 2.36. Схема программного обеспечения интегрированной технологии проектирования

Так, при представлении информации об объекте проектирования в виде архитектурной модели, формируется параметризованный набор структур данных о каждом конструктивном элементе модели. Затем происходит преобразование архитектурной модели в аналитическую, при этом преобразуется информация о каждом конструктивном элементе, и в список входных данных включается информация о связях элементов между собой, о принадлежности к несущей (ненесущей) категории, включается информация о граничных условиях, нагрузках, условиях монтажа/демонтажа и т.д.

Программный модуль корректировки входных данных (модуль диагностики) предусматривает редактирование входной информации, потребность в котором возникает из-за ошибок пользователя при вводе данных (из-за ошибок архитектора при формировании модели), обнаруживаемых при контроле, а также при необходимости их уточнения в результате анализа и оценки проектных решений.

Для обеспечения тщательного контроля в САПР предусмотрены программные средства для визуализации ошибочно введенной информации. Это обеспечивается модулем диагностики.

Расчетный модуль программного обеспечения (расчетный процессор) процесса проектирования предназначен для автоматического выполнения всех формализованных операций проектной процедуры.

Получаемые варианты проектных решений обрабатываются программным модулем подготовки данных для оценки решений и передаются модулю визуализации.

Допустимо существование нескольких версий проектных решений, (вариантное проектирование), которые представляются в требуемом виде с помощью программного модуля документирования проектных решений.

Единая информационная платформа, основанная на применении CALS-технологии, позволяет осуществлять интерактивный автоматизированный процесс проектирования с сохранением множества различных версий, как исходной информации о проектируемом объекте, так и проектных решений.

## 2.8. Методы идеализации объекта строительства при создании расчетной схемы

При создании расчетной схемы сложной конструкции обычно прибегают к некоторой идеализации ее формы, при этом степень этой идеализации влияет на достоверность результатов расчета. Моделирование геометрической формы производится на основе геометрических соображений («похожести» формы) и начинается с выделения из объекта его несущей части. И если в каркасном здании довольно просто указать на его основные несущие конструктивные элементы, то для зданий с несущими (кирпичными или железобетонными) стенами это удастся сделать далеко не сразу. Более того, несущие элементы в таких зданиях могут оказаться различными для разных режимов работы. Поэтому необходимо создание информационной модели несущей системы здания.

Реальный объект заменяется идеализированным деформируемым телом с изученными топологическими свойствами, такими как стержень (балка), стержневой набор (рама, ферма), арка, плоская стенка, деформируемая в своей плоскости, изгибаемая пластинка, пространственное массивное тело, и определенностью предполагаемого вида напряженно-деформированного состояния, такими как плоское напряженное состояние (ПНС), плоское деформированное состояние (ПДС), трехмерное напряженное состояние. Вносятся уточнения в условия сопряжения элементов расчетной схемы. В отдельных точках вводится разрыв части связей, например, взаимный поворот (шарнир), взаимное продольное или поперечное смещение в сочленениях стержней или других элементов, нарушение сплошности плоской или пространственной расчетной области. В природе не существует ни «чистых» шарниров, ни «абсолютно жестких» соединений элементов. Проектировщик должен сам принять решение о том, как идеализировать отдельные узлы, чтобы максимально адекватно смоделировать их действительную работу.

Устанавливаются условия закрепления (граничные условия) расчетной схемы (компьютерной модели). Прежде всего, это относится к внешним границам. По направлению каждой степени свободы краевых точек (плоскостей) возможны три варианта граничных условий (ГУ):

1. **кинематические ГУ:** нулевое или ненулевое фиксированное перемещение;

2. **силовые ГУ**: по направлению соответствующего вектора задается сила, равная нулю или не равная нулю;

3. **упругоподатливая связь** в виде линейного соотношения между перемещением и силой отпора (реакции).

В отдельных случаях могут быть полностью запрещены перемещения некоторых узлов системы.

Назначаются формы и размеры поперечных сечений стержней, толщины пластинчатых конструкций.

В настоящее время, при создании компьютерной модели рассчитываемого здания, нормативная документация [106, 119, 126, 129] рекомендуют учитывать наиболее существенные факторы, определяющие напряженное состояние и деформации основания и конструкций сооружения, пространственную работу конструкций, геометрическую и физическую нелинейность, анизотропию, пластические и реологические свойства материалов и грунтов, но не содержат практических предложений по решению данной проблемы.

### **2.8.1. Моделирование механических свойств строительных материалов**

Фундаментальную роль в переходе к расчетной схеме является выбор модели механического поведения материала строительной конструкции (упругого, пластического, упруго-хрупкого и т.п.). Этот выбор в наибольшей мере нуждается в экспериментальном обосновании.

При моделировании механических свойств материала должна быть установлена связь между напряжениями и деформациями в виде физических уравнений и определены критерии их разрушения. При этом обычно пренебрегают атомарной и зернистой структурой материала, считая его сплошным и первоначально (до нагружения) однородным по своим механическим свойствам. Предположение о сплошности дает возможность считать напряжения, деформации и перемещения отдельных точек непрерывными и однозначными функциями координат, имеющими непрерывные частные производные первого и более высоких порядков. Материал может обладать свойствами упругости, хрупкости, пластичности и ползучести, которые по-разному проявляются на разных этапах работы конструкций при разных внешних воздействиях.

Основные материалы и среды, используемые в строительстве: железобетон, сталь, кирпичная кладка, дерево, грунт. Основные постулаты и физические уравнения, используемые в современных математических моделях этих материалов, изложены в СНиП, ДБН и других нормативных документах [42, 43, 44, 77, 155, 156].

На стадии проектирования строительных объектов при моделировании механических свойств материалов обычно нелинейными эффектами пренебрегают, полагая, что все конструкции должны работать в упругой области, т.е. связь между напряжениями и деформациями линейна и имеет вид обобщенного закон Гука [130].

Для описания нелинейных эффектов в определяющих соотношениях для разных материалов конструкций сооружения используют разные теории и математические модели, в зависимости от механического поведения материала в конкретных условиях эксплуатации.

Остановимся на некоторых особенностях моделирования механических свойств некоторых материалов и методов их расчета.

**Бетон/железобетон.** В соответствии с рекомендациями СНиП, ДБН [42, 43, 44] расчет железобетонных конструкций проводится по прочности (первая группа предельных состояний) и по трещиностойкости (вторая группа предельных состояний), где выполняется расчёт на образование и раскрытие трещин. Явление ползучести обычно учитывается путём введения коэффициентов, снижающих несущую способность сжатых элементов и определяемых экспериментальным путем [38, 42, 43, 44, 182, 183]. Расчёт на образование трещин при этом ведётся по упругой стадии, а нелинейное поведение материала учитывается путём введения упругопластических геометрических характеристик сечений (вводится модуль упругости в некоторых точках сечения).

Основные прочностные и деформативные характеристики бетона при сжатии получают на стандартных образцах-кубах, призмах или цилиндрах сравнительно небольших размеров, испытываемых в условиях равномерного распределения деформаций и напряжений в их поперечном сечении, т.е. при однородном сжатии. И механические характеристики бетона, реализуемые в образцах, полностью отождествляются с характеристиками, реализуемыми в конструкциях. Вместе с тем в подавляющем большинстве железобетонных конструкций различного назначения (в том числе и в плитах перекрытий, фундаментах, перемычках) бетон работает в условиях неравномерного

распределения деформаций и напряжений. Это происходит в силу неоднородности структуры бетона, поле его деформаций при сжатии и растяжении сложно и неоднородно даже при небольших нагрузках. Неоднородность эта существенно возрастает с развитием микротрещин и, особенно, с приближением к стадии исчерпания несущей способности.

Если внешнее воздействие происходит с постоянной скоростью деформирования, появляется ниспадающая ветвь диаграммы, на протяжении которой деформации возрастают, а напряжения постепенно убывают (рис. 2.37).

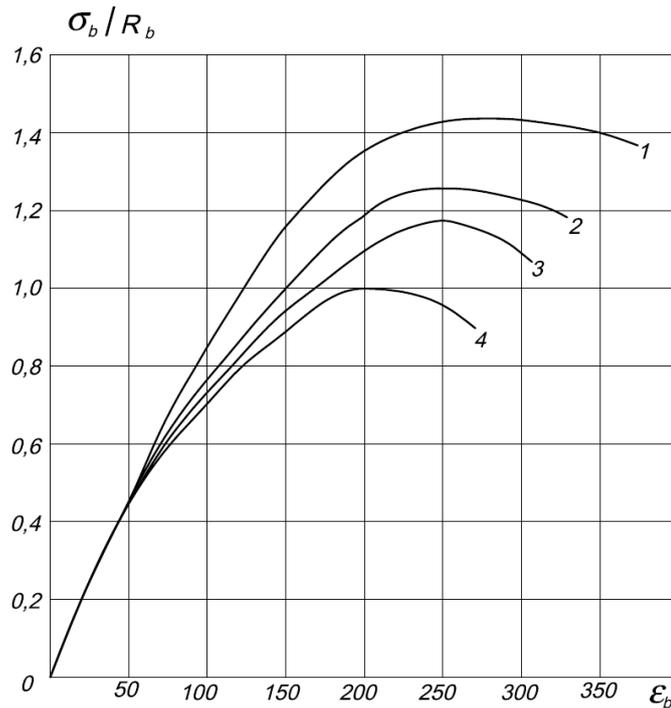


Рис. 2.37. Диаграммы деформирования бетона 1 – над трещиной; 2 – на участке между трещинами, 3 – на участке без трещин; 4 – при однородном сжатии

Механические свойства железобетона зависят от свойств отдельных компонентов. Экспериментальные исследования показывают, что значения предельных деформаций железобетона при разрушении заметно зависят от прочности арматуры, процента армирования, от уровня распределения остаточных напряжений и в меньшей степени от прочности бетона.

Нелинейные свойства железобетона по-разному проявляются на разных этапах работы конструкций. Некоторые авторы [8, 9, 10, 42, 43, 44] предлагают для описания механических свойств железобетона использовать деформационную теорию, которая приводит к результатам, хорошо согласующимся с экспериментами в случае малых упруго-пластических деформаций, и когда нагружение во всех точках тела близко к простому, что в реальных конструкциях наблюдается далеко не всегда.

В ПК ЛИРА–САПР реализовано оба подхода, инженер может выполнять расчеты, как в линейной постановке, так и с учетом нелинейных эффектов.

**Кирпичная кладка.** В соответствии с рекомендациями нормативных документов кладка считается изотропным упругим материалом, для нее принят единый модуль упругости. При расчете кирпичных зданий, выделяются отдельные элементы (фрагменты) стены, рассматривается их одноосное напряженное состояние при центральном и внецентренном сжатии и производится оценка их по несущей способности, по деформациям и по образованию и раскрытию трещин.

В несущих внутренних стенах каменных зданий, воспринимающих вертикальную и горизонтальную нагрузки, в углах оконных проемов, в местах примыкания продольных стен к поперечным, в опорных зонах и т.п. кирпичная кладка находится в условиях плоского или объемного напряженного состояния. Требуется уточнение расчетных моделей, учет физической нелинейности кладки и критериев ее разрушения. В этом направлении работали и работают многие исследователи [136].

Наличие отдельных трещин - это еще не разрушение конструкции. Накапливаясь, трещины могут привести к потере несущей способности здания. Однако этот момент не является внезапным, а является результатом накопления повреждений на разных структурных уровнях. Усовершенствование математических моделей материала, учитывающих накопление повреждений, развитие трещин в кирпичной кладке и влияние нагружающих систем, является важной задачей механики разрушения при оценке безопасности строительных конструкций.

В программном комплексе МОНОМАХ–САПР реализован алгоритм расчета зданий из армокаменных конструкций, основанный на модели, отражающей совместную работу армокаменных конструкций с

железобетонными включениями – пояса, сердечники, перекрытия, колонны и др.

### 2.8.2. Методы моделирования грунтового основания

Механические свойства грунтов намного сложнее, чем свойства других материалов. Это связано с различным гранулометрическим и химическим составом грунта, неодинаковыми в плане здания пористостью, влажностью, мощностью, наслоением, реологическими свойствами грунтов. Характерной особенностью естественных грунтовых оснований является изменчивость их физико-механических свойств, обусловленная случайными причинами, действовавшими в период формирования грунтов и их дальнейшей истории. Таким образом, свойства дисперсных грунтов изменяются как в пространстве, так и во времени. Кроме того, эти свойства обладают статистическим разбросом значений довольно большой величины.

На практике обычно используют детерминированную оценку характеристик грунта, исходя из его средних свойств и подменяя реальную, неоднородную среду некоторой идеальной, однородной [3,54].

В разное время исследователями было предложено множество различных расчетных моделей сплошного грунтового основания. Среди них можно выделить:

- ✓ Модель Винклера и ее модификации.
- ✓ Модели упругого (линейно-деформируемого) полупространства и линейно деформируемого слоя конечной толщины, рекомендуемые нормативными документами [117, 118, 119].
- ✓ Нелинейные (упругопластические) модели.

Описанию этих моделей посвящено большое количество работ [1, 3, 18, 21, 47, 64, 65, 66, 79, 80, 142, 143, 173, 179].

Благодаря своей простоте и наглядности наибольшее распространение в инженерной практике получили модели грунта, основанные на гипотезе Винклера о пропорциональности реактивного давления грунта (отпора грунта) прогибам верхнего строения в соответствующих точках. Грунт по модели Винклера деформируется только в пределах загрузки штампом (фундаментом, зданием). После снятия нагрузки поверхность грунта возвращается в свое первоначальное положение. Основной недостаток модели Винклера заключается в том, что

данная модель с постоянным коэффициентом постели не отражает распределительной способности грунта и в принципе неспособна адекватно отразить реальную картину взаимодействия между конструкцией и подстилающим ее грунтом. Тем не менее, модель Винклера, ввиду ее предельной математической простоты популярна и продолжает применяться в практике строительного проектирования.

Следующим шагом явилась разработка модели упругого основания с двумя коэффициентами постели, предложенная П.Л. Пастернаком. В этой двухпараметрической модели первый коэффициент постели характеризует жесткость основания на сжатие, а второй – на сдвиг. Эта модель с одной стороны устраняет главный недостаток модели Винклера – позволяет учитывать распределительную способность грунта, а с другой – почти не усложняет математическую постановку задачи по сравнению с моделью Винклера. Правда, двухпараметрическая модель порождает так называемые фиктивные поперечные силы на краях фундамента, свободных от закрепления. Существуют и другие модификации модели Винклера, например, трехпараметровая модель «ССС» [36]. Основная сложность при реализации этих моделей - в назначении коэффициентов, для которых требуются данные натурных испытаний, причем для штампов различных диаметров. Существует много методик по определению этих коэффициентов, но чаще всего эти коэффициенты назначаются без должного обоснования их числовых значений.

В настоящее время в практике строительного проектирования используется наиболее простая модель грунтового основания – модель линейно-деформируемого тела. Ее применение предписано нормативными документами [117, 118, 119, 144], выпущенными более 20 лет назад. Использование данной модели было определено возможностью ее реализации в несложных инженерных методах расчета.

Законность применения линейной теории упругости к грунтам обосновывается тем, что в соответствии с требованиями нормативной документации фундаменты должны быть спроектированы так, чтобы давление на грунт от сооружения не превышало 0,2 – 0,3 МПа, что позволяет не считаться с нелинейностью зависимости осадок от давлений. Модуль деформации при этом устанавливается по среднему значению тангенса угла наклона кривой «нагрузка-осадка» внутри этого участка.

Обычно проектировщики испытывают определенные затруднения при назначении обобщенных жесткостных характеристик естественных или искусственных оснований, особенно, для неоднородных слоистых оснований, т.к. получение соответствующих экспериментальных данных требует проведения специальных натуральных испытаний, а накопленные табличные данные далеко не всегда адекватны реальным условиям проектирования.

При назначении упругих характеристик грунта некоторыми авторами [121] предлагается выделять два состояния основания, соответствующие двум периодам.

1. Состояние в период возведения сооружения и непосредственно после возведения, когда происходит активная осадка сооружения вследствие необратимых деформаций основания.

2. Состояние после завершения осадочных явлений и стабилизации основания, т.е. в период эксплуатации сооружения.

Эти состояния требуют назначения разных моделей основания. Первое предполагает возможным рассматривать его как изотропное линейно деформируемое полупространство, характеризуемое модулем деформации. Второе – как изотропное упругое полупространство, характеризуемое модулем упругости, примерно на порядок превышающем модуль деформации. Эти характеристики должны быть дополнены коэффициентами Пуассона. Они являются исходными для определения обобщенных характеристик основания, однородного или слоистого.

В ПК ЛИРА–САПР проектировщик имеет возможность проводить расчет по различным моделям, в основе которых лежит трехмерная модель грунта, построенная на основе инженерно-геологических исследований. На основе этой модели имеется возможность определить значения коэффициентов постели переменного по площади рассчитываемого здания. В этом случае расчет производится по модели Винклера. Трехмерная модель грунта может быть триангулирована, каждому конечному элементу (КЭ) назначены жесткостные характеристики, в соответствии с механическими свойствами грунта, к которому относится этот КЭ. Расчет здания производится совместно с трехмерным массивом, моделирующим грунтовое основание, т.е. расчет проводится по модели упругого полупространства.

## **Глава 3 . КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ВОЗВЕДЕНИЯ**

### **3.1. Влияние процесса возведения на напряженно-деформированное состояние конструкций**

Информация об объекте и НДС несущей системы на каждой из стадий жизненного цикла претерпевает значительные изменения, причины которых могут быть различны. Стадией, формирующей НДС, является стадия возведения. На этом этапе конструктивная схема строительного объекта изменяется в зависимости от последовательности возведения, что обуславливает изменение конструктивной и расчетной схемы здания, и его НДС во времени.

Далее компьютерное моделирование процесса возведения рассматривается на примере многоэтажных зданий, т.к. она являются наиболее представительным классом строительных объектов.

Конструктивной основой многоэтажных зданий служит пространственная несущая система, состоящая в основном из вертикальных (колонны, пилоны, диафрагмы), горизонтальных (плиты перекрытий, фундаментные плиты) и наклонных (пандусы, лестничные марши, связи) элементов. Вертикальные несущие элементы объединены в единую пространственную систему с помощью горизонтальных несущих конструкций -перекрытий здания.

Современные концепции численного исследования конструкций высотных зданий рекомендуют учитывать совместную работу конструктивной схемы (надземная часть – фундаментная плита – основание) [33, 59, 121]. Такая постановка задачи дает результаты, достаточно отличающиеся от ранее используемых схем: сначала рассчитывалась надземная часть на жестких опорах, а затем фундаментная плита на упругом основании на нагрузку от опорных реакций (рис. 3.1.).

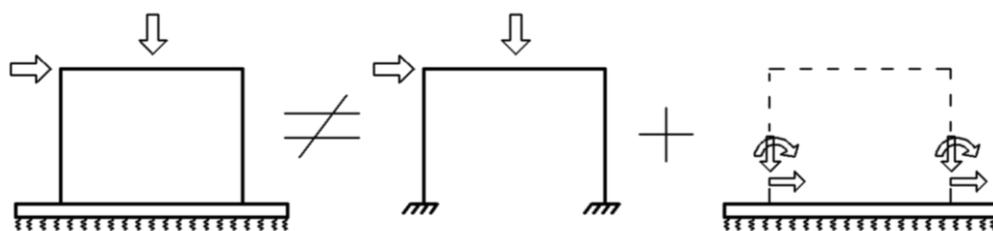


Рис. 3.1. Учет совместной работы «надземное строение – фундаментная плита – грунтовое основание»

Расчетная схема содержит информацию о топологии (взаиморасположение конструктивных элементов), геометрии системы, сечениях и материале элементов, нагрузках. В задачу расчета входит определение перемещений, усилий (напряжений) в элементах на основе этой информации.

Учет процесса возведения, по сути, является нелинейной задачей. В работе [121] введено понятие «генетической нелинейности». Этот термин достаточно логичен, так как отображает родословную конструкции. Хотя, с другой стороны, существующий термин «конструктивная нелинейность» для описания процесса возведения также подходит. Генетическая (конструктивная) нелинейность проявляется даже тогда, когда расчет с учетом процесса возведения выполняется в линейной постановке (см. рис.3.1).

Необходимость учета совместной работы конструктивной схемы «надземная часть – фундаментная плита – грунтовое (свайное) основание», нерегулярное расположение колонн, пилонов, диафрагм, сложное очертание перекрытий в плане с наличием большого количества отверстий и много других конструктивных особенностей обуславливает применение численных методов расчета, основанных на непосредственной дискретизации конструктивных схем.

Статический расчет несущей системы высотного здания, как правило, выполняется для окончательно сформированной расчетной схемы и заданных постоянных и временных нагрузок. Основную часть вертикальных нагрузок в несущей системе высотного здания составляют постоянные нагрузки. В процессе возведения каждого нового этажа здания, его собственная масса растет, при этом на каждом этапе нагрузка прикладывается к новой расчетной схеме, что приводит к иному

напряженно-деформированному состоянию конструктивных элементов. Так как все элементы несущей системы пространственно взаимосвязаны и работают совместно, усилия в них определяются исходя из комплексного расчета всей несущей системы.

Характерная организация компьютерного моделирования процесса возведения конструкций высотных зданий реализована в специализированном процессоре МОНТАЖ+ в составе ПК ЛИРА-САПР.

В этом процессоре, кроме учета изменяющейся конструктивной схемы собственно несущих конструкций, учитываются процессы снятия и установки стоек опалубки, приложения и снятия монтажных нагрузок, возможной временной пониженной прочности и жесткости бетона, обусловленной временным недобором 28-дневной прочности бетонной смеси или ее временным замерзанием.

Вначале задается конструктивная схема всего объекта. В нее включаются все элементы, как основные несущие элементы объекта (колонны, балки, плиты, диафрагмы), так и временные элементы (элементы опалубки, стойки подмостей и др.). Затем, для каждого этапа возведения описываются все конструктивные элементы, которые возведены или удалены на момент данного этапа. Это могут быть временные стойки подмостей, распорки, подпорки и др. Для каждого этапа возведения задаются нагрузки (собственный вес, монтажные нагрузки), которые действуют на данном этапе, а при необходимости – понижающий коэффициент прочности бетона.

Исходные данные для последнего этапа возведения соответствуют эксплуатационной стадии объекта, т.е. той стадии, когда объект полностью возведен, убраны временные опоры (стойки подмостей), набрана эксплуатационная прочность бетона, действуют эксплуатационные нагрузки (собственный вес, ветер, снег, полезные нагрузки).

На каждом этапе возведения объекта происходит расчет соответствующей конструктивной схемы на собственный вес и монтажные нагрузки с учетом имеющихся, снятых или добавленных временных опор.

## 3.2. Методы возведения конструкций. Математические основы моделирования

Процесс фактического возведения строительного объекта является важным этапом жизненного цикла. В ряде случаев при проектировании объекта, имеющего много аналогов, особое внимание этому этапу не уделяется. При проектировании сложных уникальных объектов проектировщик всегда должен иметь в виду этот этап. Очень часто возведение конструкции (здесь и в дальнейшем имеется в виду возведение именно конструкции, так как именно они являются основной частью строительного объекта) влияет на сам проект. Так, например, для мостовых конструкций всегда характерным методом возведения является навесной или сборочный на временных опорах метод. Безусловно, метод возведения повлияет на саму конструкцию мостового строения.

Большепролетные покрытия также возводятся различными методами, что так же оказывает большое влияние на окончательное напряженно-деформированное состояние их конструкций. Кроме традиционного монтажа на подмостях, очень часто применяется навесной метод. Для висячих покрытий (вантовые, висячие железобетонные, мембраны) всегда существует этап установки вантовой сети (или постели) с последующей навеской железобетонных плит или листов мембраны. Здесь также как и при монтаже мачт, существенным является организация процесса натяжения вант, установление их длины (заготовки) и т. д. Эти этапы должны быть учтены при проектировании и существенно влияют на саму конструкцию.

При возведении высотных зданий также имеется много эффектов, которые необходимо учесть при их проектировании, а, следовательно, провести компьютерное моделирование процесса возведения.

При компьютерном моделировании процесса возведения можно выделить следующие основные события:

- ✓ **Введение нового элемента.** Это основное событие, так как, по сути, монтаж это и есть последовательное введение элементов или группы элементов в расчетную схему до тех пор, пока не будет собрана окончательная схема. Среди вводимых элементов могут быть постоянные, которые войдут в окончательную конструктивную схему (колонны, пилоны, элементы плит, ванты, пояса и раскосы ферм и др.) и временные (стойки подмостей, распорки, затяжки и

др.), которые на определенном этапе монтажа будут удалены. При компьютерном моделировании это событие реализуется простым введением в расчетную схему нового элемента с соответствующими типами прикрепления к узлам.

- ✓ **Удаление элемента.** Это событие, как правило, характерно для временного монтажного элемента. При компьютерном моделировании это событие реализуется удалением из расчетной схемы этого элемента (или придания ему нулевой жесткости) и приложения к оставшейся схеме усилия которое было в этом элементе с обратным знаком по направлению этого элемента.
- ✓ **Добавление новой нагрузки.** Это также основное событие, так как добавление новой части конструкции (группы элементов) уже связано с добавлением нагрузки от собственного веса. Кроме того, возможны различные монтажные нагрузки или нагрузки от несущих конструкций, которые монтируются поэтапно вместе с основными конструкциями.
- ✓ **Удаление нагрузки.** Это событие характерно для монтажных нагрузок, например, нагрузка от складываемого материала на возведенной конструкции, нагрузка от передвижного крана (это событие моделируется поэтапным добавлением и снятием нагрузок) и мн. др.
- ✓ **Добавление и снятие внутренних связей.** Это событие характерно для монтажа сборных железобетонных или стальных конструкций. Например, сборные железобетонные плиты укладываются на ригели и на стадии монтажа – это шарнирное опирание, в последующих стадиях эти стыки могут омоноличиваться, и плиты будут уже работать как неразрезные конструкции. Примерно такие же ситуации возникают при монтаже стальных конструкций, например, при установке ригеля на колонну вначале это шарнирное опирание (ригель просто устанавливается на столик колонны), затем этот узел при помощи различных накладок (рыбок) и соответствующего обваривания превращается в жесткий узел. С точки зрения компьютерного моделирования это событие, по сути, является изменением связи между узлами. В программном комплексе ЛИРА-САПР эта связь моделируется набором специальных элементов (например, жесткая связь, проскальзывание, трение), поэтому это

событие моделируется снятием-удалением соответствующего элемента.

- ✓ **Добавление и снятие внешних связей.** В процессе монтажа часто устанавливаются временные стойки, распорки, затяжки, которые, по сути, являются внешними связями. С точки зрения компьютерного моделирования это событие реализуется снятием-удалением соответствующего элемента.

При возведении монолитных железобетонных конструкций важным эффектом, который необходимо учитывать при компьютерном моделировании, являются нелинейные свойства бетона, т.е. изменение жесткостных характеристик в процессе нагружения (ползучесть, трещины) [174, 175, 179]. Кроме того, в процессе монтажа переход к новой стадии часто осуществляется когда возведенная на предыдущих стадиях конструкция еще не набрала проектной 28-дневной прочности. Это также обуславливает необходимость учета нелинейных эффектов, так как от стадии к стадии меняется жесткость возводимых элементов, в соответствии с временем их возведения. Компьютерное моделирование процесса возведения представляется нелинейной задачей, даже если не учитывать эффекты, связанные с нелинейными свойствами бетона.

Рассмотрим пример – двухэтажная рама (рис. 3.2) возводится поэтапно. На первом этапе возведения к ригелю первого этажа приложена монтажная нагрузка  $P = 60$  т. После того как возведен второй этаж рамы, эта нагрузка убирается. Для корректности численного эксперимента нагрузка от собственного веса не учитывается. На рис. 3.3 приведено НДС возведенной ненагруженной конструкции (усилия дислокационного характера). Т.е. усилия в конструкции имеются после того, как удалена приложенная нагрузка. Это говорит о том, что конструкция хранит свою историю (родословную) возведения. На рис. 3.4 схематично отмечено, что суперпозиция отсутствует, а это первый признак нелинейности.

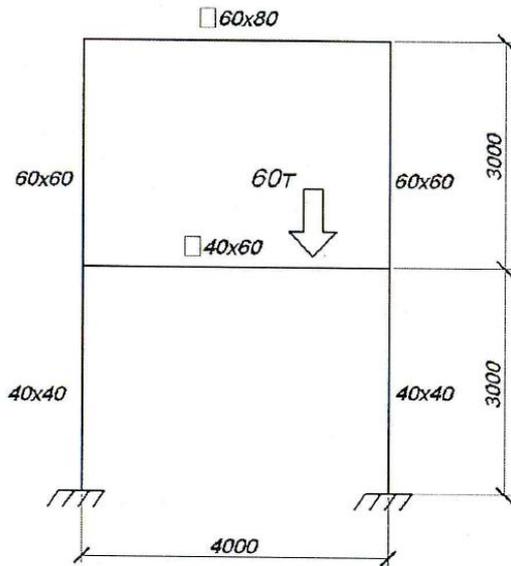


Рис. 3.2 Расчетная схема двухэтажной рамы

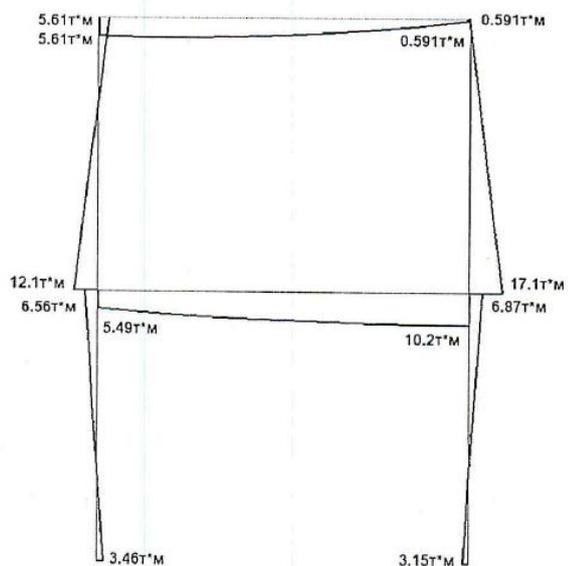


Рис. 3.3 НДС возведенной конструкции

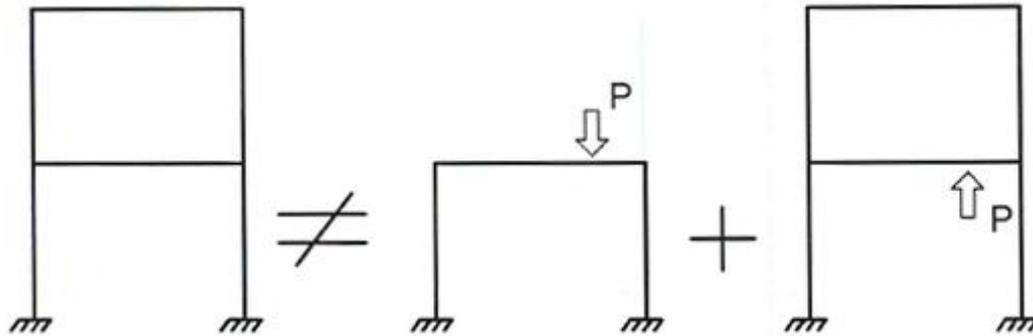


Рис. 3.4 Учет процесса возведения

Для решения нелинейных задач, как правило, применяются шаговые методы, математическим аналогом которых являются методы дифференцирования по параметру (методы продолжения). Эти методы использовались для доказательства существования решения нелинейных уравнений еще в прошлом столетии (об истории вопроса пишет Ф. Фиккен) [192]. Впервые этот метод для численного интегрирования систем уравнений, по-видимому, был применен Е. Лазем. Независимо Д.Ф. Давиденко применил метод дифференцирования по параметру к широкому классу задач. Физическую интерпретацию этим методам дали

В.В. Петров, Н.С. Корнишин, В.И. Феодосьев, а А.С. Городецкий в 60-х годах прошлого столетия разработал методы их решения на компьютерах применительно к нелинейным задачам строительной механики [55, 57, 58, 61, 76, 110, 136, 160].

Вычислительная схема метода такова.

Система нелинейных уравнений, описывающих нелинейную задачу, выглядит следующим образом:

$$Au = f \tag{3.1.1}$$

где:  $A$  – нелинейный оператор задачи;  
 $u$  – вектор искомых перемещений;  
 $f$  – вектор внешних нагрузок.

Идея шагового метода заключается в замене нелинейных уравнений (3.1.1) рекуррентной последовательностью линейных, которые на  $m$  шаге имеют вид

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta \beta_{m+1} f; \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1} \tag{3.1.2}$$

где:  $A_m$  – линейный оператор, в развернутом виде имеющий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_l}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_l}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_l}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_n} |_{u_m} \end{bmatrix} \tag{3.1.3}$$

Здесь  $\psi_l (l=1,2,\dots,n)$  – нелинейные операторы, т.е.  $l$  уравнение системы

$Au = f$  выглядит как  $\psi_l (u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n) = P_l$ ;

$\beta$  – параметр нагрузки. При  $\beta = 0$  легко определяется начальное решение  $u_0$ , при  $\beta = 1$  система превращается в исходную. Последовательно изменяя  $\beta$  от 0 до 1, находится приближенное решение. На  $m+1$  итерации уравнение метода конечных элементов имеет вид:

$$K_m \Delta u_{m+1} = \beta_{m+1} f \tag{3.1.4}$$

$$\sum_{z \in I_1} K_{1,r}^{(m)} \Delta u_{1,m+1} + \dots + \sum_{z \in I_j} K_{1,j}^{(m)} \Delta u_{j,m+1} + \dots + \sum_{z \in I_n} K_{1,r}^{(m)} \Delta u_{n,m+1} = \Delta \beta_{m+1} P I \quad (3.1.5)$$

Перемещения  $(u_m)$  и усилия  $(S_m)$  для конструкции возведенной ранее (для этапов  $1, 2, \dots, m-1$ ) определяются по формулам  $u_m = u_{m-1} + \Delta u_m, S_m = S_{m-1} + \Delta S_m$ , а для конструкции, возведенной на  $m$  этапе  $u_m = \Delta u_m, S_m = \Delta S_m$ . В отличие от (3.1.4) в (3.1.5)  $K_m$  не только составляются с учетом физически нелинейных свойств материала, но и с учетом изменения топологии конструкции, так как на  $m$  этапе расчета ( $m$  стадии возведения) учитывается появление новых элементов. При учете физической и геометрической нелинейности решение системы (3.1.5) требует дополнительных шагов типа (3.1.4).

### 3.3. Методы компьютерного моделирования строительных объектов с учетом особенностей возведения

Для современных сложных сооружений (мосты, большепролетные покрытия, высотные здания и др.), как правило, конструктивная схема обуславливается не только эксплуатационной стадией, но и стадией возведения. В процессе возведения конструктивная схема сооружения может многократно изменяться, усилия и перемещения «замораживаться», определяя сечения элементов и конструкции узлов именно на этой стадии.

Для изучения физической системы методами математического моделирования ее заменяют абстрактной системой - математической моделью.

Реализация математической модели на компьютере дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложных систем, заменяя, таким образом, экспериментальные исследования численным экспериментом. Кроме того, при решении ряда сложных конструкторских задач возможно и необходимо применение вариантного проектирования.

Это можно выполнить только на основе применения программных комплексов. Сегодняшние программы позволяют не только рассчитывать конструкцию в классическом понимании, но и моделировать различные процессы, связанные с «жизненным циклом» сооружения. Очень важно

смоделировать возведение конструкции высотного дома, когда по мере его строительства меняется его расчетная схема и здание, «запоминает» изменение расчетной схемы в процессе его возведения. Такие эффекты необходимо отслеживать и учитывать в проекте. При этом очень важно учитывать особенности нелинейной работы материала, потому что бетон со временем ползет, его физико-механические свойства также изменяются и в процессе эксплуатации. Все это называется моделированием «жизненного цикла» сооружения в процессе его возведения и эксплуатации. Иными словами современные компьютерные технологии дают возможность не только спроектировать рационально, т. е. сэкономить металл, бетон и другие материалы, но и повысить надежность конструкции.

Моделирование процесса возведения имеет большое значение для конструкций высотных зданий из монолитного железобетона, так как в этом случае необходимо учитывать такие эффекты:

- ✓ неравномерная осадка вертикальных элементов (колонны и пилоны имеют большие деформации, чем стены и диафрагмы);
- ✓ конструкции, как правило, включаются в работу до набора бетоном расчетной прочности (как правило, распалубка производится значительно раньше, чем бетон наберет расчетную 28-дневную прочность);
- ✓ установка и удаление временных стоек, которые существенно изменяют конструктивную схему здания на этапах возведения; и многие другие эффекты.

Учет особенностей возведения железобетонных конструкций высотных зданий реализован в программных комплексах ЛИРА–САПР, МОНОМАХ–САПР.

### **3.3.1. Примеры компьютерного моделирования процесса возведения конструкций высотных зданий**

Конструкции высотных зданий являются уникальными строительными объектами, возведение которых представляет сложную инженерную задачу, играющую важную роль в дальнейшем жизненном цикле объекта.

Основные типы конструкций высотных зданий следующие:

- ✓ Сборные железобетонные конструкции;

- ✓ Стальной каркас с монолитным железобетонным перекрытием;
- ✓ Армокаменные конструкции (до 14 этажей) с железобетонными перекрытиями, железобетонными поясами и сердечниками;
- ✓ Монолитные железобетонные конструкции.

Существует большое число работ, авторы которых имеют разные подходы к расчету зданий и сооружений [102]. Однако не каждый метод позволяет отразить реальную работу несущей системы здания. Большая часть этих методов предполагает определение НДС несущих элементов, исходя из готовой расчётной схемы здания, нагруженной полной нагрузкой. Часть методов ориентирована на определение характеристик только отдельных элементов здания, что также приводит к искажению реальной работы здания. Поэтому требуется их дальнейшее развитие и доработка. Целью теоретических и экспериментальных исследований многих ученых в настоящее время является определение влияния процесса возведения на НДС элементов несущих систем зданий. Исследование формирования НДС несущих систем в процессе возведения проводилось в работах Городецкого А.С., Перельмутера А.В., и других отечественных и зарубежных ученых [59, 121, 53, 60]. В них отмечается влияние изменения расчетной схемы и величины вертикальной нагрузки в процессе монтажа на формирование конечных внутренних усилий в элементах несущих систем многоэтажных зданий.

В зависимости от конструктивных решений, экономичности и безопасности, а также других условий строительного производства применяют различные методы возведения многоэтажных зданий. Но во всех случаях процесс возведения заключается в том, что собственная масса здания растет по мере монтажа, с возведением нового этажа изменяется высота здания, погонная жесткость вертикальных элементов и нагрузка на каждом новом этапе возведения прикладывается к новой расчетной схеме. Это подтверждает значимость данных параметров при математическом моделировании процесса возведения.

Наибольшее влияние процесс возведения оказывает на НДС несущих систем многоэтажных зданий с ядром жесткости. В случае возведения зданий каркасного типа ядро жесткости служит мощной пространственной конструкцией, воспринимающей не только часть вертикальной нагрузки, но и основную горизонтальную нагрузку, действующую на здание. В возведенном до монтажа наружных стен ядре жесткости успевают

произойти упругие деформации, часть деформаций ползучести и усадки. Несущие вертикальные элементы и несущие стены деформируются по мере увеличения нагрузки в процессе возведения уже в составе всей несущей системы, поскольку при возведении вертикальных несущих элементов и ограждающих конструкций одновременно происходит их соединение с ядром жесткости. Обычно монолитное ядро жесткости возводится с опережением по отношению к ограждающим конструкциям, поэтому основная часть деформаций ядра происходит до монтажа ограждающих конструкций. Колонны каркаса, напротив, укорачиваются по мере возведения и возрастания нагрузки. Разность продольных деформаций колонн и ядра приводит к соответствующему деформированию перекрытий. Каждое новое перекрытие возводится в строго горизонтальном положении после того, как колонны уже укоротились от всех нижерасположенных перекрытий. Поэтому каждое вновь возведенное перекрытие будет деформироваться, в основном, только от действия местной нагрузки, и нагрузки от вышерасположенных этажей.

На рис. 3.5 представлен пример расчета многоэтажной рамы, который демонстрирует необходимость учета процесса возведения.

Рама в определенной степени моделирует каркасное здание – ригели имеют сечение 400x20 см, что моделирует плиту перекрытия. Нагружение, кроме собственного веса включает полезную нагрузку  $q=2.06$  т/м и нагрузку от стен  $P=3$ т.

Как правило, перекрытия высотных зданий рассчитываются исходя из предположения, что опоры перекрытий (колонны, пилоны, диафрагмы) не имеют вертикальных перемещений. В такой постановке моменты в верхнем ригеле (определенный аналог верхнего перекрытия) А–В (рис. 3.5) будут равняться  $M_A=-2.7$  т м и  $M_B=-7.7$  т м; а прогиб в центре ригеля  $W_C = 0.5$  см. На рис. 3.6. приведена деформированная схема рассматриваемой конструкции при расчете с учетом процесса возведения. Расчет выполнялся по изменяемой в процессе возведения схеме: сначала первые два этажа, затем два последующих этажа, затем два верхних этажа. Расчет выполнялся на нагрузку только от собственного веса.

К окончательной (возведенной) схеме прикладывалась полезная нагрузка. Расчет выполнялся в физически нелинейной постановке, т.е. учитывались нелинейные зависимости между напряжениями и

деформациями для бетона и арматуры. Методы расчета конструкций в физически нелинейной постановке описаны в работах [59, 60, 53].

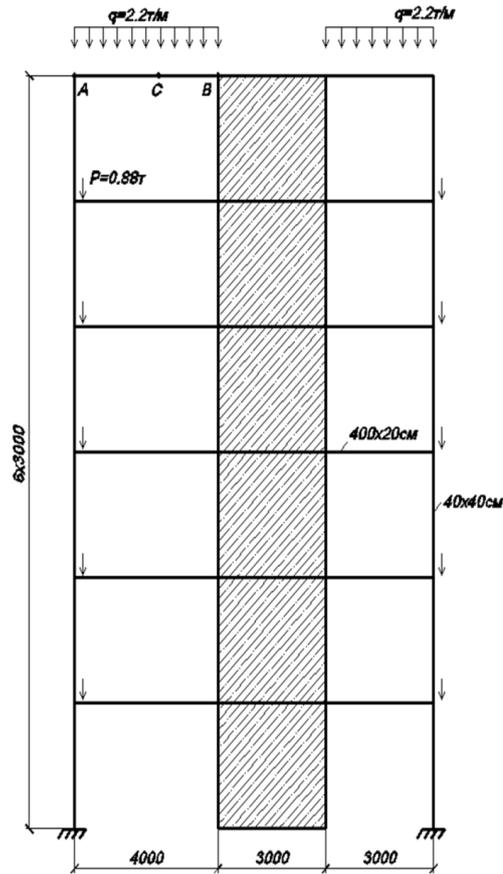


Рис. 3.5. Расчетная схема многоэтажной рамы

Для сравнения рассматриваемая конструкция рассчитывалась без учета процесса возведения, т.е. на окончательную схему прикладывалась вся нагрузка.

В таблице 3.1. приведены усилия ригеля А-В, полученные по трем различным схемам.

Анализируя результаты расчета, приведенные в таблице 3.1. можно сделать вывод, что НДС ригеля (аналог перекрытия), полученное на основе нелинейного расчета для всей схемы и, особенно, с учетом возведения значительно отличается от результатов расчета отдельно взятого ригеля (перекрытия) в линейно-упругой постановке.

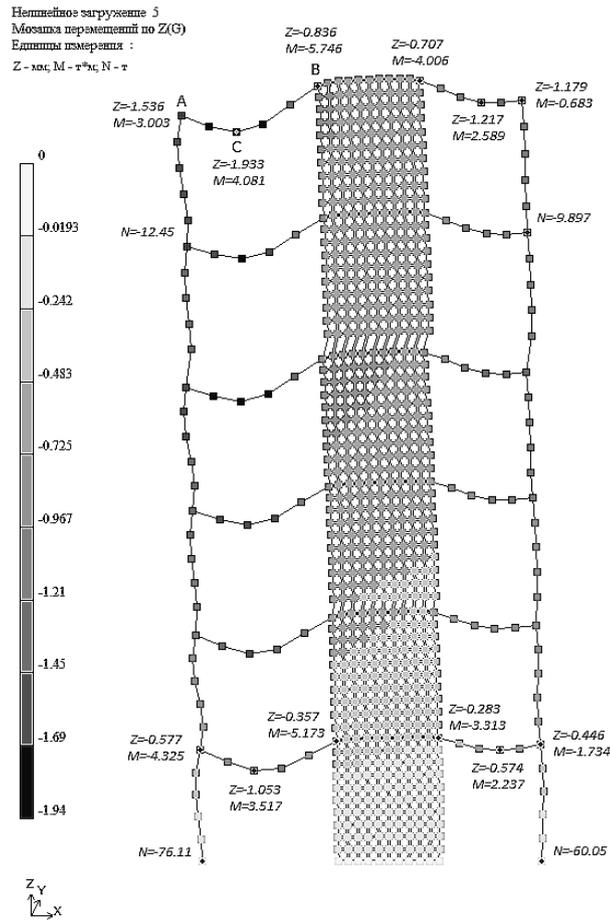


Рис. 3.6. Деформированная схема многоэтажного здания

В процессе исследований было установлено:

- ✓ монтаж элементов несущей системы приводит к изменению расчетной схемы здания, приложение увеличивающейся вертикальной нагрузки к измененной расчетной схеме здания влияет на НДС конструктивной схемы;
- ✓ формирование напряженно-деформированного состояния несущей системы в значительной степени зависит от способа монтажа;
- ✓ расчет ригелей (перекрытий) в общей системе здания значительно отличается от расчета отдельно взятого ригеля (перекрытия) на несмещаемых вертикальных опорах;
- ✓ расчет с учетом возведения дает результаты, несколько отличающиеся от традиционного расчета (окончательная схема рассчитывается на всю нагрузку).

Учет процесса возведения показывает насколько меньше перемещения вертикальных элементов, что объясняется моделированием выборки зазоров, которые обусловлены деформациями вертикальных элементов от собственного веса возведенной конструкции, при бетонировании перекрытий.

Таблица 3.1.

Сравнительная таблица результатов расчета рамы многоэтажного здания

Усилия и перемещения в сечениях ригеля АВ	Линейный расчет при несмещаемых вертикальных опорах	Нелинейный расчет без учета возведения	Нелинейный расчет с учетом возведения
Момент в сечении А, тм	-2.7	-2.9	-3.0
Момент в сечении В, тм	-7.7	-5.9	-5.7
Перемещения узла С, см	-0.5	-2.3	-1.9
Перемещения узла А, см	0	-2.0	-1.5
Перемещения узла В, см	0	-1.1	-0.8

В качестве примера, демонстрирующего уникальность, сложность проектирования и учета возведения высотных зданий, приведем здание высотного Общественного центра в г. Киеве [46].

Общественный центр (рис. 3.7) состоит из двух башен 48 и 35 этажей, стилобатной части, двухэтажного здания банка и 8-уровневого подземного паркинга. Наивысшая точка здания — 210 м от поверхности земли.

Конструктивная схема здания включает ядра двух башен, колонны по периметру каждой из башен с шагом 9 м железобетонные перекрытия с внешней арматурой в виде несъемной опалубки.

Строительство подземной части здания начинается с возведения ограждающей конструкции котлована методом стена в грунте. Следующим этапом станет устройство бетонного поля с установкой временных и постоянных стальных колонн сердечников с их последующим бетонированием.

Подземная часть здания возводится в основном методом top-down, и на этапе откопки 5-го уровня будет применен semi-top-down, позволяющий возводить одновременно вверх и вниз конструкцию здания. После откопки котлована под защитой перекрытия с 8-го уровня начнется сооружение двух спиральных рамп и одновременно строительство ядер башен и возведение конструкций надземной части здания.

Возведение подземной части здания выполняется в строгой последовательности в соответствии с расчетом каждого монтажного состояния от нагрузок со стороны грунта и жесткостью перекрытий на временных и постоянных металлических стойках.

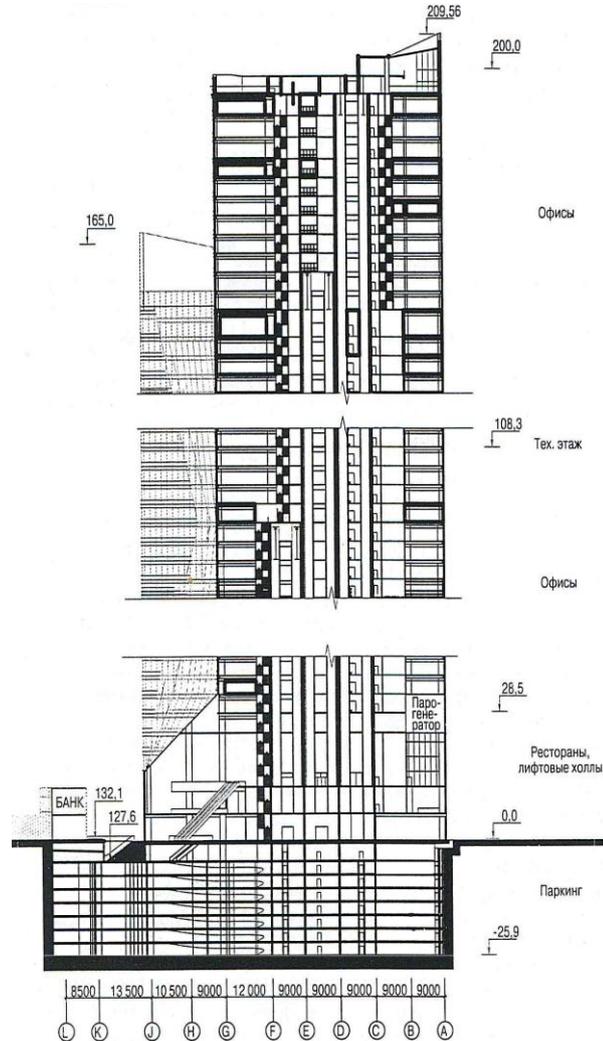


Рис. 3.7. Разрез высотного центра по 48-этажной башне

При возведении надземной части здания применен расчет усадки и ползучести бетона, в том числе и от нагрузок от собственного веса, с тем чтобы уровнять осадки на основание и обеспечить заданную горизонтальную плоскость перекрытий и неоднородность набора прочности ядра здания и колонн по периметру.

При проектировании этого здания наряду с расчетом всей окончательной конструкции на различные виды воздействия включая и ветровые (аэродинамические испытания модели проводились в Британской физической национальной лаборатории), проводилось компьютерное моделирование процесса возведения. Расчеты конструкций на различных стадиях монтажа не только значительно корректировали напряженно-деформированное состояние окончательной конструкции, но и определили в ряде случаев последовательность возведения.

Приведем еще несколько примеров указывающих на необходимость проведения компьютерного моделирования процесса возведения.

При строительстве многоэтажных зданий с железобетонным каркасом, у которых нагрузка от собственного веса конструкций является доминирующей, наблюдаются некоторые неожиданные эффекты. При расчете здания по традиционной схеме, нагрузка от собственного веса конструкций прикладывается одновременно, в результате чего напряженно-деформированное состояние несущих конструкций может не соответствовать реальной их работе. При возведении таких зданий нагрузка от собственного веса возникает постепенно, по мере возведения здания, соответственно, и прикладываться к расчетной модели эта нагрузка должна поэтапно, постадийно, по мере ее возникновения.

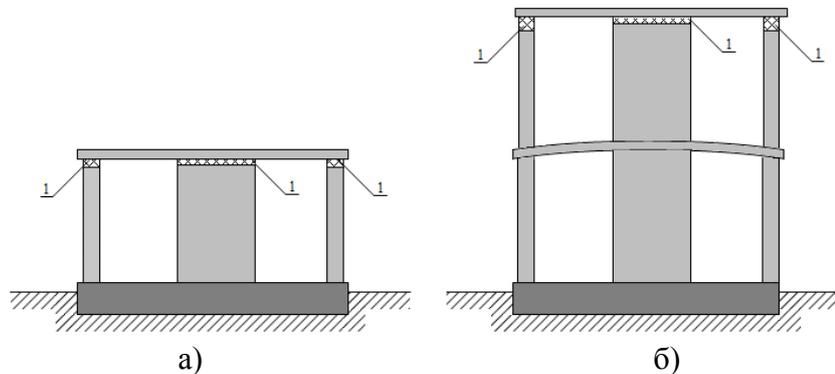


Рис. 3.8. Возведение монолитного здания, а) первая стадия монтажа  
б) вторая стадия монтажа: 1 – наращиваемая часть колон, диафрагмы

Этот факт проявляется особенно в монолитных железобетонных зданиях. Дело в том, что при возведении каждого этажа опалубка выставляется таким образом, чтобы верхняя поверхность бетонируемого перекрытия получилась горизонтальной. По существу корректируется проектная длина колонн, которые наращиваются на величину просадки уже возведенной части здания (рис. 3.8). Корректировка геометрии реализуется постепенно по мере возведения сооружения и передачи на него соответствующей части собственного веса. Учет процесса возведения показывает насколько меньше перемещения вертикальных элементов, что объясняется моделированием выборки зазоров.

К чему приводит учет этого обстоятельства, можно показать на примере расчета здания, расчетная схема которого показана на рис. 3.9 а, б, в. Здание имеет несимметрично расположенное ядро жесткости и диафрагменные стены в верхнем ярусе, перекрытия загружены равномерной распределенной нагрузкой. При традиционном подходе, когда нагрузки прикладываются к расчетной схеме одномоментно, мы получаем усилия в колоннах по оси Z, которая показана на рис. 3.9 б. При этом наблюдается растягивающая нормальная сила в верхней колонне (эффект подвешенной колонны). Если же вести расчет с учетом последовательности возведения и приложения нагрузок, то усилия в колонне по оси 2 получают значения, показанные на рисунке 3.9 в. Никакого растяжения здесь нет, и картина распределения усилий представляется более адекватной. Такая разница в НДС может приводить к неправильному конструированию.

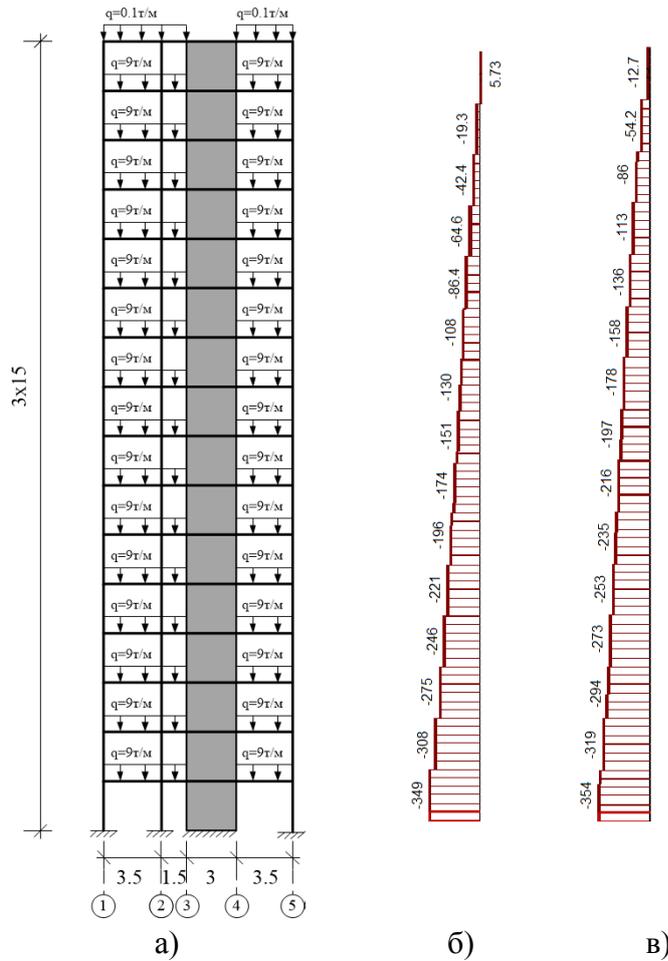


Рис.3.9. Расчетная схема и результаты расчета многоэтажного здания по различным схемам, а) – расчетная схема;

б) – эпюры усилий колонны по оси 2 без учета монтажа;

в) – эпюры усилий колонны по оси 2 с учетом монтажа

На рис. 3.10. а показаны изополю прогибов плиты верхнего этажа высотного здания полученной на основании расчетов плиты в составе общей схемы здания, когда колонны и диафрагмы являются податливыми, а на рис.3.10 б – расчет той же плиты из условия, что опоры плиты не имеют вертикальных перемещений [59].

Как видно, расчет по двум разным схемам (с учетом и без учета податливости опор) дает различные результаты. Большая жесткость лифтовой шахты обуславливает совершенно другую форму и величины деформации плиты перекрытия – плита как бы висит на ядре жесткости, а

близлежащая колонна «подвешивается» к диафрагме. В действительности плита перекрытия деформируется по другой промежуточной схеме. Так, в процессе бетонирования колонна «подращивается» на каждом этапе монтажа в большей степени, чем диафрагма. В период эксплуатации здания, когда развивается деформация ползучести, эффект «подвешивания» колонны увеличивается. Эти эффекты в полной мере учитываются при компьютерном моделировании процесса возведения.

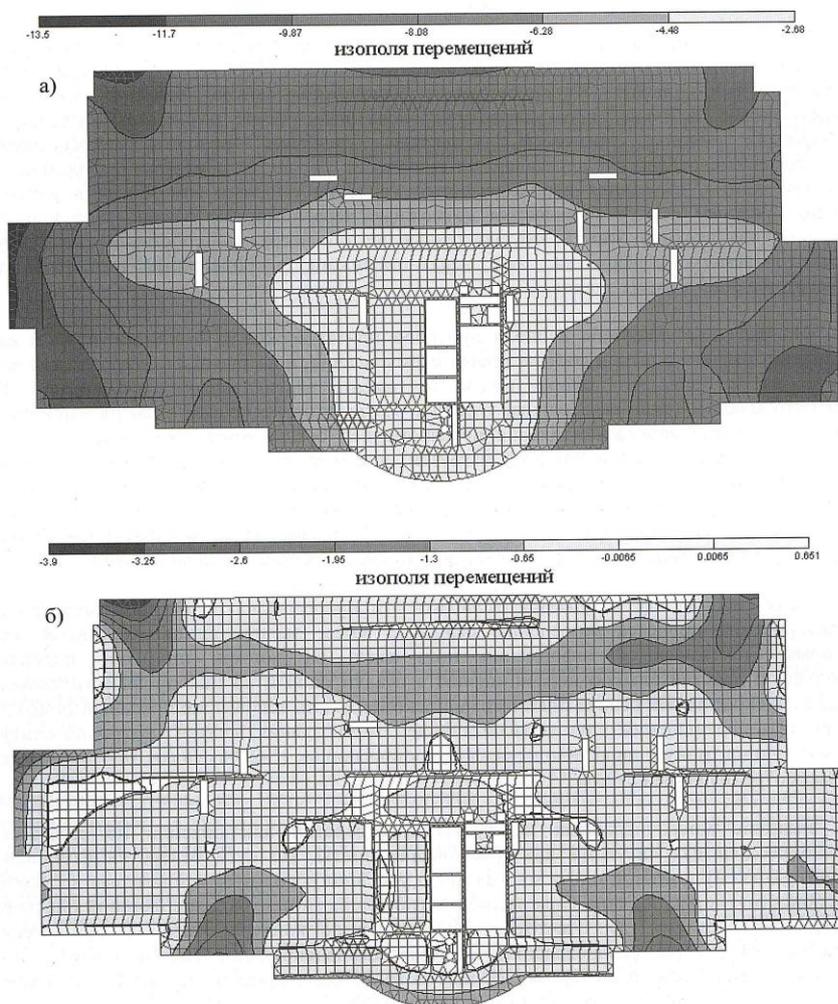


Рис. 3.10. Изополя прогибов плиты верхнего этажа высотного здания:  
а) при расчете плиты в составе общей схемы здания;  
б) при расчете плиты без учета податливости опор

### 3.3.2. Методы компьютерного моделирования процесса возведения подземных конструкций

Проблема строительства промышленных и гражданских сооружений в сложных грунтовых условиях весьма актуальна, поскольку более 80% застраиваемой территории сложено просадочными, лессовыми, слабыми водонасыщенными, насыпными, набухающими, скалистыми грунтами.

При строительстве новых сооружений и реконструкции существующих часто возникает необходимость передать на грунты основания значительные нагрузки. В сложных грунтовых условиях эти нагрузки (статические, поэтапно приложенные, динамические) вызывают большие и зачастую неравномерные осадки фундаментов сооружений. И хотя в этих условиях построены и успешно эксплуатируются сотни тысяч построек, известны и случаи аварий.

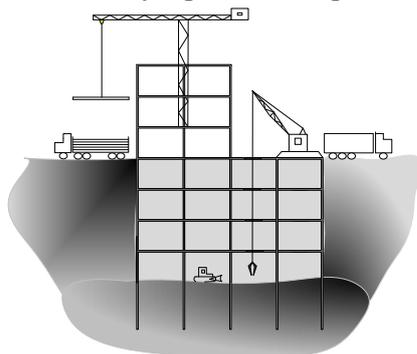
На конструкции зданий и сооружений действует комплекс неблагоприятных факторов. Отдельные из них оказывают решающее влияние на несущую способность и долговечность зданий и сооружений. Преждевременное истощение их эксплуатационных качеств и нарушение технологического процесса приводит к значительным материальным затратам. Вследствие ошибок, допущенных на этапах изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации, срок службы зданий и сооружений в ряде случаев значительно короче проектного. Наличие трещин [78, 80, 169], локальных разрушений нарушает нормальную эксплуатацию строительных объектов. Затраты на восстановительные работы часто соизмеримы со стоимостью нового строительства. Все это требует более обоснованного подхода к учету особых условий при проектировании и строительстве.

Возведение подземных конструкций всегда связано с необходимостью учета совместной работы собственно конструкций и грунтовых массивов [24, 65, 66, 180]. Различные способы возведения связаны с необходимостью учета различных эффектов. Так, при использовании метода top-down, что характерно для глубоких котлованов – 3-6 и более этажей последовательность возведения такова (рис. 3.11):

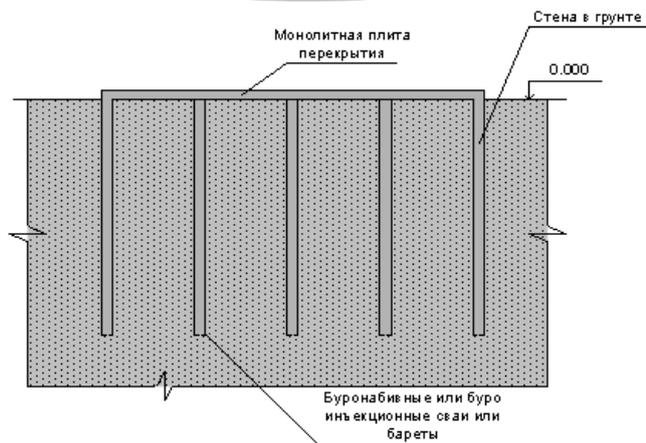
- ✓ устройство стены в грунте и свайного основания (для глубоких котлованов, как правило, применяются бареты);
- ✓ устройство плиты на отметке 0.000;

✓ экскавация котлована для устройства первого подземного этажа;

а)



б)



в)

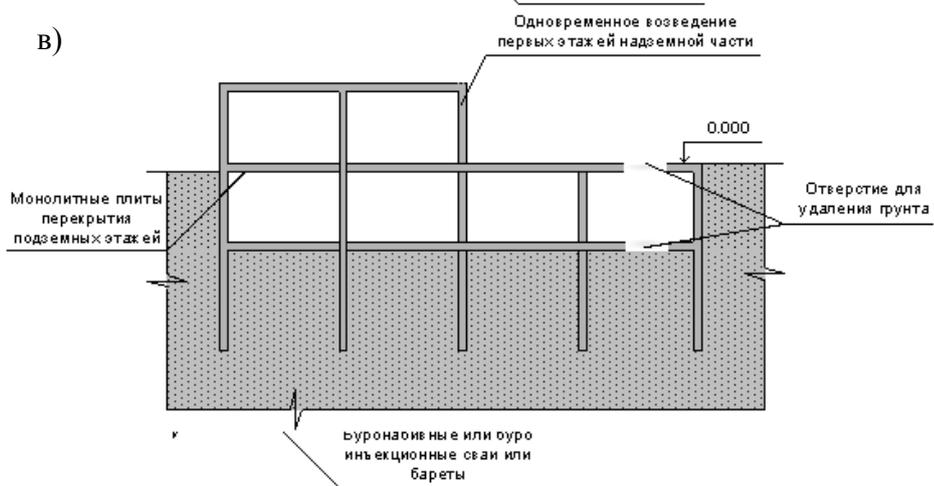


Рис.3.11. Последовательность возведения здания с многоуровневой подземной частью

а) – начальная стадия монтажа, б) – этап последовательного возведения подземных и наземных этажей; в) – схема возведения методом top&down

- ✓ устройство плиты на уровне пола первого подземного этажа
- ✓ дальнейшее последовательное возведение подземных и надземных этажей.

Такой способ возведения включает многочисленные стадии, которые влияют на НДС возводимой конструкции на протяжении всего жизненного цикла. Это, прежде всего, изменение давления грунта по мере экскавации грунта при последовательном устройстве подземных этажей; работа плит перекрытий подземных этажей на усилия сжатия, которые меняются по мере заглубления конструкции; изменение усилий в элементах по мере возведения надземной части и мн. др.

Возведение фундаментных конструкций традиционным методом связано с устройством открытых котлованов. Этот процесс для глубоких котлованов включает следующие стадии:

- ✓ устройство стены в грунте или шпунтового ограждения;
- ✓ экскавация первого участка котлована
- ✓ установка анкеров или распорок
- ✓ экскавация следующих частей котлована с установкой соответствующих анкеров, распорок и др.

В соответствии с такой последовательностью возведения компьютерное моделирование включает следующие этапы:

Первый (предварительный) этап – определение напряженного состояния грунта и исключение деформаций от собственного веса грунтового массива.

Второй и следующий этап – моделирование стадий строительства (монтаж, демонтаж конструкций, разработка котлована).

Отдельный этап – расчет коэффициента безопасности стадий строительства, включая определение линий скольжения грунтового массива.

Приведем конкретный численный пример, демонстрирующий возможность нелинейного моделирования процесса возведения котлована (рис. 3.12), численное исследование проведено на основе программного комплекса ЛИРА–САПР.

Шпунтовое ограждение моделируется стержневыми линейными КЭ 2 или физически нелинейными КЭ 202. КЭ имеет три степени свободы в узле (два линейных перемещения и угол поворота) и соответствующие продольную и изгибную жесткости EF, EI, которые импортируются из базы типовых сечений либо задаются численно.

Анкер моделируется специальным двухузловым КЭ 208. КЭ имеет одну линейную степень свободы в узле и соответствующую продольную жесткость  $EF$ . Элементы могут воспринимать усилия растяжения (анкеры) или усилия сжатия (распорки). Усилия растяжения и сжатия могут быть ограничены, чтобы моделировать разрушение анкеров или распорок. Свойства материалов импортируются из базы материалов либо задаются численно. Предварительное напряжение анкеров моделируется заданной величиной силы натяжения для КЭ 208.

Объект исследований — преднапряженные конструкции ограждения котлована, взаимодействующие с многослойным грунтовым массивом. Котлован шириной 20м и глубиной 10м (рис. 3.12) возводится в грунтовом массиве, включающем три слоя:

- 1 слой – насыпной:  $E=800 \text{ т/м}^2$ ;  $\nu=0.3$ ;  $\gamma=1.6 \text{ т/м}^3$ ;  $c=0.1 \text{ т/м}^2$ ;  $\phi=30^\circ$ ;  
 2 слой – песок:  $E=3000 \text{ т/м}^2$ ;  $\nu=0.3$ ;  $\gamma=1.7 \text{ т/м}^3$ ;  $c=0.1 \text{ т/м}^2$ ;  $\phi=34^\circ$ ;  
 3 слой – глина:  $E=2000 \text{ т/м}^2$ ;  $\nu=0.33$ ;  $\gamma=1.7 \text{ т/м}^3$ ;  $c=0.8 \text{ т/м}^2$ ;  $\phi=29^\circ$ .

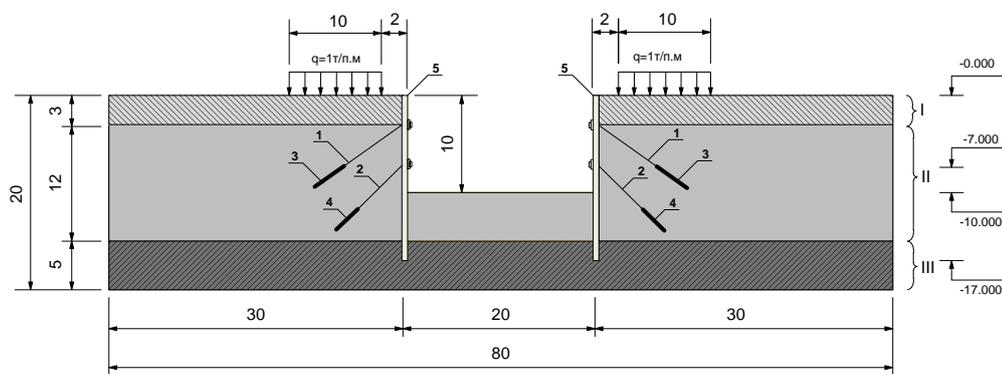


Рис. 3.12. Схема котлована, шпунтового ограждения, анкеров и грунтового массива: 1, 2 – анкер; 3, – опора анкера; 5 – шпунтовое ограждение  
 I – 1 слой (насыпной грунт); II – 2 слой (песок); III – слой (глина)

Жесткость шпунтового ограждения длиной 17м –  $EF=1,2 \times 10^6 \text{ т}$ ;  $EI=1,24 \times 10^4 \text{ тм}^2$ . Верхний анкер длиной 10,8м устанавливается под углом  $34^\circ$  и имеет жесткость  $EF=8 \times 10^3 \text{ т}$ . Величина натяжения верхнего анкера – 12т. Жесткость опоры верхнего анкера длиной 3,6м –  $EF=1 \times 10^4 \text{ т}$ . Нижний анкер длиной 5,6м устанавливается под углом  $45^\circ$ , имеет жесткость

$E_F=8 \times 10^3$  т. Величина натяжения нижнего анкера – 20т. Жесткость опоры нижнего анкера длиной 3,6м –  $E_F=1 \times 10^4$  т.

В ходе проведения численного эксперимента необходимо смоделировать процесс экскавации котлована и этапы натяжения анкеров таким образом, чтобы было возможно оценить реальное напряженно-деформированное состояние подземных конструкций и грунтового массива.

Экскавация котлована производится в три этапа:

- ✓ выемка грунта до отметки -3.0 м;
- ✓ выемка грунта до отметки -7.0 м;
- ✓ выемка грунта до отметки -10.0 м.

Задача решалась в плоской постановке, хотя программные комплексы ЛИРА-САПР, а также PLAXIS, STARK и др. допускают трехмерную постановку.

Компьютерное моделирование процесса возведения котлована и шпунтового ограждения включает следующие стадии:

1. Определение НДС грунтового массива с учетом нагрузки на поверхности грунта.
2. Установка шпунтового ограждения и экскавация до отметки -3.0м.
3. Установка верхнего анкера и его натяжение на 12т.
4. Экскавация котлована до отметки -7.0м.
5. Установка нижнего анкера и его натяжение на 20.0т.
6. Экскавация котлована до отметки -10.0м.

На каждой стадии определяется НДС для грунтового массива, шпунтового ограждения и анкеров. НДС предыдущей стадии являлось стартовой для расчета на следующей стадии. Расчет проводился с учетом физико-механических свойств грунта (грунт работает только на сжатие, ветвь разгрузки не совпадает с нагрузочной ветвью).

Моделирование натяжения выполнялось при помощи специального элемента «форкопф», реализованного в ПК ЛИРА–САПР. Элемент (рис. 3.13) реализует натягивающее усилие между натягиваемым элементом (в данном случае анкером) и упором (в данном случае шпунтом). Натягивающее усилие прикладывается частями (на каждом этапе расчета использовался шаговый метод) до тех пор, пока растягивающая сила в анкере не достигнет заданной величины. Моделирование процесса натяжения учитывает податливость грунта в месте анкеровки, податливость

шпунта, обусловленную самой конструкцией и обжатием грунта в местах его примыкания к шпунту.

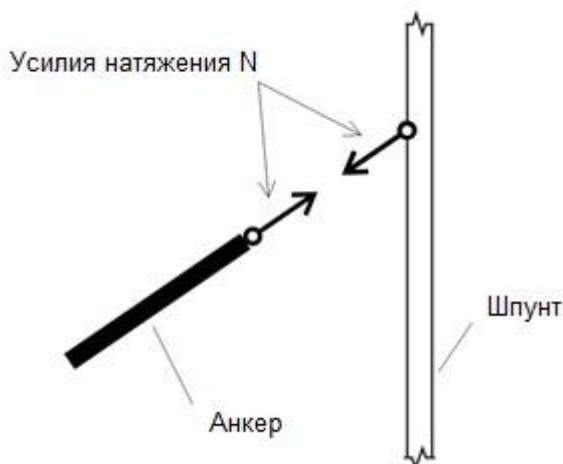
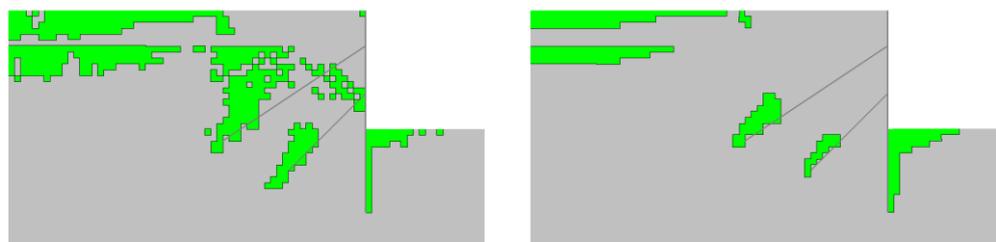


Рис. 3.13. Моделирование натяжения

На основе исследования НДС грунта на каждой стадии экскавации котлована можно получать изополя сдвигающих усилий, на основании чего строить линии скольжения и судить об устойчивости склона. Изополя предельных напряжений сдвига представлены на рис. 3.14, 3.15.

Эта информация может оказаться полезной при определении устойчивости склона, подпертого шпунтом с анкерами.



а)

б)

Рис. 3.14. Предельные напряжения сдвига для заключительной стадии монтажа

а) с учетом разгрузки грунта; б) без учета разгрузки грунта

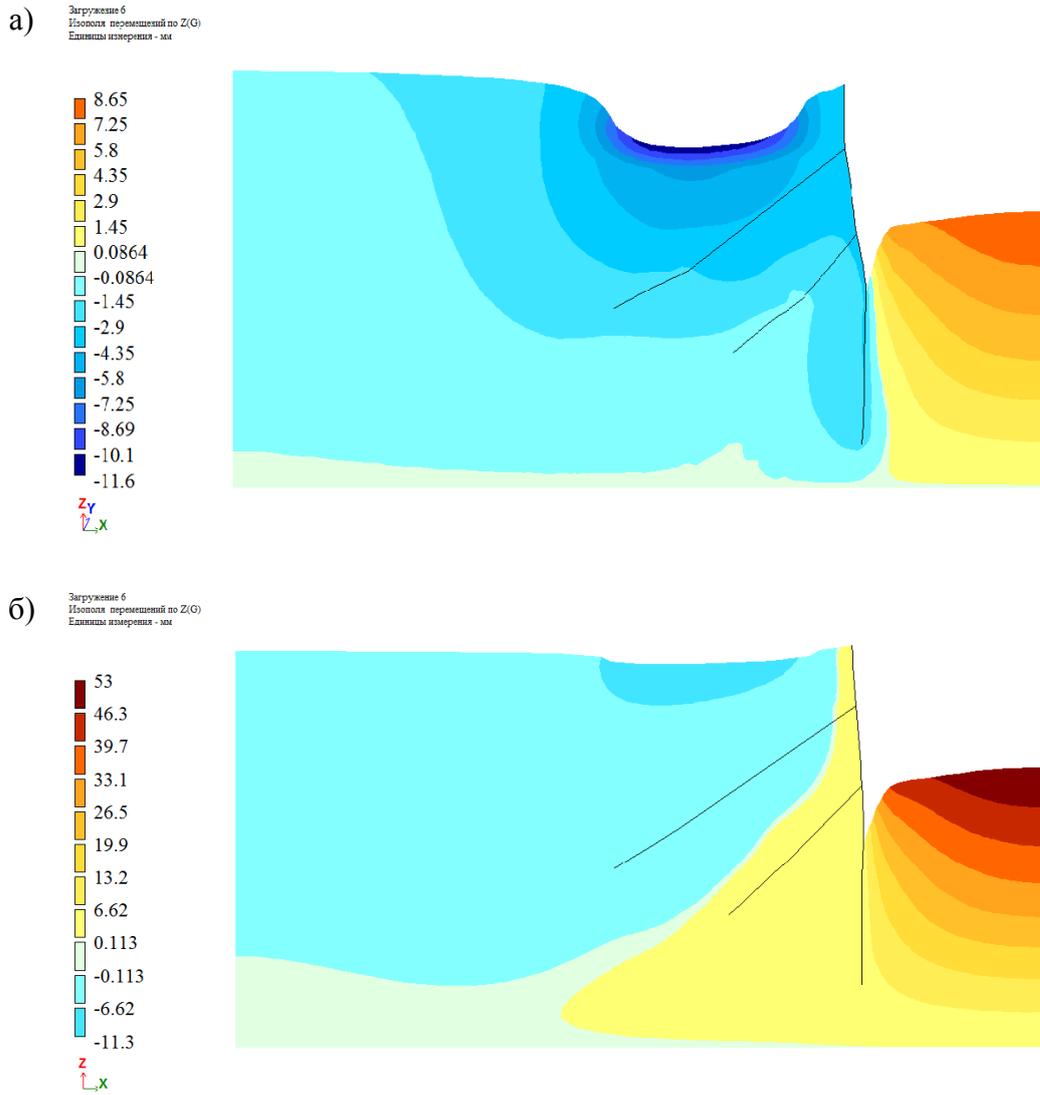


Рис. 3.15. Изополюс перемещений по Z для заключительной стадии монтажа,  
а) с учетом разгрузки грунта; б) без учета разгрузки грунта

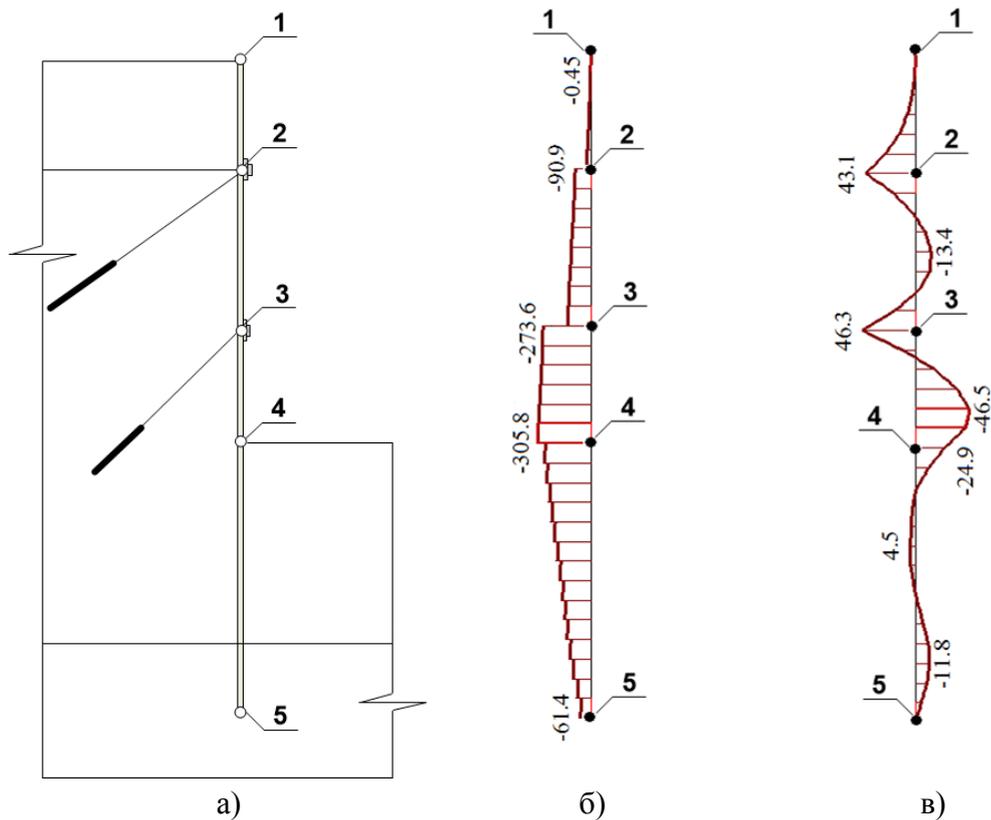


Рис. 3.16. Эпюры  $N$ , кН продольных сил и эпюры  $M$ , кН·м изгибающих моментов в шпунтовом ограждении

а) *схема шпунтового ограждения;*

б) *без учета монтажа;*

в) *с учета монтажа для финальной стадии монтажа*

Результаты исследований наглядно иллюстрируют необходимость учета в расчетах разгрузки грунта, а также последовательности стадий монтажа конструкций и разработки котлована.

### 3.3.3. Методы компьютерного моделирования процесса возведения большепролетных покрытий

Большепролетные покрытия – это типичный представитель строительных конструкций, для которых методы возведения, как правило, сильно влияют на сами конструктивные решения. Если большепролетное

покрытие возводится на подмостях (сборные железобетонные или стальные элементы, монолитное железобетонное покрытие на сплошной опалубке), то влияние способа возведения на окончательное напряженно-деформированное состояние конструкции мало сказывается. С точки зрения расчета в этом случае конструкцию можно рассматривать как не имеющую предыстории (созданную одномоментно), т. е. напряжения дислокационного характера отсутствуют. Но, как правило, для большепролетных покрытий (пролетом – 40-200 м и высоте над уровнем пола 10-30 м) устройство сплошных подмостей представляется дорогостоящим мероприятием. Поэтому монтаж в этом случае выполняется навесным способом.

Впервые численная реализация процесса возведения навесным способом была продемонстрирована в работе [56], где анализировались стадии монтажа квадратной в плане железобетонной оболочки двойной кривизны. Оболочка собирается из элементов 3x3 м. Все стадии монтажа показаны на рис. 3.17. Ввиду симметричности конструкции показана только половина покрытия до оси симметрии, а картина прогибов с учетом монтажа и при расчете оболочки по окончательной схеме (в предположении, что оболочка собрана на подмостях) показана на рис. 3.18.

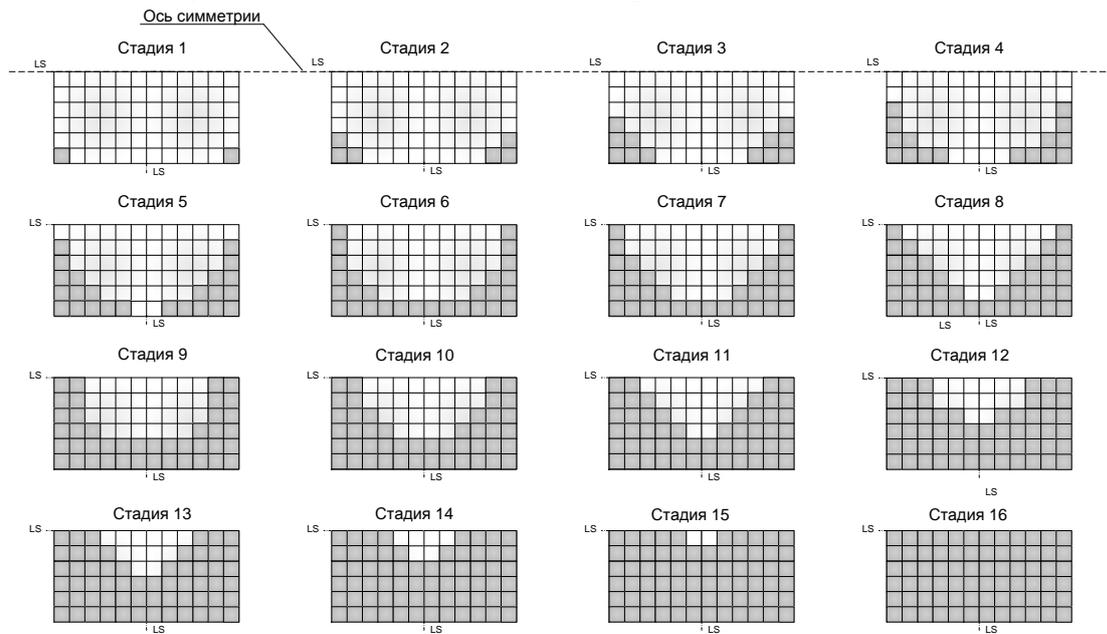


Рис. 3.17. Последовательность монтажа железобетонной сферической оболочки

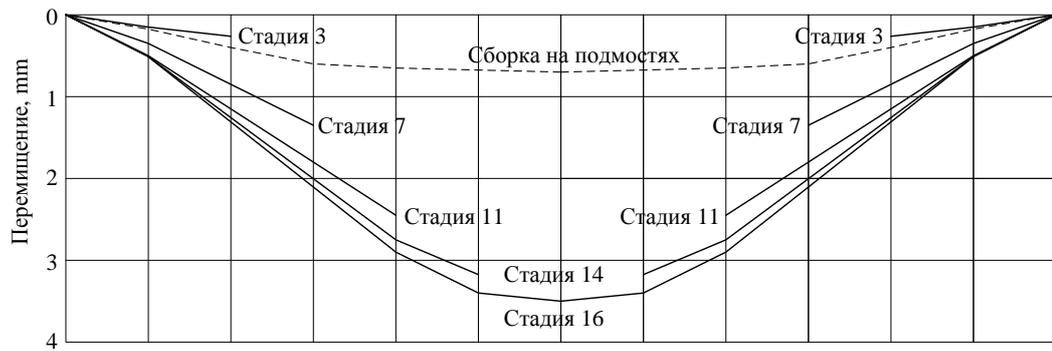


Рис. 3.18. Картина прогибов на различных стадиях монтажа железобетонной сферической оболочки

Монтаж висячих покрытий также содержит важные стадии возведения, которые оставляют свой след в НДС окончательно возведенной конструкции.

Так, возведение железобетонной висячей оболочки включает следующие основные этапы:

- ✓ возведение железобетонного контура;
- ✓ создание вантовой сети (натяжение вант на контур с целью придания сети проектного положения);
- ✓ навеска железобетонных плит;
- ✓ омоноличивание швов.

Такие конструкции в процессе возведения даже меняет схему своей работы: на этапах 2 и 3 она работает как вантовая сеть, а на 4 этапе после замоноличивания швов, она уже работает как оболочка.

Показательным в этом отношении является компьютерное моделирование возведения мембранного покрытия ледового стадиона в Коломне пролетом 200х110м (реальный объект) (рис. 3.19) [59].

Стальная мембрана толщиной 6 мм опирается на железобетонный бортовой элемент прямоугольного сечения, окаймленный стальным коробом, который в дальнейшем постадийно заполняется железобетоном. По контуру борт опирается на шарнирные опоры из стальных труб. Для придания большей жесткости бортовой элемент стягивается канатами, лежащими на мембране и расположенными вдоль длинной стороны мембраны.

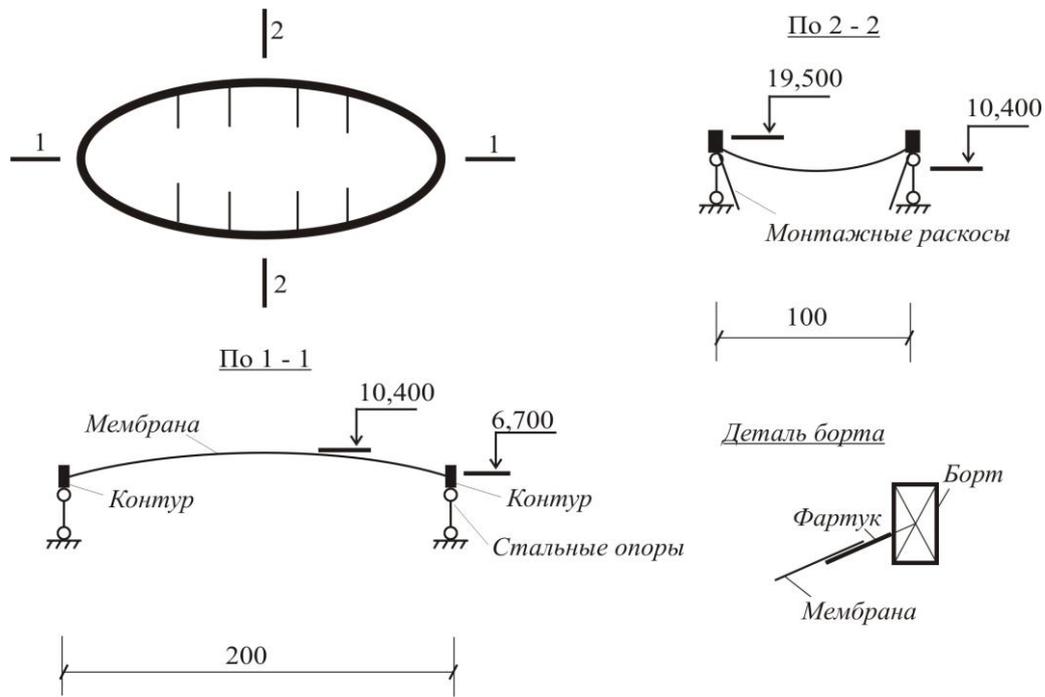


Рис. 3.19. Компьютерное моделирование возведение мембранного покрытия ледового стадиона в Коломне

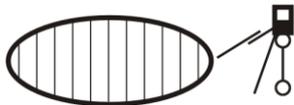
Компьютерное моделирование было проведено по ПК ЛИРА и включало следующие стадии:

1 стадия.



Монтируются колонны, коробка борта, фартук, раскосы. Расчет выполняется в линейно-упругой стадии на собственный вес установленных элементов.

2 стадия.



Монтируется поперечная постель, замоноличивается первый слой борта. Стальные полосы постели моделируются геометрически нелинейным растянутым стержнем. Бортовые элементы моделируются физически нелинейным сжато-изогнутым стержнем. Учитывается значительное кручение бортового элемента вызванного усилиями от навешиваемой постели. Расчет выполняется шаговым методом в физически и геометрически нелинейной постановке. Дополнительная нагрузка – собственный вес постели и замоноличенной части бортового элемента.

3 стадия.



Монтируется продольная постель, полностью замоноличивается бортовой элемент. Схема расчета аналогична стадии 2.

4 стадия.



Монтируется мембрана.

Мембрана моделируется четырехугольными и треугольными геометрически нелинейными конечными элементами мембраны. Расчет выполняется в физически и геометрически нелинейной постановке. Дополнительная нагрузка – собственный вес мембраны.

5 стадия.



Монтируются и преднапрягаются уложенные поверх мембраны канаты. Расчет выполняется в физически и геометрически нелинейной постановке. Нагрузка – собственный вес канатов и усилия преднапряжения. Преднапряжение моделируется специальным элементом – «форкопф». Учитывается проскальзывание канатов в узлах опирания на мембрану.

6 стадия. Демонтируются раскосы. Расчет выполняется в физически и геометрически нелинейной постановке на нагрузку, соответствующую усилиям в демонтируемых раскосах.

Дальнейший расчет на расчетные сочетания эксплуатационных нагрузок (снег, ветер, собственный вес кровли) выполняются не с «нулевого» НДС смонтированной конструкции, а с НДС соответствующего последней (шестой) стадии монтажа.

Ниже приведены некоторые иллюстрации расчетной схемы и результатов расчета:

KOLOMNA 100-4.I3d

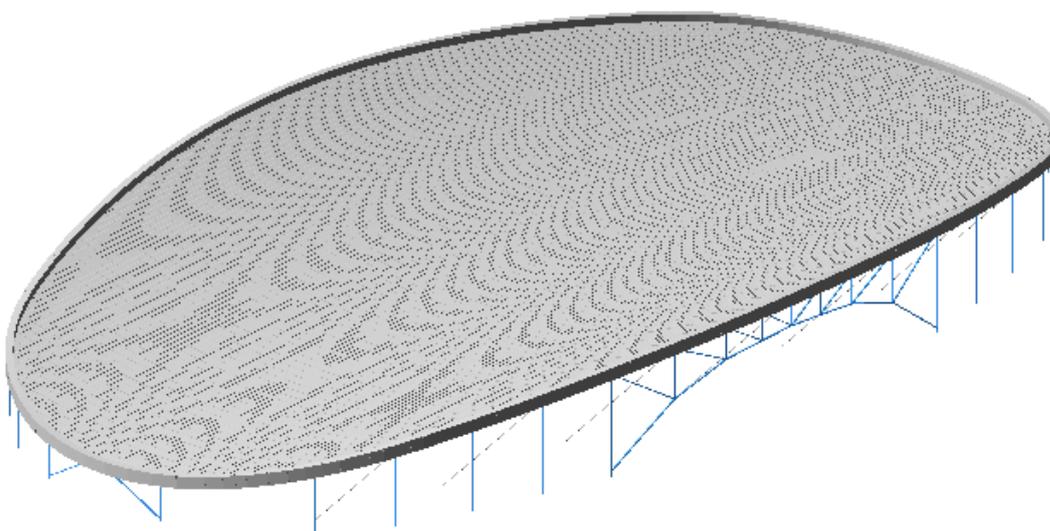


Рис. 3.20. Общий вид расчетной схемы на эксплуатационной стадии

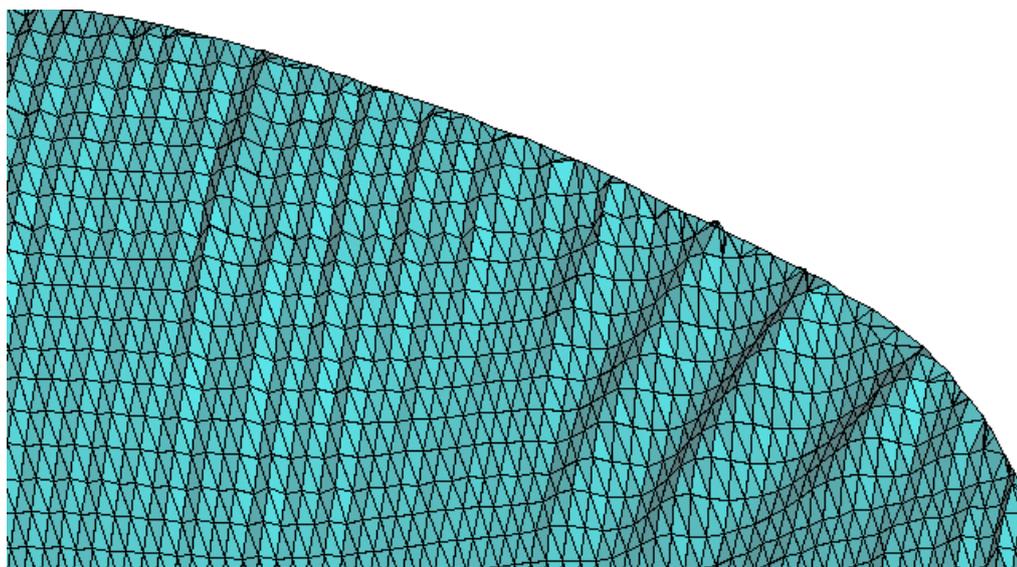


Рис. 3.21. Форма потери местной устойчивости мембраны в околоконтурной зоне

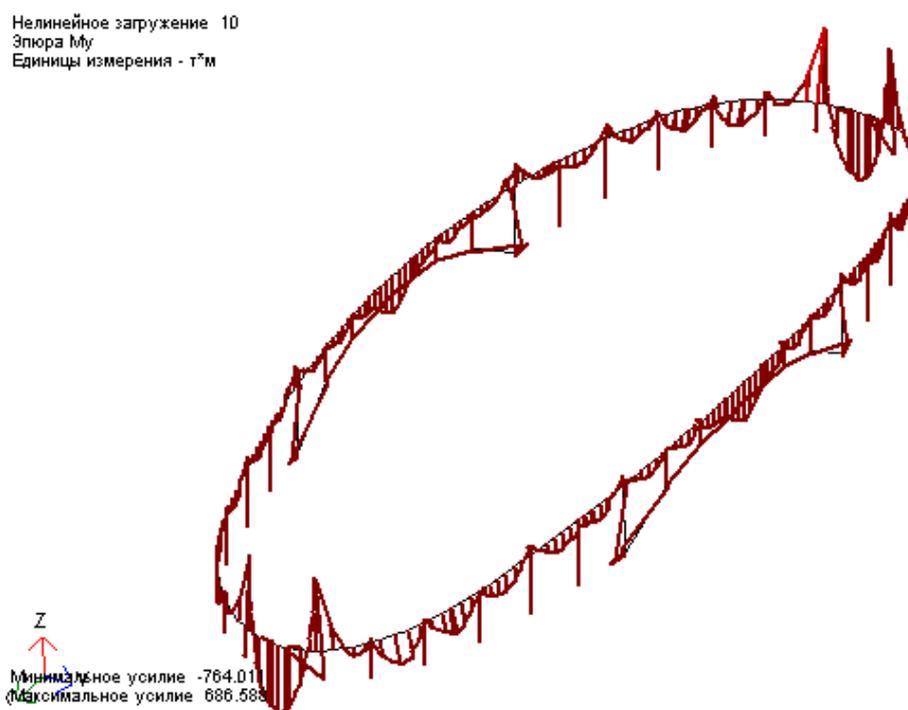


Рис. 3.23. Эпюра изгибающих моментов в элементах опорного контура

Проведённый анализ позволил дать следующие дополнительные практические рекомендации при проектировании сооружения.

Элементы «постели». Процесс монтажа и предварительного напряжения «постели» должен быть смоделирован численными расчётами, для получения в первую очередь полной информации по геометрии системы в контролируемых точках на всех этапах монтажа. Проектная длина элементов «постели» должна определяться с учётом их провиса, возможных допусков при изготовлении и монтаже;

Опорный контур. На основании анализа результатов выполненных многовариантных расчётов рекомендовано усиление опорного контура для снижения расчетных напряжений до допускаемых. Для надёжной совместной работы стальной опалубки и железобетонного сечения опорного контура с внутренней стороны стенок рекомендовано предусмотреть приварку арматурных анкеров.

Опорные стойки и арки. Рекомендовано усиление стоек и узлов их сопряжения с фундаментом и с опорным контуром с учётом значительных горизонтальных перемещений контура и, соответственно, больших углов поворота стоек в опорных узлах (стаканах). Обращено внимание на конструктивную проработку узлов опирания арок на фундаменты и сопряжения с контуром с точки зрения их работоспособности и надёжности.

Компьютерное моделирование по приведенной схеме не только повлияло на принятие ряда проектных решений, но и позволило сделать ряд рекомендаций по последовательности установки «постели», установки – демонтажа монтажных распорок, натяжению канатов, обеспечивающих допустимую деформативность конструкции и т.д. другое.

Проведенный расчет по описанной схеме можно рассматривать как компьютерное моделирование процессов жизненного цикла – процесса возведения и процесса приложения нагрузок в эксплуатационной стадии.

## **Глава 4 . КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ЭТАПА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА**

### **4.1. Анализ существующих подходов к моделированию зданий и сооружений для исследования несущей способности и процессов приспособляемости строительных конструкций**

Задача проектирования заключается в нахождении компромиссного решения многопараметрической задачи, т.е. достижение требуемого уровня безопасности (надежности) при рациональных затратах. Реализовано это может быть лишь при высококвалифицированном компьютерном моделировании, научном и экспериментальном сопровождении всех этапов жизненного цикла объекта строительства.

На стадии эксплуатации, самой продолжительной для строительных объектов, к несущей системе прикладываются временные нагрузки, изменяются свойства материала несущих конструкций. Эти изменения зависят от многих факторов, при этом материалы и конструктивные элементы проявляют нелинейный характер работы.

В процессе эксплуатации строительных объектов происходит старение конструкционных материалов, зависящее не только от времени, но и от различного рода аварийных и штатных ситуаций, техногенных воздействий. В связи с этим часто возникают вопросы, связанные с реконструкцией, демонтажем, утилизацией и капитальным ремонтом зданий. Для оценки безопасности здания необходимо знать историю его нагружения, схемы приложения внешних нагрузок, историю формирования усилий в конструктивных элементах, иметь возможность определить его НДС в любой момент времени. В последнее время часто возникают вопросы, связанные с реконструкцией или утилизацией жилых, общественных зданий и сооружений старой застройки. Это приводит к необходимости более точной оценки НДС несущих систем, так как с одной стороны необходимо обеспечить полную безопасность людей находящихся

в здании, а с другой обеспечить минимальные затраты на его возведение, эксплуатацию и утилизацию или реконструкцию.

В качестве руководящего принципа расчетов несущей способности строительных конструкций в настоящее время действует метод предельных состояний, который базируется на исследованиях Н.С. Стрелецкого, В.А. Балдина, В.М. Келдыша, И.И. Гольденבלата и др. [67, 159]. В основе метода лежит идея отказа от детального анализа всех состояний конструкции, кроме предельных, по отношению к которым и формулируются расчетные требования к объекту. Расчет по предельным состояниям положен в основу стандарта ISO и системы Еврокодов, где он называется «методом частных коэффициентов надежности» и где четко определена формулировка 1-го предельного состояния, которая целиком относится к физико-механическим явлениям и связана с безопасностью строительного объекта. Способы выполнения расчетов по предельным состояниям составляют главное содержание норм строительного проектирования и являются объектами многих научных исследований [165].

В практике проектирования, возведения и эксплуатации зданий и сооружений накоплен большой набор аналитических решений, на которых базируются основные нормативные документы и расчетные методики оценки несущей способности объектов строительства. Но СНиПы не предусматривают расчёт конструкций с развивающимися трещинами и дефектами и не позволяют прогнозировать поведение объекта в аварийных ситуациях.

Сложность моделирования процессов жизненного цикла строительных объектов для выполнения обоснованного расчёта и анализа с целью определения резервов несущей способности при наличии дефектов, или для выявления участков конструкции, в которых возможно появление и развитие трещин, требует работы с наукоемкими программными комплексами, одним из которых является программный комплекс нового поколения ЛИРА–САПР. ПК ЛИРА–САПР позволяет проводить численные эксперименты, моделирующие те или иные ситуации и процессы, в ходе которых выполнять сложные нелинейные расчёты, учитывать все особенности строительных конструкций, в том числе, наличие и развитие системы трещин или ухудшение свойств материалов, взаимодействие здания с грунтовым массивом, влияние времени и поэтапное изменение внешних нагрузок. Это даёт возможность специалисту получать наиболее

достоверные результаты расчёта при проведении численных экспериментов, существенно сокращая сроки и финансовые потери на производство работ.

Проблема безопасности сооружений и определения несущей способности конструкций здания, прогнозирования поведения в аварийных и предаварийных ситуациях (закритические нагрузки, нагрузки, не предусмотренные проектом, развитие системы трещин) являются весьма важными в строительном проектировании, а методы математического моделирования с применением современной вычислительной техники, современных программных комплексов и численных методов во многих случаях являются единственно возможным инструментом для проведения таких исследований.

Для выполнения расчетов и анализа реальное сооружение заменяется некоторой аппроксимирующей моделью, которая должна отражать основные особенности поведения этого сооружения под нагрузкой и позволять определять запасы прочности [172] и (или) вероятность разрушения. Эту модель называют расчетной схемой или расчетной моделью. Выбор расчетной схемы сооружения представляет собой моделирование его геометрической формы, действующих нагрузок, свойств материалов и механизмов разрушения элементов сооружения.

Многообразие конструктивных систем зданий (стенные, каркасные, ствольные) определяет многообразие их расчетных моделей. Обычно при изучении поведения сложной системы ее расчленяют на более простые подсистемы - фрагменты сооружения в виде плоских или пространственных рам, несущих стен, их фрагментов, плит перекрытий, фундаментов и т.п. При этом необходимо учитывать все существенные для каждого конкретного случая связи системы с внешней средой.

Построение расчетной схемы всегда является определенным компромиссом. Чтобы с помощью этой схемы можно было получить результаты, имеющие смысл и практическое значение (прикладное значение), она должна быть достаточно детальной и сложной. В то же время она должна быть достаточно простой, чтобы можно было получить решение при ограничениях, налагаемых на результат такими факторами, как адекватность исходной модели, доступное программное обеспечение, возможности анализа и осмысления получаемых результатов, а также сроки исполнения. Общие проблемы построения расчетных моделей строительных объектов неоднократно служили темой исследований, и их авторы

выдвигали разнообразные правила их построения [59, 121]. Модели и методы расчета должны исходить из форм деформаций и разрушений и при этом целесообразно иметь не одну модель, а систему аппроксимирующих моделей (принцип многомодельности [127]), каждая из которых имеет свои цели и границы применения. Принимаемые расчетные гипотезы должны ставить рассчитываемую конструкцию в менее благоприятные условия, чем те, в которых находится действительная конструкция.

#### **4.2. Особенности эксплуатационного периода (усиление, реконструкция и т.п.) для высотных зданий**

При рассмотрении эксплуатационного периода строительного объекта, более подробно остановимся на достаточно представительном классе объектов – высотные здания. В настоящее время высотные здания являются достаточно представительным, с одной стороны уникальным, с другой стороны очень распространенным и востребованным классом строительных объектов. Поэтому, внимание при рассмотрении проблем эксплуатационного периода будет уделено именно этому классу.

На современном этапе в строительном проектировании происходит переход от основополагающего критерия несущей способности конструкций к критерию безопасности строительных объектов для людей и окружающей среды на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта. Обеспечение безаварийной эксплуатации существующих зданий и сооружений предполагает умение прогнозировать их поведение при изменении условий эксплуатации и в аварийных ситуациях при частичной потере несущей способности, а для этого требуются высокопроизводительные программные комплексы.

Каждое здание, сооружение или отдельная конструкция имеет определенное назначение, эксплуатируется в определенных условиях и обязательно должно удовлетворять требованиям безопасности, т.е. требованиям предотвращения аварий и обрушений строительного объекта в целом или составляющих его частей, которые могут представлять опасность для здоровья и жизни людей, либо нанести ущерб окружающей среде или послужить причиной других аварийных ситуаций.

При эксплуатации высотных зданий, как объектов с повышенными требованиями к безопасности, надежности и социальной значимости, можно четко представить три стратегии:

- ✓ мониторинг технического состояния конструктивных элементов, инженерных систем, помещений и прилегающей территории;
- ✓ комплекс мероприятий по предупреждению преждевременного износа и оперативного управления параметрами среды обитания;
- ✓ стратегии, предусматривающие устранение (ликвидацию) физического и морального износа.

Каждая из перечисленных стратегий в значительной мере определяет объем, состав и сроки проведения других мероприятий, общую потребность в материальных и трудовых ресурсах, объемы материально-технического обеспечения. Избежать неоправданных рисков и потерь при эксплуатации высотных зданий можно только при применении научно обоснованных планов действий в различных возможных (даже теоретически) эксплуатационных ситуациях, которые должны быть сформулированы еще при проектировании и возведении высотного здания.

Основными документами, определяющими этапы эксплуатации, являются «проект технической эксплуатации высотного здания» и «правила технической эксплуатации высотного здания». Проект технической эксплуатации разрабатывается одновременно с выполнением рабочих чертежей на сооружение здания и определяет: наиболее ответственные за безопасность и жизнеобеспечение конструкции и элементы инженерных систем; возможные изменения их первоначальных параметров и проявление подобных изменений; допустимые отклонения первоначальных параметров; принципы определения соответствия фактического состояния элементов здания их проектным значениям. Кроме того, в проекте эксплуатации целесообразно разрабатывать технологические схемы по замене и демонтажу конструкций и инженерного оборудования, в том числе по демонтажу здания в целом.

Правила технической эксплуатации высотных зданий выполняют две функции. Во-первых, в них должны быть отражены критерии оценки качества эксплуатационного процесса. Должны быть сформулированы требования к качеству всех конструктивных элементов и систем жизнеобеспечения высотного здания.

Второе назначение правил технической эксплуатации заключается в регламенте принципиально важных эксплуатационных действий, обеспечивающих безопасность функционирования здания и вытекающих из проекта технической эксплуатации, а также методах контроля выполнения этих действий.

Высотные здания, проектируемые в современных условиях, имеют ряд принципиальных отличий, от зданий, которые проектировались десять лет назад [41]. Таким образом, не накоплено достаточно опыта эксплуатации таких зданий. Это касается большей высоты проектируемых зданий, а также принципиально новых конструктивных решений и инженерных систем. По нагрузкам и воздействиям, учитываемым при проектировании, новые высотные здания можно рассматривать как аналоги существующих. Однако, реакция проектируемых зданий на случайные агрессивные воздействия со стороны окружающей среды, пользователей и др. в настоящее время изучена недостаточно и, следовательно, труднопредсказуема.

Чрезвычайно сложно обеспечить безаварийную работу зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. Здесь требуется более полный учет совместной работы основания, фундаментов и подземной части здания; внедрение последних достижений науки и техники в восстановление эксплуатационных качеств конструкций, в обеспечении их безаварийной работы, в прогнозировании развитий процессов в грунтах и конструкциях.

В ряде случаев на конструкцию действуют повышенные или высокие технологические или аварийные температуры, вызывающие снижение прочности и деформативных свойств материалов. В последнее время возросла интенсивность динамических нагрузок и воздействий.

К числу особых относятся условия строительства вблизи существующих зданий и сооружений. Участились случаи аварий и аварийных ситуаций вследствие не учета взаимного влияния рядом расположенных зданий.

Под строительством в таких условиях следует понимать комплекс работ, связанных с исследованием, проектированием и устройством оснований и фундаментов на слабых водонасыщенных, глинистых и заторфованных грунтах, торфах и илах, просадочных и вечномерзлых, набухающих и засоленных, пучинистых и неравномерно сжимаемых грунтах, рыхлых песках и плывунах, закарстованных и подрабатываемых территориях, с учетом сейсмических и динамических воздействий и т.п.

На основания, конструкции, здания и сооружения действует комплекс неблагоприятных факторов, снижающих прочность и долговечность. Так, на бетон и железобетон оказывают влияние многочисленные физические и механические воздействия. К числу физических воздействий относятся: замораживание и оттаивание наружных поверхностей; термический удар; истирание бетона сыпучими материалами (в бункерах) или транспортом (в полах и дорогах); повреждения от быстротекущей воды; термический удар, вызванный внезапным и резким падением температуры бетона (при расплескивании сжиженных газов).

К числу аварий, вызванных деятельностью человека, относятся: взрывы газа, пожары, теракты, наезды транспорта, дефекты строительства и эксплуатации, неквалифицированная их реконструкция с надстройкой, пристройкой, перепланировкой, иногда сопровождающая ослабление или перегрузку несущих элементов; природные явления (землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований).

Особые условия строительства и эксплуатации значительно ускоряют процесс разрушения и развития дефектов [94, 95]. Повысить срок службы зданий и сооружений и предотвратить аварийные ситуации является важнейшей задачей проектировщиков и строителей.

Важнейшим условием обеспечения безопасности при эксплуатации высотных зданий и сохранения проектных показателей качества среды обитания в них является научно обоснованное использование стратегии назначения условий (или моментов времени) проведения плановых капитальных ремонтов, обеспечивающих полное восстановление первоначальных свойств конструкций и инженерного оборудования. Поэтому на стадии проектирования высотного здания, выполнив системный анализ проектных решений, используемых материалов, оборудования и технологий и, опираясь на существующий математический аппарат необходимо рассчитывать перспективные планы ремонтов, которые являются основой проекта технической эксплуатации высотных зданий.

Немаловажным условием для надежной и безопасной работы является проведение мониторинга зданий и сооружений в процессе их строительства и эксплуатации. Общей целью мониторинга объектов является проведение долговременного контроля нагрузок, усилий, перемещений, деформаций конструкций, напряжений в контрольных сечениях для установления соответствия фактического напряженно-

деформированного состояния конструкций расчетным данным и рабочему проекту. Кроме того, в результате мониторинга могут быть обнаружены критические и предаварийные состояния наблюдаемых сооружений. При проведении мониторинга решаются следующие основные задачи:

- ✓ выбор объектов контроля, определение в них основных сечений и назначение контрольных точек на объектах наблюдения;
- ✓ разработка методов определения контролируемых параметров, выбор серийных или разработка индивидуальных технических средств контроля, изготовление и установка их на объекте;
- ✓ проведение визуальных, инструментальных наблюдений и определение фактических перемещений, деформаций, напряжений, усилий в контролируемых конструктивных элементах;
- ✓ оценка технического состояния конструкций по данным натурных наблюдений и результатам расчетов.

По результатам анализа данных, полученных в ходе мониторинга, делается заключение о техническом состоянии объекта. В соответствии с нормами его можно считать: исправным, когда выполняются все требования действующих норм и проекта; работоспособным, при котором обеспечивается нормальная эксплуатация здания в конкретных условиях с отсутствием дефектов и повреждений, несмотря на выявленные отступления от норм; ограниченно работоспособным; неработоспособным (недопустимым).

Техническое состояние определяется с помощью различного программного обеспечения. В практику разработки новых конструктивных решений и создания конструкторской документации активно вошли системы автоматизированного проектирования, представляющие собой мощные интегрированные системы, позволяющие в короткие сроки обеспечивать не только конструкторскую разработку строительной документации, но также и выполнить оценку технического состояния несущих конструктивных элементов на эксплуатационном этапе жизненного цикла. Разработка методов обеспечения безопасности приводит к необходимости создания и использования автоматизированных средств анализа поведения конструкции в процессе её эксплуатации.

Анализ поведения конструкции под действием внешних сил является основным для разработки рациональных инженерных конструкций, обеспечения их прочности и надежности во время эксплуатации. Для

автоматизированного выполнения такого анализа разработано и используется достаточно много программных продуктов разной степени сложности, отличающихся по своим возможностям. Анализ результатов работы программных средств показывает, что как прочностные, так и деформационные характеристики проектируемой конструкции могут быть определены со значительными погрешностями, превышающими принятые в конструкторской практике допустимые пределы. Даже с учетом используемых обычно коэффициентов запаса прочности такие конструкции могут работать в предельной стадии, при этом изменение режима их работы может легко привести к разрушению. Поэтому обоснованно принимать конструктивные решения на основе данных анализа работы конструкции с использованием программных продуктов, обеспечивающих адекватные компьютерные модели исследуемых конструкций.

#### **4.3. Моделирование системы «наземная часть – фундаментная конструкция – грунтово-свайное основание»**

В процессе эксплуатации здание может претерпеть множество внешних воздействий, не предусмотренных первоначальным проектом. Такие дополнительные воздействия могут быть связаны, например, с его надстройкой, прокладкой возле него глубоких коммуникаций, устройством подземного перехода или строительством тоннелей метрополитена, со сложной реконструкцией соседнего здания или возведением нового здания. Конечно же, маловероятно, что все эти воздействия сконцентрируются вокруг одного здания, но нельзя исключать и проявления каких-либо двух–трех из них.

В таких случаях нормативные документы не гарантируют правильность определения осадки сооружения, исходя из линейных расчетов, и только использование нелинейных моделей грунта может дать возможность адекватного представления о работе сооружения [64]. Необходимость совместного расчета системы «наземная часть – фундаментная плита – грунтовое основание» продемонстрирована в разделе 3.1, рис.3.1.

С активным внедрением в инженерную практику компьютерных технологий широкое распространение получили модели основания в виде системы конечных элементов. При наделении каждого элемента или группы

элементов, а также сопряжения между ними теми или иными физико-механическими характеристиками можно смоделировать любую структуру грунтового основания, соответствующую параметрам грунтового массива, полученным в результате полевых и лабораторных испытаний. Основная проблема построения пространственной картины напластования грунтов связана с тем, что данные геологических изысканий обычно представляются по результатам, полученным для некоторого количества скважин. Характер залегания пластов грунта на удалении от скважин при этом в точности не известен и может быть определен только с некоторой долей вероятности. Такая модель основания, особенно при расчетах зданий совместно с основанием, весьма трудоемка, ее точность напрямую зависит от объемов и программы инженерно-геологических изысканий грунтового основания. Но именно она позволяет учитывать неоднородность свойств в пространстве и возможную нелинейность поведения разных слоев грунта, наиболее точно отобразить распределительную способность грунтового основания и получить картину его деформирования под нагрузкой [18].

Существует множество других моделей механического поведения грунта под нагрузкой, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. Ни одна из рассмотренных или не отраженных здесь моделей не является универсальной и находит применение лишь для тех или иных конкретных типов грунтов.

Рассматривая критерии разрушения грунта, следует отметить, что в соответствии с требованиями нормативных документов основания должны рассчитываться по двум группам предельных состояний: по 1-й группе – по несущей способности (в отдельных, указанных особо случаях [117, 118, 119] и 2-й группе – по деформациям (во всех случаях).

Целью расчета по деформациям является ограничение абсолютных и относительных перемещений фундаментов и надфундаментных конструкций такими пределами, при которых гарантируется нормальная эксплуатация зданий. Целью расчета оснований по несущей способности является обеспечение прочности и устойчивости оснований, а также недопущение сдвига фундамента по подошве и его опрокидывания. Для грунтовых массивов наиболее опасным является нарушение сцепления за счет сдвига, и при оценке несущей способности грунта в качестве критерия обычно используют условие текучести Кулона-Мора, Кулона-Фадеева.

Математические модели механического поведения рассмотренных материалов не могут считаться законченными и продолжают развиваться в новейших исследованиях.

ПК ЛИРА–САПР предоставляет пользователю возможность отказаться от гипотез линейной теории упругости, и проводить расчет грунтового массива с учетом нелинейной теории Кулона-Фадеева, учитывая при этом имеющиеся особенности грунтового массива – карсты, неоднородности и неупругие свойства грунта (кривая разгрузки не совпадает с кривой нагрузки) и т.п. Удобство задания исходных данных и быстрое действие процессора ПК ЛИРА–САПР делает возможным использование таких подходов в практических расчетах [32, 86].

В ПК ЛИРА–САПР реализована методика позволяющая определять дополнительные осадки существующих зданий при проектировании в зонах с плотной застройкой.

Опасна не столько сама осадка, сколько ее неравномерность. Поэтому перед строителями-проектировщиками всегда стоит задача: предусмотреть меры, при которых неравномерное оседание основания не привело бы к недопустимым деформациям здания или сооружения.

Исходя из прочностных расчетов, можно иногда получить площадь фундаментной плиты настолько большой, что она превысит площадь пятна здания и помешает строительству соседних зданий. Может также случиться, что при определении размеров основания надо иметь в виду не тот грунт, на котором будет установлено сооружение, а слой, залегающий намного глубже. И если этот слой окажется сильно сжимаемым и достаточно мощным, то осадка будет настолько значительной, что предотвратить ее не удастся.

Неравномерные деформации основания являются следствием силовых воздействий на фундамент вследствие неоднородной структуры грунта, различной мощности слоев грунта или же деформационных воздействий: сложного деформирования земной поверхности вследствие замачивания лессовых просадочных, засоленных и набухающих грунтов, подработки угольных, калийных и рудных месторождений, карстовых и тектонических явлений.

Примеры деформаций зданий и сооружений, вызванных недооценкой сложных грунтовых условий строительства, приведены в многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов.

При анализе этих примеров обнаруживается соответствие форм деформаций зданий и сооружений, построенных в разнообразных условиях. Независимо от причин, приводящих к деформации грунтов, все виды воздействий со стороны оснований на здание сводятся к неравномерным вертикальным и горизонтальным перемещениям оснований.

Следствием неравномерных вертикальных перемещений основания являются наблюдаемые крены сооружений, различные формы деформаций изгиба, сдвига и кручения. Деформации эти проявляются как в чистом виде, так и в различных сочетаниях: кручение с изгибом, крен с изгибом, сжатие с кручением и т.п. Неравномерные горизонтальные перемещения основания оказывают воздействие на подземные части сооружений в виде сдвигающих сил по боковым поверхностям и по подошве фундамента, а также в результате нормального давления сдвигающего грунта на лобовые поверхности фундаментов.

Наиболее опасным для сооружения является нарушение устойчивости основания, сопровождаемое выпором из-под фундамента массива грунта, значительными осадками и кренами сооружения, приводящими, как правило, к его полному разрушению. По этой причине известны многие случаи аварий.

Рассмотрим некоторые методы расчета зданий совместно с грунтовым основанием, при учете сейсмических воздействий. Как уже говорилось, конструктивная безопасность включает в себя пространственное представление системы «наземная часть – фундамент – грунтовое основание». При этом система должна быть законструирована таким образом, чтобы обладать способностью перераспределения усилий при разрушении отдельных конструктивных элементов и выведения из работы некоторых связей, т.е. чтобы локальные повреждения не вызывали глобального обрушения. Связи данной системы с основанием, т.е. источники сейсмических воздействий, не должны передавать негативные воздействия от основания на фундамент здания (сооружения), или, по крайней мере, должны их уменьшать. Предлагается три метода компьютерного моделирования такой системы. (рис. 4.1) Первый метод (рис. 4.1 а) является наиболее упрощенным, основание моделируется упругим, что обеспечивается заданием коэффициента постели  $C_1$ . Модель может быть двумерной и трехмерной. Второй метод (рис. 4.1 б) заключается в моделировании грунтовых элементов, согласно полученным

геологическим испытаниям, задания послойно грунтовых элементов с их реальными физическими характеристиками, при этом рассматривается представительная расчетная схема. Третий метод (рис. 4.1 в) заключается в построении трехмерной модели здания совместно с трехмерной моделью грунта. Третий вариант модели является более точным, но при необходимости учета нелинейных характеристик грунта, расчет на динамические воздействия может быть достаточно длительным.

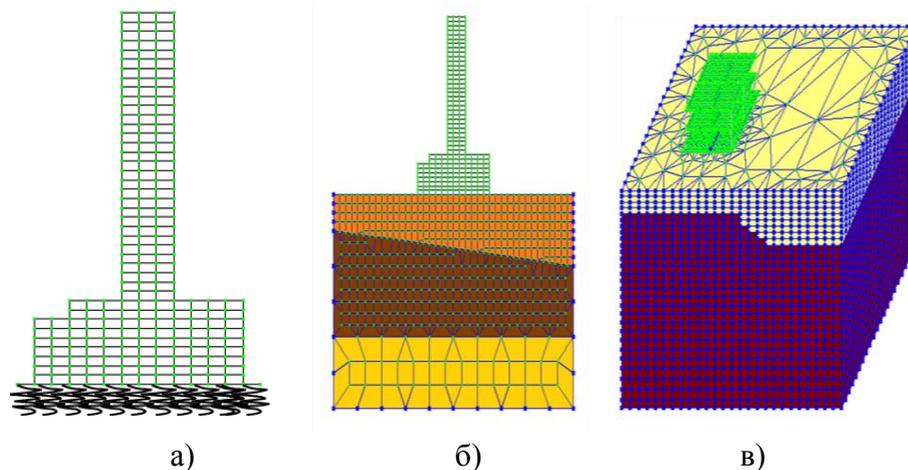


Рис. 4.1. Варианты компьютерного моделирования системы «надземная часть – основание – грунт»;

- а) 2D-модель с учетом основания при помощи коэф.  $C1$ ;
- б) 2D-модель с учетом основания при помощи 2D-грунтовых элементов;
- в) 3D модель с учетом основания при помощи 3D грунтовых элементов

#### 4.4. Влияние проектируемых новых зданий на существующую окружающую застройку

Проблема влияния нового строительства на прилегающую застройку возникла одновременно с возникновением городов.

При возведении нового объекта на застроенной территории необходимо учитывать его воздействие на существующие сооружения окружающей застройки с целью предотвращения их недопустимых дополнительных деформаций.

Во многих случаях строительство новых зданий на площадках с плотной застройкой приводит к деформациям, а иногда и разрушениям

близрасположенных существующих зданий. Поэтому важной задачей является задача обеспечения надежности существующих зданий при строительстве новых зданий любой конфигурации на участках с различными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями [47, 75].

Особенности проектирования оснований и фундаментов новых зданий и разработки мероприятий по сохранению надежности существующих зданий в условиях плотной застройки требуют тщательного рассмотрения и учета характеристик проектируемых зданий и возможных конструкций их фундаментов, а также технических характеристик и состояния конструкций существующих зданий.

Для оценки влияния проектируемых новых зданий на существующую окружающую застройку в системе ГРУНТ программного комплекса ЛИРА-САПР реализованы алгоритмы вычисления осадок, кренов и перекосов существующих и проектируемых зданий в соответствии с различными нормативными документами. Параметры жесткости грунтового и свайного основания определяются в соответствии с моделями Винклера и Пастернака.

На основании характеристик грунта (координаты и характеристики слоев грунта в каждой скважине) формируется пространственная модель грунта, а по отметкам устьев скважин выстраивается рельеф поверхности. При этом предполагается, что рельеф является достаточно гладким (рис. 4.2). Контроль заданных параметров может осуществляться с помощью отображения геологических разрезов, которые выстраиваются вдоль отрезка прямой, проведенной в любом месте заданной площадки строительства.

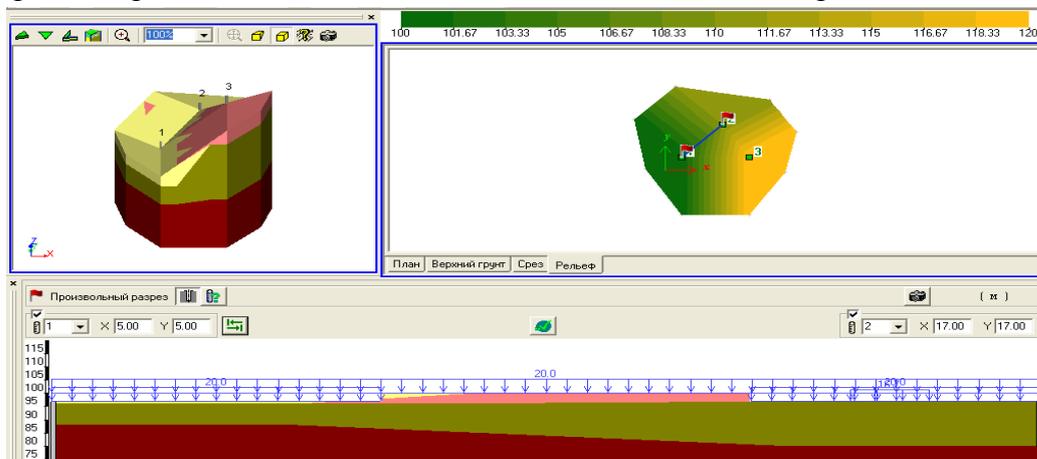


Рис. 4.2. Пространственная модель грунта

На заданной площадке строительства располагаются произвольные полигональные контуры фундаментов и/или свайных ростверков проектируемых сооружений, а также контуры фундаментов существующих зданий. Задаются также параметры ростверка и свай.

В пределах каждого контура задаются нагрузки, прилагаемые в уровне отметки подошвы соответствующего фундамента (рис. 4.3). Нагрузки могут быть заданы и в произвольном месте площадки. Допускаются следующие виды нагрузок – сосредоточенные силы, равномерно распределенные нагрузки по всей области контура и равномерно распределенные нагрузки по произвольно очерченному контуру (штамп).

Внешняя нагрузка на свайный фундамент может быть распределена по нескольким уровням вдоль длины свай, что дает возможность плавного накопления осадки. Полная нагрузка регулируется тремя коэффициентами. Коэффициент  $K_1$  соответствует доле нагрузке, приходящей на уровень подошвы ростверка. Коэффициент  $K_2$  соответствует доле нагрузки, действующей вдоль длины свай. Кроме того, доля нагрузки вдоль свай ( $K_2$ ) может быть еще равномерно разбита на несколько нисходящих подуровней. Коэффициент  $K_3$  соответствует доле нагрузки, приходящей на уровень заделки свай в грунт. Сумма этих коэффициентов должна быть равной единице [143, 178].

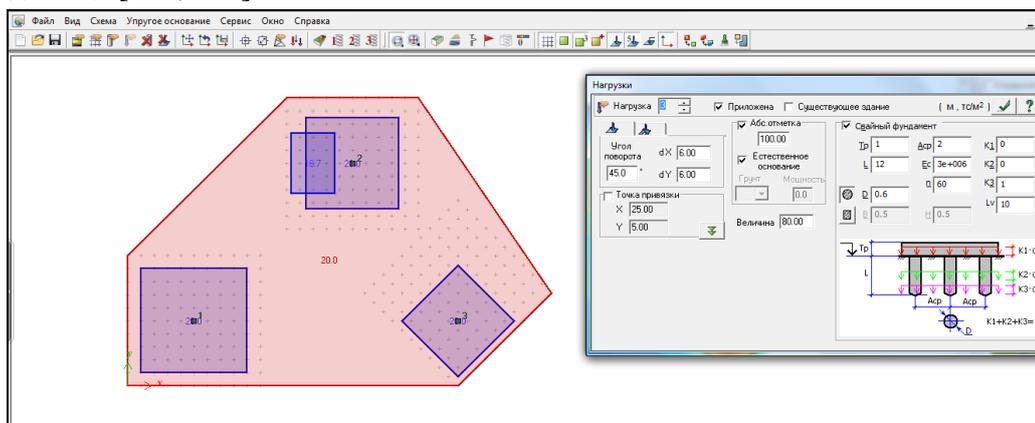


Рис. 4.3. Задание нагрузок на основание

Для выполнения вычислений осадок грунта под проектируемыми фундаментами и свайными ростверками производится триангуляция областей, ограниченных заданными контурами. В узлах триангуляции, шагом которой можно управлять, вычисляются все необходимые параметры.

В соответствии с приложенными нагрузками определяются осадки. При этом учитываются положения действующих в Украине и России норм по проектированию оснований зданий и сооружений и свайных фундаментов – ДБН В.2.1-10:2009, СНиП 2.02.01-83, СП 50-101-2004, СП 22.13330.2011 и СП 24.13330.2011 [117, 118,119]. Процедура определения влияния вновь строящегося здания на существующие строения реализована в программе, входящей в электронный справочник инженера ЭСПРИ [178].

В автоматизированном режиме выполняются вычисления следующих параметров:

- ✓ определение полей осадок грунтового и свайного оснований для существующих и проектируемых зданий в соответствии с заданными нагрузками и инженерно-геологическими условиями;
- ✓ определение границы сжимаемой толщи в соответствии с условиями различных нормативов;
- ✓ вычисление коэффициентов постели упругого (грунтового) основания  $C_1$  и  $C_2$  в соответствии с моделями грунта Винклера и Пастернака;
- ✓ вычисление разностей осадок, а также перекосов фундаментов существующих зданий с учетом влияния проектируемых сооружений.

Вычисление осадок  $S$  производится методом послойного суммирования с использованием схемы линейно-деформируемого полупространства (задача Буссинеска) по формуле  $S = 0.8W$  (рис. 4.4).

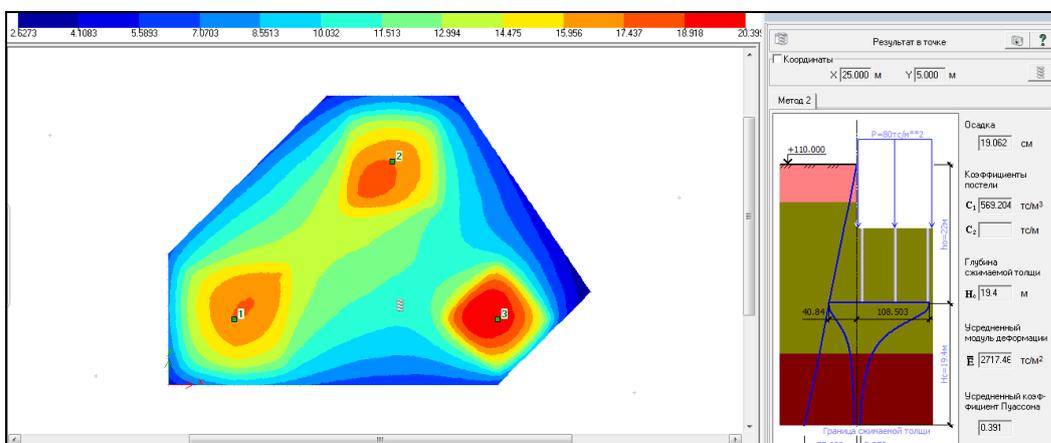


Рис. 4.4. Изополя осадок и эпюра вертикального напряжения.

Достижение границы сжимаемой толщи  $H_c$  регулируется выполнением условия

$\sigma_{zp} = k \cdot \sigma_{zg}$  с помощью задаваемого коэффициента глубины сжимаемой толщи  $k$ .

Вычисляются следующие слагаемые осадки:

$$W1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) \cdot h_i}{E_i}; \quad W2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{zy,i} \cdot h_i}{E_{ei}}; \quad W3 = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{zp,i} \cdot h_i}{E_{ei}},$$

где  $E_i$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви первичного нагружения;

$E_{ei}$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения;

по умолчанию  $E_{ei} = E_i$ ;

$\sigma_{zp,i}$  – напряжение в  $i$ -том слое грунта от внешней нагрузки;

$\sigma_{zy,i}$  – напряжение в  $i$ -том слое грунта от собственного веса;

$n$  – количество подслоев грунта от подошвы фундамента до глубины сжимаемой толщи  $H_C$ .

Если собственный вес грунта на уровне подошвы больше среднего давления под подошвой, то  $W = W3$ , иначе  $W = W1 + W2$ .

Для вычисления коэффициентов постели используются усредненные (в пределах зафиксированной глубины сжимаемой толщи  $H_C$ ) значения модуля деформации  $E_{ГР}$  и коэффициента бокового расширения  $m_{ГР}$ . Эти значения вычисляются по формулам.

$$E_{ГР} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i h_i}{H_C}; \quad m_{ГР} = \frac{\sum_{i=1}^n \nu_i h_i}{H_C}$$

В результате работы системы ГРУНТ выполняется построение изополей осадок, границ сжимаемой толщи, коэффициентов постели Пастернака и Винклера. Выполняется построение эпюр вертикальных напряжений в любой точке приложения нагрузки (рис. 4.4, 4.5).

Осадка свайного поля определяется как осадка условного фундамента. Такой подход позволяет добиться плавного накопления осадки условного фундамента. Расчет осадки свайного фундамента, как условного, выполняется при  $K1, K2 = 0$  и  $K3 = 1$  строго в соответствии с нормами.

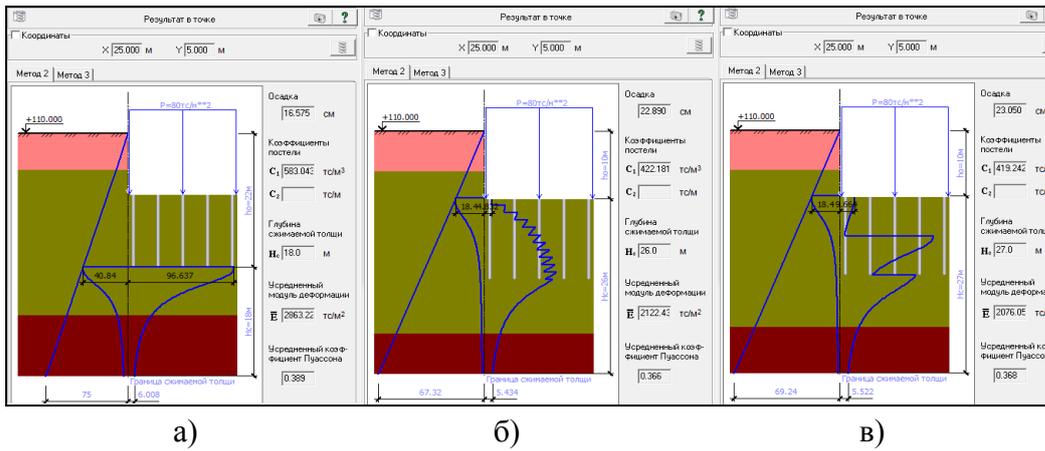


Рис. 4.5. Эпюра вертикального напряжения при различном распределении нагрузки вдоль свай.

Если внешняя нагрузка на свайный фундамент задана на несколько уровней, то эпюра напряжений от нее будет иметь ступенчатый вид, отражающий уровни приложения соответствующих долей нагрузки. Так, на рис. 4.5, а показана эпюра вертикального напряжения при  $K1 = 0, K2 = 0, K3 = 1$ . На рис. 4.5, б показана эпюра вертикального напряжения при  $K1 = 0.05, K2 = 0.9, K3 = 0.05$ . Причем,  $K2$  разбит еще на 10 подуровней (может изменяться по желанию пользователя). На рис. 4.5, в показана эпюра вертикального напряжения при  $K1 = 0.1, K2 = 0.6, K3 = 0.3$ .

По результатам вычисления осадок предоставляется возможность вычисления их разностей между существующими и проектируемыми фундаментами. Определяются также перекосы фундаментов существующих зданий, возникающие от проектируемых сооружений (рис. 4.6). Перекосы вычисляются между парами точек, заданных пользователем.

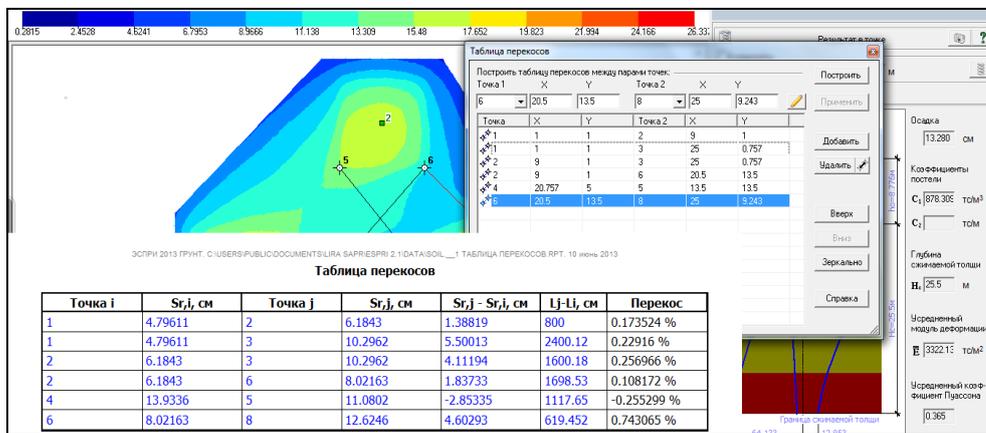


Рис. 4.6. Таблицы осадок и перекосов.

Таким образом, методика, реализованная в системе ГРУНТ, позволяет производить экспертную оценку осадок, кренов и перекосов сооружений, как на естественном, так и на свайном основании и оценивать влияние проектируемых новых зданий на существующую окружающую застройку.

#### **4.5. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния конструкций во времени**

Строительный объект на стадии эксплуатации проходит три важных этапа:

1. Этап эксплуатации объекта без снижения надежности (возрастает прочность бетона, происходят деформации ползучести и усадки и т.п.). Продолжительность этого этапа зависит от качества работ, произведенных на стадиях изготовления конструкций и возведения здания.

2. Этап перераспределения внутренних усилий (появляются дефекты, трещины, изменяются свойства железобетона и т.п.). Продолжительность данного этапа зависит от качества восстановительных работ и своевременного выявления несоответствий работы конструкций.

3. Этап определения эксплуатационной пригодности объекта (возникают аварийные и нештатные ситуации, снижаются запасы прочности и надежности конструкций, изменяются жесткостные характеристики и т.п.). На данном этапе решается вопрос о дальнейшей эксплуатации объекта после проведения определенных мероприятий по его восстановлению или вопрос его утилизации.

Таким образом, на каждом этапе эксплуатации для принятия конструкторских решений возникает необходимость в определении напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов. Для более точного его определения нужно выявить характерные точки по напряжениям и деформациям (усилиям и перемещениям), которые были определяющими на той или иной стадии жизненного цикла объекта. Только в этом случае можно с уверенностью принимать решения, касающиеся эксплуатационной пригодности несущих систем. Это становится возможным при учете фактора времени.

Надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций и сооружений не может быть обеспечена без учета важных

особенностей деформирования бетона. Реологические свойства бетона, обусловленные, в основном, его свойством ползучести, оказывают большое влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции во времени, даже если внешняя нагрузка не претерпевает особых изменений. Так, с течением времени происходит перераспределение усилий между сильно и слабо нагруженными элементами, между арматурой и бетоном в сечениях элементов [72, 73].

Нарастание перемещений во времени также оказывает существенное влияние на НДС конструкции, изменяющееся с течением времени. Особенно это сказывается для таких конструкций, как пологие железобетонные оболочки, для которых уменьшение стрелы подъема может сказаться на увеличении усилий в несколько раз и привести к аварии. Прогнозирование длительного деформирования бетона во времени является актуальным, т.к. от правильного учета этих особенностей бетона и железобетона при проектировании зависит надежность и долговечность сооружений, а также соответствие сооружения предъявляемым к нему требованиям.

Необходимо отметить, что проектируемое сооружение кроме надежности, безопасности и экономической целесообразности должно обеспечить функциональную пригодность. Определение функциональной пригодности сооружений невозможно без правильного прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном и арматурой происходящего вследствие ползучести бетона.

Действующие нормы проектирования практически не учитывают фактор времени и срок службы в расчетах несущих конструкций. Однако, с течением времени железобетонные конструкции изменяют свои жесткостные характеристики, в частности снижаются прочность и модуль упругости бетона.

Напряжения в арматуре и бетоне следует определять по расчетным диаграммам состояния материалов исходя из суммарных относительных деформаций от всех воздействий, включая начальные и развивающиеся в процессе эксплуатации конструкции (усадка, ползучесть, набухание, предварительное напряжение, самонапряжение и т. п.).

Развивающийся во времени процесс разрушения связывают с явлением ползучести, вследствие чего происходит накопление повреждений. Кривую длительной прочности строят в координатах напряжение-время до разрушения для данного напряжения. В двойных логарифмических

координатах часто получают два отрезка прямых. Первый участок соответствует вязкому разрушению при высоких уровнях нагрузок, второй участок соответствует хрупкому разрушению в результате накопления микротрещин в межзеренных образованиях.

Несущая способность эксплуатируемой конструкции может быть точно установлена лишь при ее разрушении, что неприемлемо с практической точки зрения, а неразрушающие методы контроля дают лишь косвенную информацию о состоянии объекта. Поэтому важным моментом становится проведение численного эксперимента по определению действительного напряженно-деформированного состояния.

Решение проблемы основывается на методах компьютерного моделирования, позволяющих максимально приблизить модель к реальным условиям работы конструкции.

Методы расчёта, основанные на классических аналитических методах, не всегда позволяют полностью обеспечить выполнение данных требований. В связи с этим создаются методы расчёта максимально приближенные к реальным условиям. Поэтому большое значение приобретает выбор математических моделей адекватно описывающих работу конструкции при учете изменяющихся со временем жесткостных характеристик.

Значение длительной прочности бетона получают экстраполяцией опытных данных:

$$\eta u = \sigma u / Rb - 0,04lgt, \quad (4.1)$$

где  $\eta u$  длительная прочность бетона

$\sigma u$  – напряжение

$Rb$  – нормативное сопротивление бетона.

$t$  – время выдержки старого бетона под действием длительной нагрузки;

Программный комплекс ЛИРА–САПР предоставляет возможность проведения расчетов с учетом ползучести. В этом комплексе учет ползучести реализован на основе модифицированной теории старения [182, 183] согласно которой касательный (тангенциальный) модуль упругости зависит от начального модуля упругости  $E_{cm}$ , относительной влажности среды  $RH$ , времени эксплуатации  $t$  и напряжения в бетоне  $\sigma$ :

$$E_c = f(E_{cm}, RH, t, \sigma). \quad (4.2)$$

Эту зависимость можно выразить с помощью коэффициента ползучести  $\varphi(t, t_0)$ :

$$E_c = \frac{E_{cm}}{\varphi(t, t_0)}. \quad (4.3)$$

Ползучесть и усадка бетона зависят, в основном, от относительной влажности окружающей среды. На ползучесть и усадку бетона также оказывает влияние геометрические размеры конструктивного элемента и состав бетона, степень зрелости бетона (начальная прочность) при первоначальном приложении нагрузки, а также продолжительность нагружения и величина нагрузки.

Коэффициент ползучести  $\varphi(t, t_0)$  связан с касательным (тангенциальным) модулем упругости  $E_c$ , который может быть принят равным  $1,05E_{cm}$ . ( $E_c = 1,05 E_{cm}$ ), где  $E_{cm}$  – модуль деформации.

Если особая точность не требуется, то в качестве предельной характеристики ползучести  $\varphi(\infty, t_0)$  может быть принято значение от **0,95**, при условии, что бетон в момент времени, соответствующий приложению нагрузки,  $t = t_0$ , не подвергается сжимающим напряжениям, большим, чем **0,45 $f_{ck}(t_0)$** .

Где  $f_{ck}$  – характеристическая цилиндрическая прочность бетона на сжатие в возрасте 28 сут.

Зависимость коэффициента ползучести от времени может быть выражена формулой:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0), \quad (4.4)$$

где  $\varphi_0$  – условный начальный коэффициент ползучести бетона,  $\beta_c(t, t_0)$  – коэффициент учета ползучести во времени.

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0). \quad (4.5)$$

Если расчетное сопротивление бетона сжатию  $f_{cm} > 35$  МПа, то для дальнейшего расчета необходимо ввести поправочные коэффициенты, которые в остальных случаях равны 1:

$$\alpha_1 = [35/f_{cm}]^{0.7}; \quad (4.6)$$

$$\alpha_2 = [35/f_{cm}]^{0.2}; \quad (4.7)$$

$$\alpha_3 = [35/f_{cm}]^{0.5}. \quad (4.8)$$

Фактор влияния относительной влажности  $RH$  на коэффициент ползучести:

$$\varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1^{\frac{1}{3}} \sqrt{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2, \quad (4.9)$$

где  $h_0$  – условный размер элемента, в мм:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}, \quad (4.10)$$

где  $A_c$  – площадь бетонного сечения,

$u$  – часть периметра сечения, которая подвержена атмосферному воздействию.

Фактор, учитывающий прочность бетона:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}}. \quad (4.11)$$

Фактор, разрешающий влияние условного возраста бетона на коэффициент ползучести:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}, \quad (4.12)$$

где  $t_0$  – условный возраст бетона:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n e^{\left( \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} - 13.65 \right)} \Delta t_i, \quad (4.13)$$

где  $T(\Delta t_i)$  – превалирующая температура периода,  $\Delta t_i$  – количество дней с этой температурой.

Коэффициент учета развития ползучести во времени:

$$\beta_c(t, t_0) = [(t - t_0) / (\beta_H + t + t_0)]^{0.3}, \quad (4.14)$$

где  $\beta_H$  – коэффициент влияния влажности и условного размера элемента:

$$\beta_H = 1.5[1 + (0.012RH)^{18}]h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3. \quad (4.15)$$

Если напряжения сжатия бетона в возрасте  $t_0$  превышает значение  $0,45f_{ck}(t_0)$ , то, как правило, следует учитывать нелинейную ползучесть. Такой высокий уровень напряжений может появиться в результате предварительного напряжения, например, в сборных преднапряженных элементах на уровне напрягаемой арматуры. В этих случаях нелинейный условный коэффициент ползучести определяется по формуле

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot e^{(1.5(k_\sigma - 0.45))}, \quad (4.16)$$

При этом  $\varphi_{nl}(\infty, t_0)$  – нелинейный условный коэффициент ползучести, вводимый взамен  $\varphi(\infty, t_0)$ ;

$k_{\sigma}$  – отношение «напряжение – прочность»  $\sigma_c/f_{ck}(t_0)$ ,

где  $\sigma_c$  – напряжение сжатия, а  $f_{ck}(t_0)$  – характеристическая прочность бетона в момент времени, соответствующий нагружению.

Деформация ползучести бетона  $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$  в возрасте  $t = \infty$ , при постоянном напряжении сжатия  $\sigma_c$ , приложенном во время  $t = t_0$ , рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_{c0}}; \quad (4.17)$$

где  $E_{c0}$  – модуль упругости для нормального бетона при напряжении  $\sigma_c = 0$  в возрасте 0 суток;

Описанная методика реализована в программном комплексе ЛИРА–САПР.

Технология расчета конструкций с учетом ползучести бетона выглядит следующим образом:

- ✓ выполняется расчет в линейной постановке на все виды нагружений (статические, силовые, статические деформационные, динамические);
- ✓ определяются расчетные сочетаний усилий или расчетные сочетания нагружений;
- ✓ выполняется подбор арматуры в сечениях стержневых или пластинчатых элементов;
- ✓ производится унификация армирования элементов;
- ✓ по результатам армирования формируются новые жесткостные характеристики конструктивных элементов для последующего нелинейного расчета;
- ✓ задаются параметры ползучести бетона, учитывающие влажность и усадку бетона;
- ✓ назначается нагружение, на которое будет производиться расчет с учетом ползучести бетона;
- ✓ выполняется расчет для заданных промежутков времени. На каждом этапе расчета для каждого элемента определяется новая жесткость, которая зависит от напряжения бетона в этом элементе и заданных параметров ползучести. Новые переменные жесткости получаются в точках интегрирования как по сечению, так и по конечному элементу, в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом этапе определяются усилия, перемещения и новые

жесткости по касательному модулю деформации для заданного промежутка времени.

Далее приводятся несколько примеров численного эксперимента по моделированию изменения НДС по времени для многоэтажной рамы и полой железобетонной оболочки.

#### **4.5.1. Моделирование изменения НДС железобетонной рамы во времени**

Надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций и сооружений не может быть обеспечена без учета важных особенностей деформирования бетона. Прогнозирование длительного деформирования бетона во времени и связанного с этим перераспределением напряжений между бетоном и арматурой является актуальным, т.к. от правильного учета этих особенностей бетона и железобетона при проектировании зависит надежность и долговечность сооружений, а также соответствие сооружения предъявляемым к нему требованиям.

Необходимо отметить, что проектируемое сооружение кроме надежности, безопасности и экономической целесообразности должно обеспечить функциональную пригодность. Определение функциональной пригодности сооружений невозможно без правильного прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном и арматурой происходящего вследствие ползучести бетона.

Ползучесть бетона характеризуется увеличением деформации при постоянной нагрузке. Деформации ползучести могут в несколько раз превосходить деформации от нагрузки, поэтому изучение и учет ползучести имеет большое значение в строительстве.

С другой стороны, если железобетонная конструкция подвергается действию постоянной деформации, то ползучесть может быть определена как уменьшение напряжений во времени, возможно, перераспределение усилий между бетоном и арматурой в сечениях элементов.

Программные комплексы, в которых реализованы методы учета ползучести бетона, позволяют моделировать такие процессы.

Так в ПК ЛИРА-САПР реализован один из наиболее применяемых вариантов моделирования ползучести. Коэффициент ползучести, учитываемый в расчете, определяется по формуле:

$$\varphi(T) = \varphi^0 \left( \frac{T}{T + \beta_H} \right)^{0.3} \quad (4.18)$$

где  $T$  – количество суток (возраст бетона), по прошествии которых требуется учесть влияние ползучести;

$\varphi^0$  – теоретический коэффициент ползучести (во сколько раз увеличивается деформация за бесконечное время действия нагрузки);

$\beta_H$  – коэффициент, зависящий от относительной влажности и теоретического размера элемента.

Коэффициент ползучести вводится при моделировании нелинейных нагружений.

На рис. 4.7 приведена расчетная схема железобетонной многоэтажной двухпролетной рамы. Условно раму можно рассматривать как фрагмент пространственного железобетонного монолитного каркаса здания. Ригели представляют собой вырезанные полосы перекрытий шириной 6 м и толщиной 0,2 м. Колонны имеют прямоугольное сечение – 50х50см. Длительная нагрузка на ригель составляет 9т/м. Бетон марки В40, относительная влажность составляет 80%.

В таблице 4.1 представлены усилия и перемещения элементов многоэтажной рамы при упругом и физически нелинейном расчетах с учетом ползучести. Анализ результата, приведенного в таблице 4.1, свидетельствует о некотором перераспределении усилий и значительном увеличении деформаций при учете ползучести, по сравнению с упругим расчетом. Так нормальная сила в средней наиболее нагруженной колонне (510.21 т) с течением времени уменьшается до 475,87 т, перераспределяясь на менее нагруженные крайние колонны. Опорный момент в ригеле (сечение А) так же уменьшается до -15,28т\*м, перераспределяясь на пролетное сечение В, момент в котором в свою очередь - увеличивается. В ряде случаев значительное увеличение перемещений, может оказаться решающим фактором в обеспечении живучести конструкций.

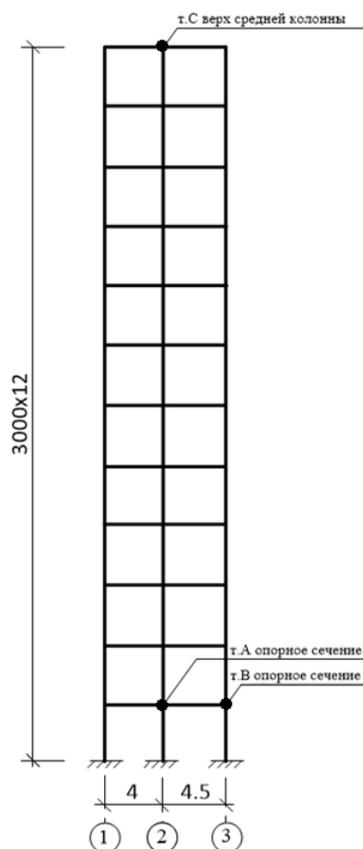


Рис. 4.7. Расчетная схема многоэтажной рамы

Таблица 4.1

Усилия и перемещения элементов многоэтажной рамы при упругом и нелинейном расчетах

Параметры напряженно-деформированного состояния	Упругий расчет	Нелинейный расчет с ползучестью			
		28 суток	365 суток	1100 суток	1500 суток
Нормальная сила $N$ в колонна I этажа (ось 1), т	-336.96	-337.99	-352.20	-355.45	-356.1
Нормальная сила $N$ в колонне I этажа (ось 2), т	-512.06	-510.21	-483.24	-477.10	-475.87
Нормальная сила $N$ в колонне I этажа (ось 3), т	-365.59	-366.41	-379.17	-382.06	-382.64
Момент $M$ в ригеле (опорное сечение, т.А), т*м	-17.63	-15.80	-15.50	-15.32	-15.28
Момент $M$ в ригеле (опорное сечение, т.В), т*м	-9.03	-19.95	-20.81	-20.99	-21.04
Перемещение верха средней колонны ( $z$ , т.С), мм	-11.84	-15.57	-35.78	-39.47	-40.21

#### 4.5.2. Моделирование изменения НДС железобетонной оболочки во времени

Пологие железобетонные оболочки являются достаточно распространенной конструкцией для покрытий больших пролетов. Однако, такие конструкции очень чувствительны к изменению геометрии (сползание), которая обуславливается ползучестью бетона, и, вследствие этого значительного нарастания усилий. Продемонстрируем этот эффект на примере пологой железобетонной арки.

На рисунке 4.8 представлена расчетная схема и компьютерная модель пологой арки. Бетон принимается марки В40, относительная влажность 80%. В таблице 4.2 приведены результаты расчетов в упругой постановке и в нелинейной постановке с учетом ползучести бетона при армировании нижнего слоя  $F_a=50 \text{ см}^2$  и верхнего слоя  $F_a=30 \text{ см}^2$ .

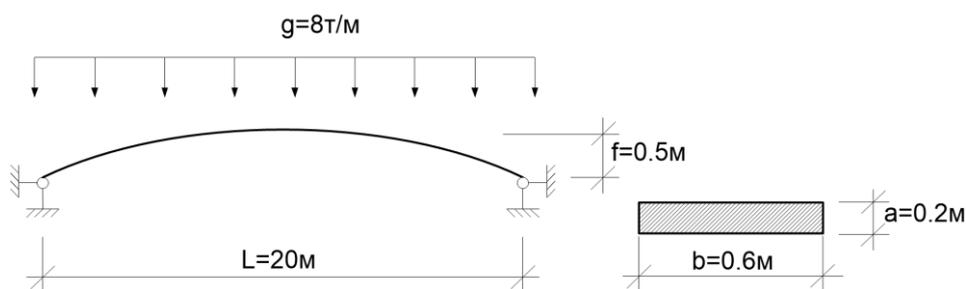


Рис. 4.8 Расчетная схема и компьютерная модель пологой арки

При моделировании пологой арки необходимо одновременно учитывать и физическую, и геометрическую нелинейность, в связи с тем, что одновременно необходимо учесть совместную работу бетона и арматуры и изменение формы арки при действии постоянно действующей равномерно-распределенной нагрузки [31].

Таблица 4.2

Усилия и перемещения элементов арки при упругом и нелинейном расчетах с учетом ползучести

Параметры напряженно-деформированного состояния	Упругий расчет	Нелинейный расчет с учетом ползучести				
		0 суток	28 суток	365 суток	1100 суток	1500 суток
Максимальные перемещения по оси z в середине пролета, мм	-43,5	-193	-205	-222	-230	-232
$N_{\max}$ , Т	-1111,4	-1281,9	-1298,99	-1323,16	-1335,57	-1338,3
$M_{\max}$ , Т·м	14	68	75,5	85,8	91	92,1

Приведенные в таблице 4.2 результаты показывают, что перемещения через 5 лет эксплуатации более чем в 5 раз превысили перемещения, полученные на основании упругого расчета.

Нормальные усилия в оболочке в связи с тем, что она стала более полой, увеличились в 1.2 раза, а изгибающий момент в середине пролета в 6.5 раз.

Для пологих железобетонных оболочек увеличение перемещений уменьшает пологость оболочки, что может привести к значительному росту усилий. В этом смысле моделирование работы конструкций во времени и

учет ползучести может выявить важные факторы, влияющие на живучесть конструкций [157].

Для современных сложных сооружений (мосты, большепролетные покрытия, высотные здания и др.), как правило, конструктивная схема исследуется не только на основании упругого расчета, но и на основании процесса моделирования изменения напряженно-деформированного состояния во времени. В процессе эксплуатации конструктивная схема сооружения может многократно изменяться, усилия и перемещения перераспределяться, значительно повышая вероятность трещинообразования.

На современном этапе развития компьютерных технологий разработано множество программных комплексов (ЛИРА–САПР, МОНОМАХ–САПР, SCAD, STARK, COSMOS, ANSYS, NASTRAN и др.), реализующих метод конечных элементов и позволяющих производить расчеты с учетом нелинейных свойств материалов и их изменения с течением времени (процесса старения бетона), влекущими за собой изменение НДС.

Решение этой задачи в ПК ЛИРА–САПР, базируется на основных методах теории прочности бетона, которые в физическом смысле представляют собой реализацию законов нелинейного деформирования материалов по различным теориям.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Моделирование учета реологических свойств материала имеет большое значение для конструкций строительных объектов из монолитного железобетона, так как в этом случае необходимо учитывать такие эффекты:

- ✓ при длительном действии нагрузки происходит перераспределение усилий между сильно нагруженными элементами (усилия в них уменьшаются) и менее нагруженными (усилия в них увеличиваются);
- ✓ ползучесть бетона обуславливает рост перемещений, что, помимо увеличения деформативности, может вызвать увеличение усилий (случай пологой оболочки)
- ✓ в железобетонном элементе при длительном действии нагрузки в результате ползучести бетона происходит перераспределение усилий между бетоном и арматурой;

- ✓ в центрально-сжатых железобетонных колоннах усадка и ползучесть действуют в одном направлении, уменьшая напряжения в бетоне и увеличивая их в продольной арматуре, так как бетон, деформируясь, разгружается. Однако при увеличении нагрузки на колонну деформации арматуры возрастают, в то время как в бетоне предельные деформации ограничиваются сравнительно небольшими значениями. Это приводит к обратному перераспределению усилий – нагружению бетона и разгрузке арматуры. Ползучесть бетона, вызывая увеличение напряжений в арматуре колонн при эксплуатационной нагрузке, не уменьшает конечной несущей способности элемента.
  - ✓ неравномерная осадка вертикальных элементов (колонны и пилоны имеют большие деформации, чем стены и диафрагмы);
  - ✓ конструкции, как правило, включаются в работу до набора бетоном расчетной прочности (как правило, распалубка производится значительно раньше, чем бетон наберет расчетную 28-дневную прочность), что приводит к увеличению деформации ползучести бетона;
- и многие другие эффекты.

Приведенные примеры показывают насколько важно на этапе проектирования моделировать работу конструкций в эксплуатационный период. Учет ползучести может обнаружить значительный рост перемещений и усилий.

#### **4.6. Методы моделирования аварийных ситуаций**

Как уже говорилось ранее, в процессе эксплуатации жилых и общественных зданий происходит старение несущих систем, зависящее не только от времени, но и от различного рода аварийных и нештатных ситуаций, техногенных воздействий. Аварийные воздействия могут быть связаны с деятельностью человека (пожар, взрыв газа, теракты, наезды транспорта и др.) или могут быть вызваны природными явлениями такими как: землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований. Так как полностью невозможно исключить вероятность возникновения таких ситуаций, необходимо обеспечить определенную

степень безопасности людей и сохранности их имущества за счет уменьшения вероятности прогрессирующего обрушения при локальных разрушениях несущих конструкций [6, 22, 23, 25, 63, 158]

В связи с этим часто возникают вопросы, связанные с реконструкцией, демонтажем, утилизацией и капитальным ремонтом многоэтажных и высотных зданий. В современной практике проектирования расчет ведется на максимальные значения внутренних усилий, возникающих при расчете по одной определенной схеме приложения внешних нагрузок. Однако по результатам проведенных учеными численных экспериментов было выявлено, что распределение внутренних усилий в конструктивных элементах носит очень сложный характер и в ряде случаев может привести к прогрессирующему обрушению.

Термин «прогрессирующее обрушение» и формулировка проблемы защиты от него строительных объектов появилась в 1968 г. в докладе комиссии, расследующей причины известной аварии 22-этажного жилого панельного дома «Роунан-Пойнт» в Лондоне [189]. После публикации доклада комиссии, расследовавшей причины аварии здания «Роунан-Пойнт», практически во всех развитых странах были начаты исследования этой проблемы. Анализировалась статистика аварийных воздействий различного характера, экономические и технические аспекты возможных методов снижения ущерба от случайных аварийных воздействий на здания и сооружения, проводились специальные экспериментальные исследования [45].

Выводы, полученные разными исследователями, оказались схожи. В частности, анализ показал, что, не отказываясь в принципе от профилактических мер, направленных на предупреждение локальных разрушений их несущих конструкций, самое серьезное внимание следует уделить предупреждению прогрессирующего обрушения [133, 134, 135]. Это вызвано, во-первых, тем, что никакими экономически оправданными мерами невозможно полностью исключить возможность локальных разрушений несущих конструкций, во-вторых, тем, что прогрессирующее обрушение ведет к наиболее тяжелым последствиям, в-третьих, тем, что для сравнительно небольших местных разрушений несущих конструкций обеспечение устойчивости конструкции против прогрессирующего обрушения может быть достигнуто недорогими средствами [120, 124].

Все исследования, посвященные устойчивости к прогрессирующему обрушению, как правило, ориентированы на конструкции многоэтажных и высотных зданий и это вполне оправдано, так как:

- ✓ конструкции высотных зданий являются сравнительно новыми инженерными решениями и зачастую эти решения являются уникальными;
- ✓ прогрессирующее обрушение высотных зданий ведет к особо тяжелым последствиям.

В Украине и странах СНГ этой проблеме уделяется большое внимание и на нормативном уровне. Разработано дополнение Е «Методы расчета высотных зданий на сопротивление прогрессирующему обрушению» к ДБН Б.2.2-24:2009. Здания и сооружения, «Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения», разработанные МНИИТЭП, НИИЖБ, и др. Ниже приводятся основные концепции, заложенные в основу этих нормативных документов.

1. Несущая конструктивная система жилых зданий должна быть устойчива к прогрессирующему (лавинообразному, цепному) обрушению в случае локального разрушения отдельных конструкций при аварийных воздействиях (взрыва бытового газа, пожара и т.п.).

2. Допускаются локальные разрушения отдельных несущих конструкций в пределах одного этажа или участка перекрытия одного этажа, но эти первичные разрушения не должны приводить к обрушению соседних конструкций, на которые передается нагрузка, воспринимавшаяся ранее элементами, поврежденными в результате аварийного воздействия.

3. Конструктивная система здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость, как минимум на время, необходимое для эвакуации людей. Перемещения конструкций и раскрытие трещин в них не ограничиваются.

Локальное разрушение конструкций обуславливается возникновением аварийных чрезвычайных ситуаций (ЧС) к которым относятся:

- ✓ природные чрезвычайные ситуации (ЧС) – опасные метеорологические явления (землетрясения, ураганы, наводнения), образование карстовых воронок и провалов в основаниях зданий, оползни и др.;

- ✓ антропогенные (в том числе техногенные) ЧС – взрывы снаружи или внутри здания, пожары, наезды транспорта, аварии или значительные повреждения несущих конструкций вследствие дефектов в материалах и др.;
- ✓ дефекты проектирования, строительства и эксплуатации – отсутствие необходимых избыточных связей, неквалифицированная реконструкция, приводящая к недопустимым ослаблениям и перегрузке.

Поскольку достаточно трудно исключить большие масштабы повреждений, все же необходимо принимать ряд мер, чтобы уменьшить вероятность возникновения прогрессирующего разрушения.

Устойчивость конструкций высотных зданий против прогрессирующего обрушения должна проверяться расчетом и обеспечиваться конструктивными мерами, способствующими включению в работу дополнительных связей, появлению новых конструктивных схем, т.е. приспособлению конструкции к новым условиям работы.

Реконструкция высотного здания, в частности перепланировка и переустройство помещений, не должны снижать его устойчивость против прогрессирующего обрушения.

В качестве локального (гипотетического) разрушения следует рассматривать разрушение (удаление) вертикальных конструкций одного (любого) этажа здания, ограниченных кругом площадью до  $80 \text{ м}^2$  (диаметр 10 м):

а) двух пересекающихся стен на участках от места их пересечения (в частности, от угла здания) до ближайшего проема в каждой стене или до следующего вертикального стыка со стеной другого направления или участке указанного размера;

б) колонн (пилонов) или колонн (пилонов) с примыкающими к ним участками стен.

Во всех случаях площадь поперечного сечения каждого из удаленных элементов расположенных на участке  $80 \text{ м}^2$  не должна превышать  $0,9 \text{ м}^2$ .

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения необходимо рассматривать лишь наиболее опасные расчетные схемы разрушения [107, 108].

Расчет по прочности и устойчивости производится на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и длительные

временные нагрузки, а также воздействие на конструкцию здания локальных гипотетических разрушений. Локальное разрушение может быть расположено в любом месте здания.

Прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям, согласно действующим нормам проектирования железобетонных и стальных конструкций.

Расчет здания в случае локального разрушения несущих конструкций производится только по предельным состояниям первой группы [137]. Развитие неупругих деформаций, перемещения конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой чрезвычайной ситуации не ограничиваются.

Моделирование прогрессирующего обрушения необходимо для исследования живучести конструкции, возможности и механизма ее приспособления при аварийном выходе из строя отдельных конструктивных элементов. Такой анализ может быть сделан в рамках нелинейного динамического расчета, однако его выполнение при массовом проектировании в настоящее время не представляется возможным ввиду большой сложности и ресурсоемкости расчета. В то же время, можно считать несостоятельной и попытку моделирования процесса «прогрессирующего» разрушения конструкции на основе линейно–упругого статического расчета, предпринятую в некоторых работах и программных комплексах [125, 138].

В данном разделе предлагается методика моделирования «форс–мажорной» аварийной ситуации.

На первом этапе выполняется расчет конструкции в эксплуатационной стадии или в нескольких монтажных и эксплуатационных стадиях, с учетом истории возведения и нагружения конструкции, предшествующих локальному разрушению. При этом учитывается физическая и геометрическая нелинейность работы конструкции. Расчет производится на постоянные и временные нагрузки, входящие в особое сочетание. Напряженно–деформированное состояние первого этапа является стартовым для второго этапа, на котором выполняется расчет схемы с выключенными из работы (удаленными) элементами. Нагрузкой на втором этапе являются усилия в удаленных элементах, увеличенные на коэффициент, учитывающий динамику процесса (коэффициент динамичности принимается равным 1.2). Расчет также необходимо производить в физически и геометрически нелинейной постановке. Если при

этом окажется, что некоторые элементы модели не удовлетворяют условию прочности (т.е. разрушаются), то расчет продолжается аналогичным образом на следующей стадии без таких элементов. Проверка на прочность оставшихся элементов выполняется без учета продольного изгиба. Расчет будет завершен либо локализацией процесса разрушения, либо полным разрушением несущей системы. Такое моделирование форс-мажорной ситуации позволяет выявить дополнительные резервы несущей способности, в основном связанные с эффектом приспособляемости. Так, например, перекрытие при больших проектных прогибах начинает работать, как мембрана и задача проектировщика обеспечить возможность такой работы.

Возможно использовать пространственную расчетную модель. В модели могут учитываться элементы, которые при нормальных эксплуатационных условиях являются ненесущими (например, навесные наружные стеновые панели, железобетонные ограждения балконов и т.п.), а при наличии локальных воздействий активно участвуют в перераспределении усилий в элементах конструктивной системы. Расчетная модель здания должна учитывать возможность удаления (разрушения) отдельных вертикальных конструктивных элементов. Расчетная модель здания должна быть рассчитана отдельно с учетом каждого (одного) из локальных разрушений. Допускается в первом приближении после определения зоны локального обрушения, например по подсистеме ЛИТЕРА в ПК ЛИРА-САПР, выполнять расчет конструкций с учетом демонтажа разрушенных элементов при пониженных модулях упругости несущих элементов: вертикальных с коэффициентом - 0.6E0, плит перекрытия (покрытия) -0.3E0. Перемещения элементов конструкций и развитие трещин не ограничиваются, но коэффициент запаса при проверке устойчивости такой системы с демонтированными элементами должен быть более двух.

Коэффициенты надежности по нагрузкам следует принимать равными единице. За расчетные характеристики материалов принимаются их нормативные значения. Кроме того, расчетные сопротивления умножают на повышающие коэффициенты условий работы, учитывающие малую вероятность аварийных воздействий и рост прочности бетона после возведения здания, а также возможность работы арматуры за пределом упругости.

При реализации расчетов на прогрессирующее обрушение, необходимо принимать во внимание условность исходных предпосылок, заключающаяся в следующем:

- ✓ отсутствует достоверная информация о месте и причине возникновения процесса и характере разрушения;
- ✓ реальные параметры предельных разрушающих характеристик материалов, как правило, отличаются от условий прочности, принятых в нормах, поэтому в расчетных комплексах, например, таких как ЛИРА-САПР (подсистема МОНТАЖ), при физически-нелинейном расчете, кроме нормируемых данных о материалах (бетон, арматура), предусматривается задание произвольных расчетных значений параметров прочности (в том числе по результатам натурных наблюдений). Таким образом, в результате численного моделирования можно получить качественную оценку характеристик устойчивости конструкции по отношению к прогрессирующему обрушению, а также сопоставить несколько возможных сценариев обрушения с целью выявления слабых мест конструкции.

Так как предусмотреть все сценарии прогрессирующего обрушения невозможно то, ключевым пунктом в расчетах на аварийное обрушение является выбор и утверждение совместно с конструктором и заказчиком возможных сценариев обрушения, максимально приближенных к реальным условиям расположения объекта на местности, например:

- ✓ при расположении здания рядом с транспортными путями расчет сооружения выполняется при удалении крайних колонн;
- ✓ при наличии вертолетной площадки, расчет выполняется на обрушение участка плиты;
- ✓ при наличии в сооружении или рядом газо-распределительных станций выполняется расчет на взрыв газа;
- ✓ при наличии подпорных стен и других защитных сооружений - расчет выполняется на обрушение участка этих сооружений.

При этом, учитывая требования нормативных документов [104, 105, 106], устойчивость высотного здания против прогрессирующего обрушения следует обеспечивать рядом конструктивных решений:

- ✓ рациональным конструктивно-планировочным решением здания с учетом возможности возникновения рассматриваемой аварийной ситуации;
- ✓ конструктивными мерами, обеспечивающими неразрывность конструкций (минимальная площадь сечения (суммарная для нижней и верхней арматуры) продольной и поперечной арматуры в железобетонных перекрытиях и покрытиях определяется расчетом и должна быть не менее 0.25% от площади сечения бетона). При этом указанная арматура должна быть непрерывной и стыковаться в соответствии с требованиями нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций.
- ✓ применением материалов и конструктивных решений, обеспечивающих развитие в элементах конструкций и их соединениях пластических деформаций (сечение удаляемых ЖБ элементов не должно быть более 0.9м<sup>2</sup>; сечение удаляемых фибробетонных элементов должно быть не более 0.7м<sup>2</sup>; сечение удаляемой жесткой арматуры не должно быть более 15%).

Эффективная работа связей препятствующая прогрессирующему обрушению обуславливается обеспечением их пластичности в предельном состоянии, с тем, чтобы они не выключались из работы и допускали без разрушения развитие больших деформаций. Для выполнения этого требования связи следует проектировать из пластичной листовой или арматурной стали, а прочность анкеровки связей должна быть больше усилий, вызывающих их текучесть.

В зданиях следует отдавать предпочтение монолитным и сборно-монолитным перекрытиям, которые должны быть надежно соединены с вертикальными несущими конструкциями здания соответствующими связями.

Для повышения эффективности сопротивления прогрессирующему обрушению здания рекомендуется:

- ✓ надпроемные перемычки, работающие как связи сдвига, проектировать так, чтобы они разрушались от изгиба, а не от действия поперечной силы;
- ✓ шпоночные соединения в сборно-монолитных конструкциях проектировать так, чтобы прочность отдельных шпонок на срез была в 1,5 раза больше их прочности при смятии;

- ✓ обеспечивать достаточность длины анкеровки арматуры при ее работе как связи сдвига;
- ✓ опорные сечения балок и ригелей, а также узлы их соединений с колоннами (стенами, пилонами), должны иметь прочность по поперечной силе в 1,5 раза выше, чем их несущая способность по изгибу с учетом пластических свойств в пролете.

Далее на ряде примеров рассматривается методика оценки устойчивости каркасов высотных зданий к прогрессирующему обрушению разных типов: обрушения средних либо крайних колонн, обрушение опорной колонны нижнего этажа; обрушение части плиты перекрытия верхнего этажа площадью до 80 м<sup>2</sup>. Примеры демонстрируют принятие различных конструктивных решений, препятствующих прогрессирующему обрушению при удалении отдельных конструктивных элементов.

#### **4.6.1. Пример расчета многопролетной рамы на прогрессирующее обрушение при удалении средних колонн**

На рис. 4.9 представлена многопролетная девятиэтажная рама. Условно ее можно рассматривать как фрагмент пространственного каркаса здания.

Ригели представляют собой вырезанные полосы перекрытий шириной 6м и толщиной 0.2м. Сечение колонн 0.4х0.6м. Кроме собственного веса, на ригель приложена равномерно распределенная вертикальная нагрузка  $q=3.7$  т/п.м.

В табл. 4.3 и на рис. 4.10, 4.11 представлены результаты расчетов, как в эксплуатационном состоянии, так и в состоянии аварийного выхода из строя опорной колонны по оси 3 в линейно-упругой и нелинейной постановке (с учетом физической и геометрической нелинейности). Аварийный выход из строя опорной колонны моделировался в две стадии: на первой стадии рассчитывалась вся рама в физически и геометрически нелинейной постановке; на второй стадии расчет выполнялся без опорной колонны, удаление которой моделировалось приложением усилий в этой колонне с обратным знаком. Величина приложенных усилий равна усилиям в удаленной колонне, полученным на первой стадии, умноженным на коэффициент 1.2 (согласно Приложению Е «Методика расчета высотного здания на сопротивление прогрессирующему обрушению» [74, 129]).

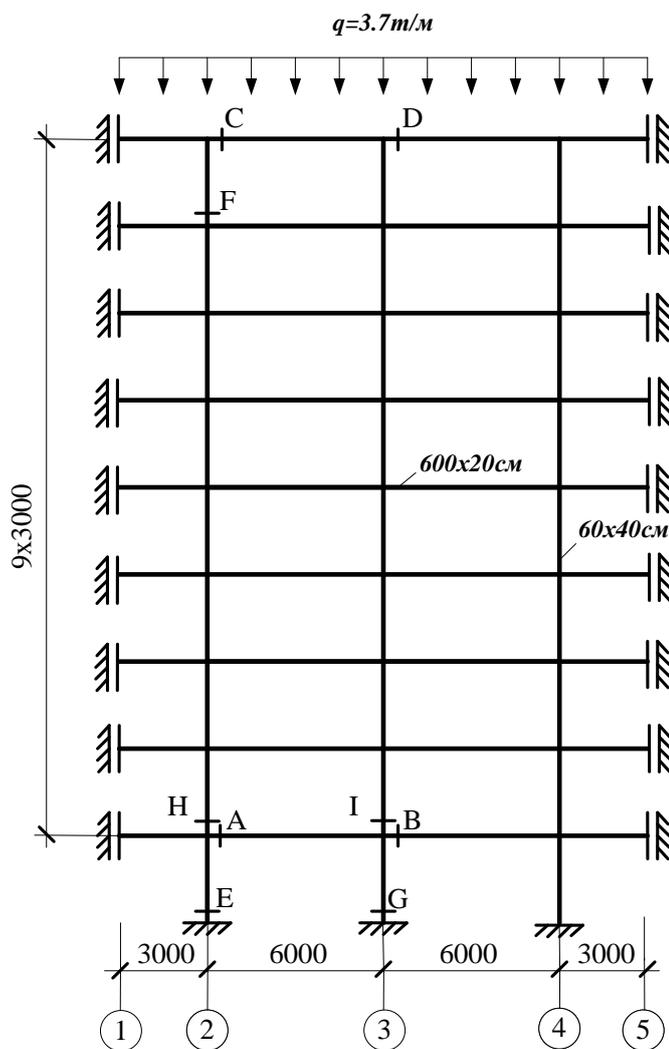


Рис. 4.9. Расчетная схема многоэтажной рамы

Напряженно-деформированное состояние конструкции, полученное на первой стадии, является стартовым для второй стадии расчета.

Таблица 4.3

Усилия и перемещения элементов многоэтажной рамы при линейном и нелинейном расчетах

	Расчет в линейной постановке на эксплуатационные нагрузки		Расчет при аварийном выходе из строя опорной колонны			
			Линейно-упругий расчет		Двухстадийный расчет с учетом физической и геометрической нелинейности	
	M, тм	N, т	M, тм	N, т	M, тм	N, т
Перекрытие, сечение А, тм	-21	0	-110	4,3	-43,4	214,2
Перекрытие, сечение В, тм	-21	0	72,7	4,3	48,3	211,7
Перекрытие, сечение С, тм	-21	0	-84,1	-10,8	-46,0	168,9
Перекрытие, сечение D, тм	-21	0	48,8	-10,8	49,3	166,5
Колонна, сечение Е, тм	0	-395,8	-17,8	-632,1	4,27	-622,5
Колонна, сечение F, тм	0	-43,9	-40,8	-66,1	-17,7	-68,6
Колонна, сечение G, тм	0	-395,8	-	-	-	-
Колонна, сечение H, тм	0	-351,8	-48,3	-557,7	-23,4	-551,1
Колонна, сечение I, тм	0	-351,8	0	59,9	0	46,7

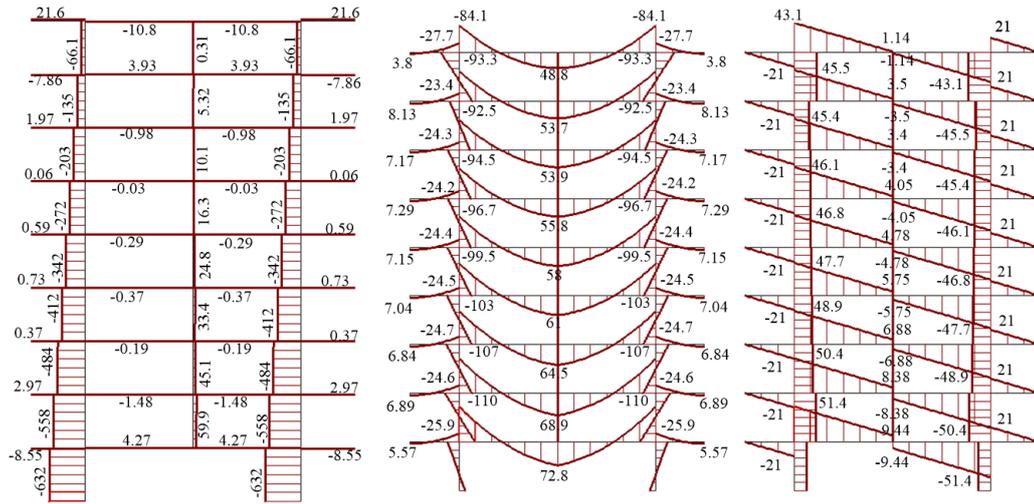


Рис. 4.10. Эпюры продольных сил  $N(t)$  и изгибающих моментов  $M_y(t^*m)$ , поперечных сил  $Q(t)$  при аварийном выходе из строя колонны \*(линейно-упругий расчет)

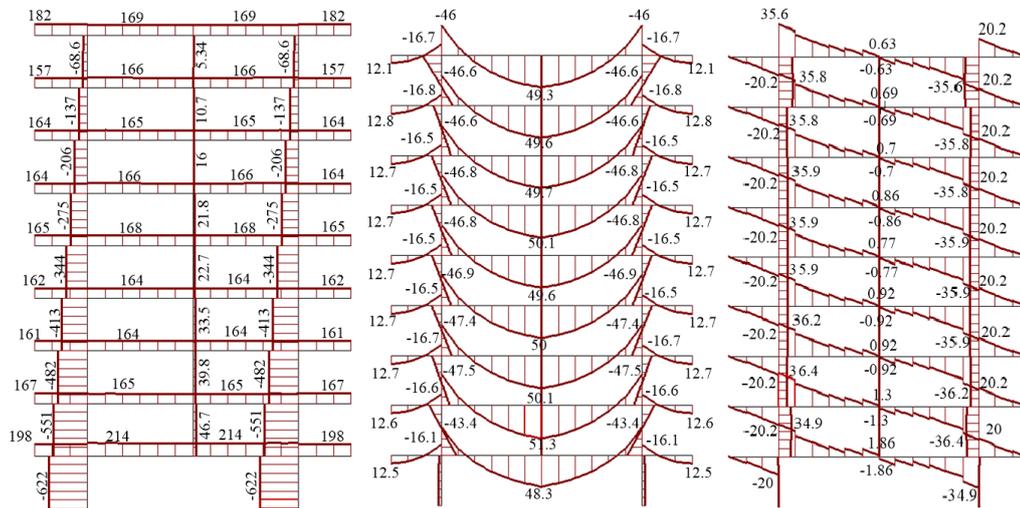


Рис. 4.11. Эпюры продольных сил  $N(t)$  и изгибающих моментов  $M_y(t^*m)$ , поперечных сил  $Q(t)$  при аварийном выходе из строя колонны (расчет с учетом физической и геометрической нелинейности)

Анализируя результаты расчетов, можно констатировать, что двух стадийный расчет, который, по сути, является компьютерным моделированием процесса внезапного удаления средней опорной колонны,

показывает, что опорный и пролетный изгибающие моменты в ригеле значительно меньше, чем те же моменты, полученные на основе линейно-упругого расчета (см. сечение А табл. 4.3). Этот эффект обусловлен работой конструкции по новой схеме: нижний узел по оси 3 получает большое вертикальное перемещение, ригели (полосы перекрытия начинают работать) по схеме нити, в результате чего в них возникают растягивающие усилия. Возникает, так называемый эффект висячей конструкции. Расчет конструкции с учетом геометрической и физической нелинейности позволяет учесть большие деформации, в результате которых возникает нормальное растягивающее усилие, что придает больше жесткости всему зданию, что увеличивает его живучесть при возникновении аварийной ситуации. Эти усилия, как правило, воспринимаются имеющейся арматурой в перекрытиях.

Таким образом, тщательный расчетный анализ несущей системы здания позволяет вскрыть дополнительные резервы ее несущей способности, и при определенных конструктивных мероприятиях, требующих некоторого увеличения материалоемкости, может обеспечить устойчивость здания к «прогрессирующему» разрушению [132]. Кроме того, снизить материалоемкость несущих конструкций здания за счет учета в расчете на аварийные воздействия тех конструкций, которые в эксплуатационном состоянии здания, при незначительных деформациях, не являются несущими, а при значительных деформациях несущей системы, обусловленных аварийным воздействием, могут включиться в работу на восприятие действующих на здание нагрузок.

#### **4.6.2. Пример расчета многопролетной рамы на прогрессирующее обрушение при удалении крайних колон.**

На рис. 4.12 представлена расчетная схема многопролетной восьмизэтажной рамы, четвертый и восьмой этаж – технические, усиленные металлической фермой. Условно раму можно рассматривать как фрагмент пространственного каркаса здания. Ригели представляют собой вырезанные полосы перекрытий шириной 6 м и толщиной 0.2 м, раскосы фермы выполнены из металлического прокатного профиля 30Б1. Сечение колонн 0.4x0.6 м. Кроме собственного веса, на ригель приложена равномерно распределенная вертикальная нагрузка  $q=3.7$  т/п.м. Закрепление колонн в

фундамент обеспечивается закреплением от горизонтальных, вертикальных перемещений и углов поворота.

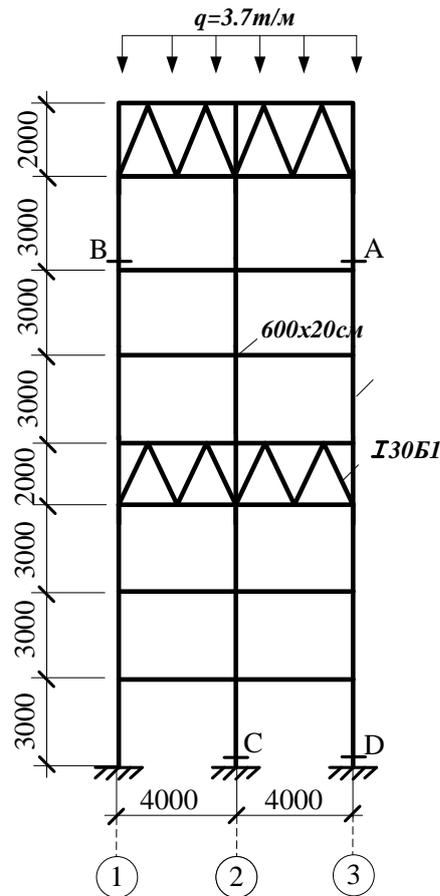


Рис. 4.12. Расчетная схема многоэтажной рамы с техническими этажами

На рис. 4.13 показаны эпюры продольных сил  $N$  в эксплуатационном состоянии рамы (а) и в аварийном состоянии при выходе из строя крайней колонны. Аварийный выход из строя крайней колонны моделировался в две стадии: на первой стадии рассчитывалась вся рама; на второй стадии расчет выполнялся без крайней колонны на усилия в этой колонне, полученные по результатам расчета на первой стадии.

Напряженно-деформированное состояние конструкции, полученное на первой стадии, является стартовой для второй стадии расчета.

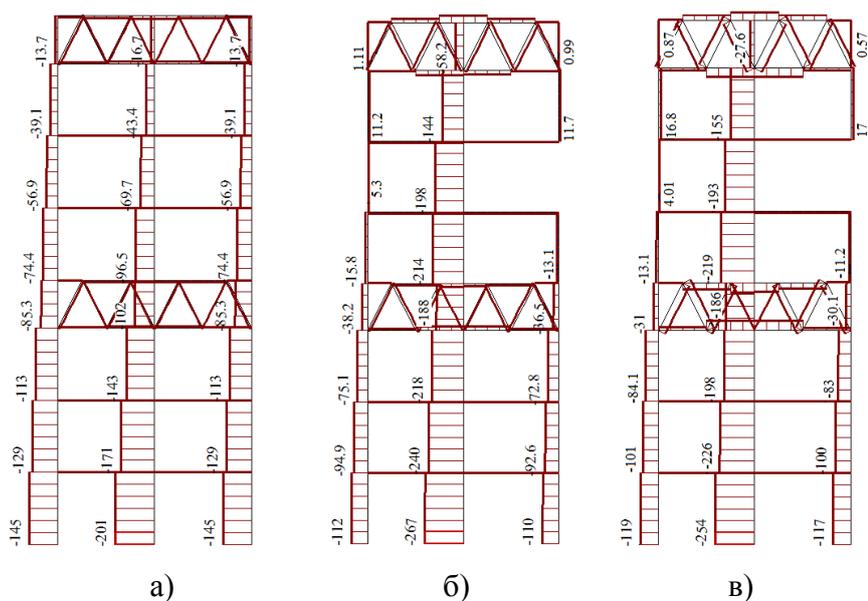


Рис. 4.13. Эпюры продольных сил  $N$ ,  $T$   
 а) расчет на эксплуатационные нагрузки;  
 б) расчет при аварийном выходе из строя крайней колонны  
 (линейно-упругий расчет);  
 в) расчет при аварийном выходе из строя крайней колонны  
 (расчет с учетом физической и геометрической нелинейности)

Таблица 4.4

Усилия элементов многоэтажной рамы при линейном и  
 нелинейном расчетах

Параметры напряженно-деформированного состояния	Расчет при проектных воздействиях	Расчет при аварийном выходе из строя крайней колонны	
		Линейно-упругий расчет	Двух стадийный расчет с учетом физической и геометрической нелинейности
Нормальное усилие в колонне, в сечении А,т	-39.1	11.7	17
Нормальное усилие в колонне, в сечении В,т	-39.1	11.2	16.8
Нормальное усилие в колонн, в сечении С,т	-201	-267	-254
Нормальное усилие в колонне в сечении D,т	-145	-110	-117

Анализируя результаты расчетов, приведенные в табл. 4.4. и на рис. 4.13 можно констатировать факт, что при выходе из строя крайней колонны, возникло перераспределение усилий.

Двухстадийный расчет с учетом физической и геометрической нелинейности здания позволяет вскрыть дополнительные резервы несущей способности, и при определенных конструктивных мероприятиях, требующих некоторого увеличения материалоемкости, можно обеспечить устойчивость здания к «прогрессирующему» разрушению.

При проектировании конструкций с учетом сопротивления прогрессирующему обрушению принятие продуманных решений не должно приводить к значительному увеличению материалоемкости. Исследования американских ученых [187] показывают, что такое увеличение не должно превышать 5%.

В основе такого утверждения лежит концепция о принятии таких конструктивных решений, которые создают условия для приспособления конструкций к новым форс-мажорным ситуациям иногда даже за счет потери некоторых эксплуатационных качеств (большие перемещения, трещины и др.).

Такая концепция, безусловно, более корректна, чем, достаточно распространенные подходы о прямолинейном увеличении сечений оставшихся несущих элементов для восприятия, возникших в результате аварийной ситуации, усилий.

#### **4.6.3. Примеры расчета реальных зданий на прогрессирующее обрушение**

Рассмотрим реальный пример выполнения расчета на прогрессирующее обрушение конструкций высотного жилого комплекса с подземным паркингом по проспекту Героев Сталинграда, 2 в Оболонском районе г. Киева. Общая высота здания  $H = +110\text{м}$ ,  $H$  подвала  $= -4.3\text{м}$ , фундаментная плита  $1.35\text{м}$ , 486 буро-инъекционных свай диаметром  $62\text{см}$ . Расчет выполнен в программном комплексе «МОНОМАХ-САПР» [102], затем с учетом постадийности возведения и с учетом нелинейной работы материалов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Общий вид здания и конечно-элементная схема представлена на рис. 4.14. Для получения достоверных данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС)

высотного здания, расчет выполняется с учетом по стадийности монтажа (см. рис. 4.15).

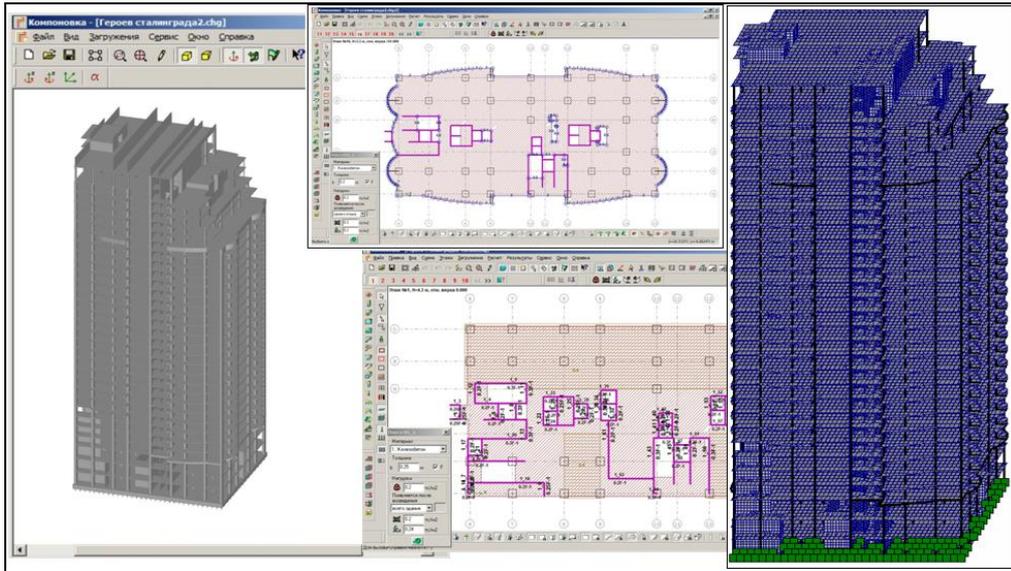


Рис. 4.14. Пространственная схема здания, планы этажей и конечно-элементная схема в подсистеме «Компоновка» ПК МОНОМАХ-САПР.

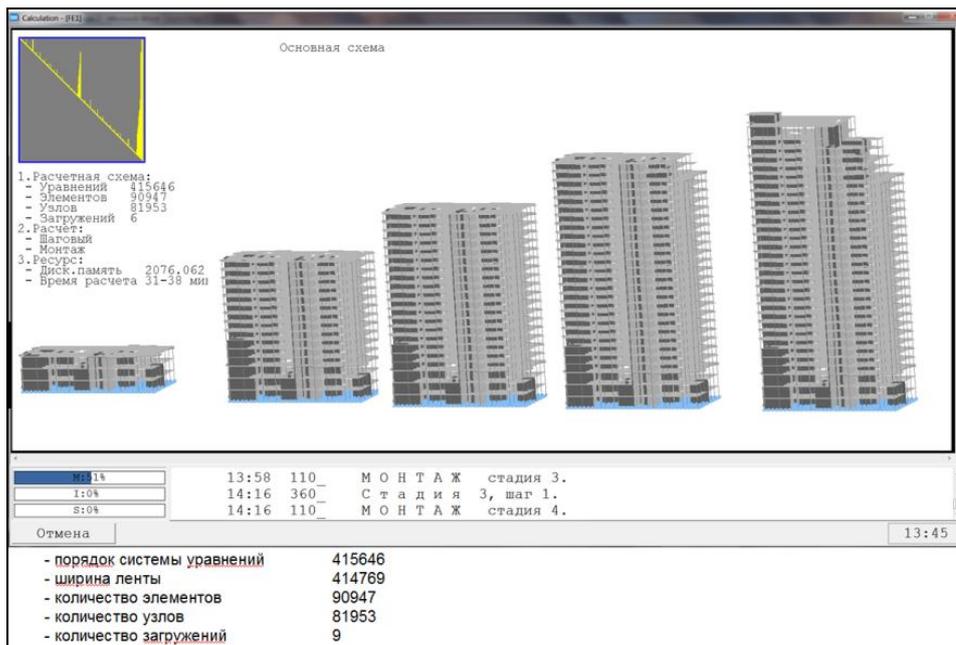


Рис. 4.15. Учет стадий монтажа каркаса в подсистеме МОНТАЖ ПК ЛИРА-САПР

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения рассмотрены вариант разрушения одной из колонн сечением 60х60см в средней части здания с максимальным пролетом плиты 7.2 м. После удаления опорной колонны пролет соответственно становится равным 14.4 м. (рис. 4.16)

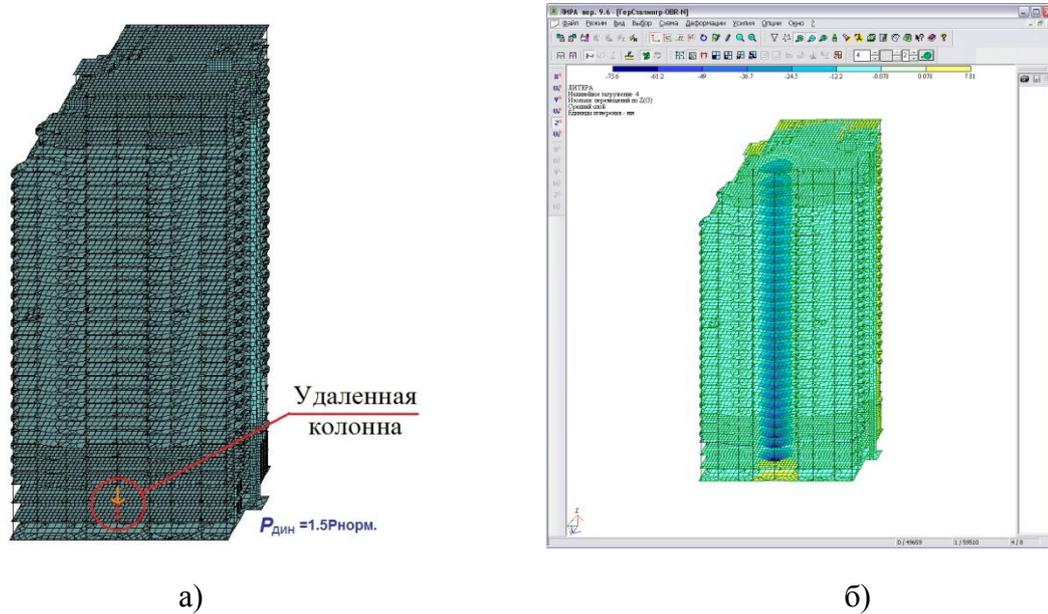


Рис.4.16. Конечно-элементная схема каркаса (а) и неупругие деформации (б) при обрушении колонны, смоделированные в подсистеме МОНТАЖ+ ПК ЛИРА-САПР.

После удаления колонны выполняется проверка здания на опрокидывание (рис. 4.17). Задачи устойчивости тесно связаны с геометрически нелинейными задачами. Реализованный в программном комплексе ЛИРА-САПР метод устойчивости предполагает исследование устойчивости здания по деформированной схеме. После приложения к зданию ветровых нагрузок выполняется расчет на все расчетные сочетания нагрузок (РСН) и анализ перемещений и максимальных ускорений верхних этажей (не более  $8 \text{ см/с}^2$ ). При этом интегрально учитывается заниженная жесткость вертикальных элементов и плит перекрытия с учетом инженерной нелинейности. Для устойчивости системы  $K_{запаса}$  должен быть более **2.0**.

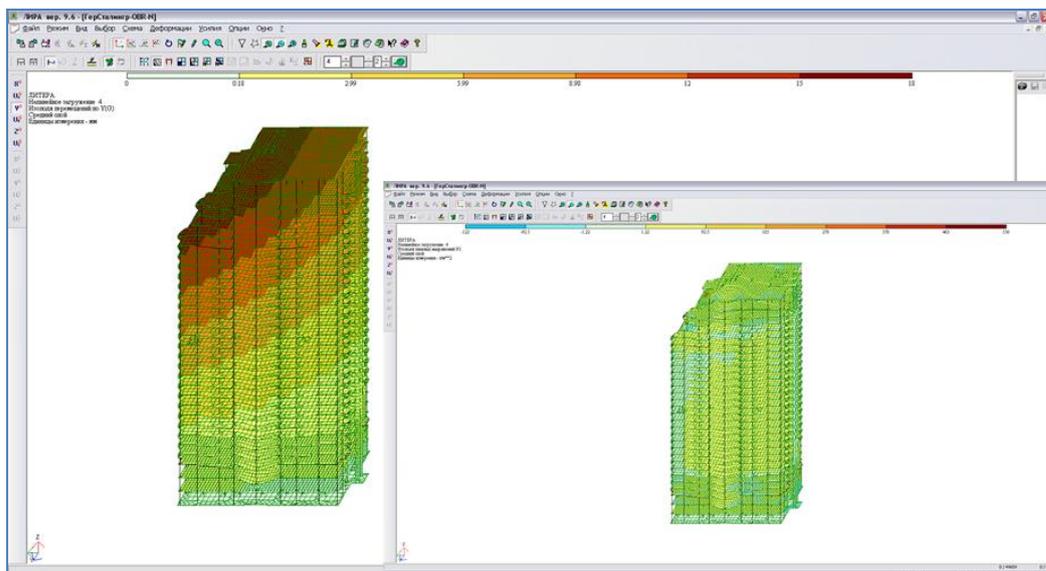


Рис.4.17. Проверка на общую устойчивость каркаса против опрокидывания

В качестве второго примера рассмотрим существующее здание торгово-офисного комплекса «ГУЛИВЕР» с объектами общественного назначения и паркингом по адресу: Спортивная пл.1 в Печерском р-не г. Киева. Фундаментная плита 1.8м на -15.8м; сваи  $d=82\text{см}$  – 223шт,  $R_{рас.}=530\text{тс}$ ; монолитный каркас +138.9м.

Производился расчет шаговым методом на прогрессирующее обрушение плиты перекрытия верхнего технического этажа.

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\}$$

$$\{\Delta\sigma_i\} = [D]_i \times \{\Delta\varepsilon\}_i,$$

где  $[D]$  – переменная матрица упругопластичности элемента с трещинами на  $i$ -том шаге;

$\{\Delta\varepsilon\}$  – тензор приращения деформации;

$\{\Delta\sigma\}$  – тензор приращения напряжений.

Критериями разрушения конструкций могут служить геометрическая изменчивость системы на  $i$ -том шаге; лавинообразный рост деформаций и перемещений системы. При этом в программном комплексе ЛИРА-САПР выдается сообщение «разрушение конструкции» и дальнейший процесс расчета прекращается.

Так как здание размещает вертолетную площадку, то расчет плиты выполняется на аварийную посадку либо крушение вертолета о плиту перекрытия. Участок перекрытия верхнего этажа был разрушен и обломки с частями перекрытия оказались на нижерасположенном этаже. В программном комплексе ЛИРА-САПР было смоделировано обрушение и рассчитано два верхних этажа здания (рис. 4.18). Далее проводится анализ трещинообразования на участке обрушения верхнего перекрытия (рис. 4.19). На рисунках видно, активное трещинообразование расположено в наиболее загруженном участке плиты.

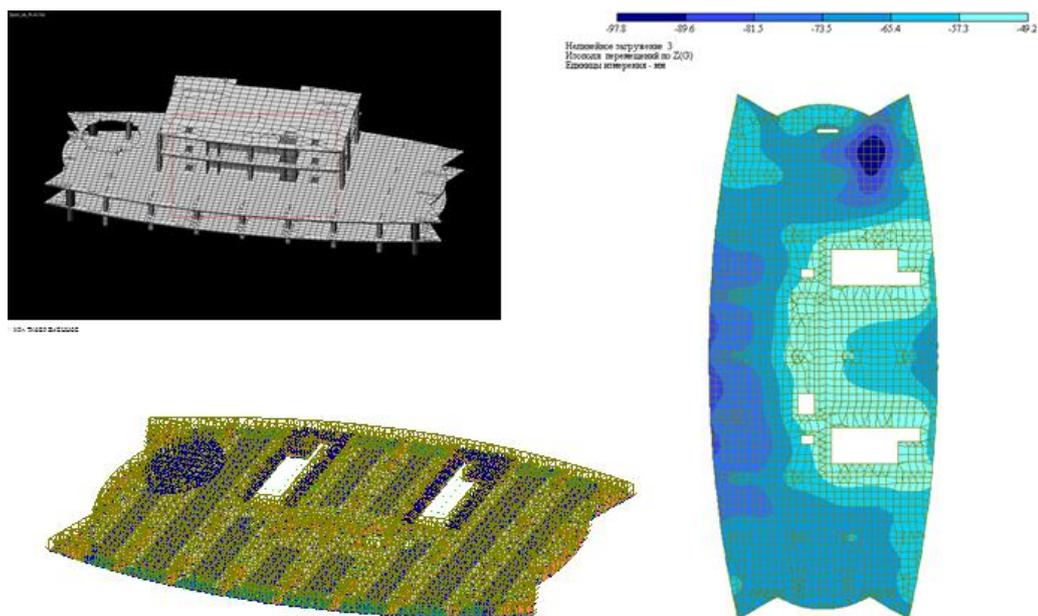


Рис. 4.18. Расчетная модель и результаты расчета плиты перекрытия

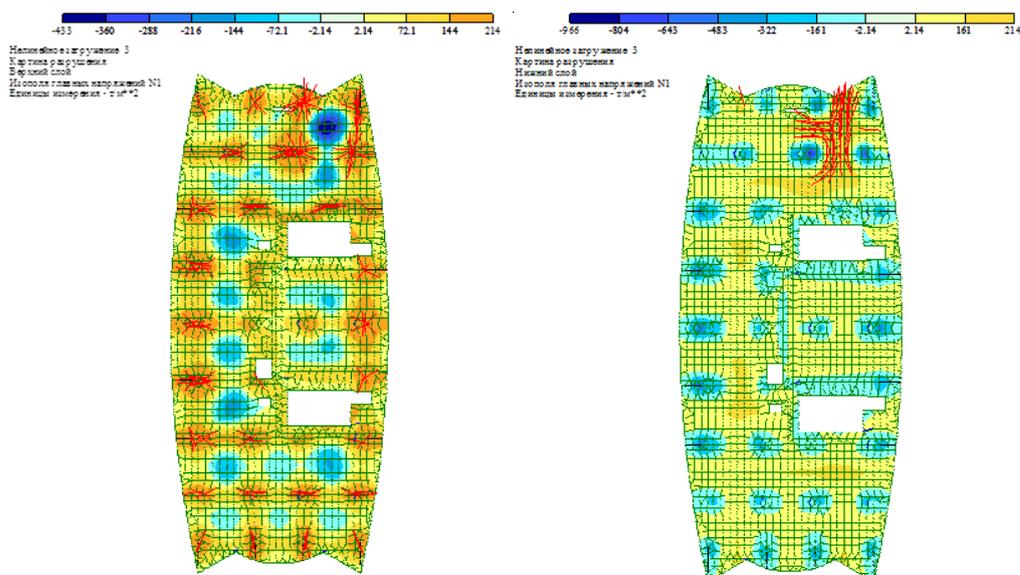


Рис. 4.19 Трещинообразование в местах обрушения вышележащего перекрытия

Приведенный расчет плиты перекрытия над техническим верхним этажом на отметке +127.2м на прогрессирующее обрушение при дополнительной нагрузке от части верхней плиты площадью  $80\text{ м}^2$  на нормативные нагрузки при коэффициенте динамичности 1.2 в физически нелинейной постановке показывает, что в плите развиваются зоны трещин и образуются пластические шарниры. Максимальные деформации плиты могут достигать 50мм. В нижней арматуре плиты в центре пролета зафиксирована текучесть арматуры. При этом в верхней зоне плиты над пилонами и колоннами также развиваются верхние трещины, но разрывов арматуры в плите не зафиксировано. Это свидетельствует, что эксплуатационная пригодность плиты не обеспечивается, но дальнейшее прогрессирующее обрушение плит не происходит при обеспечении армирования в нижнем слое плиты в середине пролета, и над опорами в верхней зоне плиты не менее  $15.4\text{ см}^2/\text{пм}$  (диаметр 14 шаг 100мм).

При проектировании высотных зданий очень важно учитывать критерий безопасности, максимального предотвращения аварийных ситуаций. При этом необходимо стремиться решать эти вопросы наиболее экономичными способами, в том числе обеспечением минимальной

площади продольной и поперечной арматуры в покрытиях и перекрытиях, которая должна быть не менее 0.25% от площади бетона.

Реализованные в программном комплексе ЛИРА-САПР методика физически-нелинейного расчета конструкций с трещинами позволяет выполнять оценку устойчивости и устойчивой прочности каркаса при прогрессирующем обрушении.

#### **4.7. Методы расчета высотных монолитных зданий на различные виды динамических воздействий**

##### **4.7.1. Особенности эксплуатации зданий в сейсмических районах.**

Наиболее часто встречающиеся динамические воздействия это сейсмические воздействия.

Здания и сооружения, возводимые в сейсмоопасных (подверженных землетрясениям) районах, должны обладать способностью противостоять сейсмическим воздействиям без потери эксплуатационных качеств, т. е. быть сейсмостойкими [26, 30, 82].

Сейсмостойкость зданий и сооружений определяется главным образом степенью их пространственной жесткости: чем больше жесткость, тем выше сейсмостойкость. Сейсмостойкость зданий и сооружений обеспечивается применением конструктивных решений, конструкций и материалов, соответствующих сейсмичности (интенсивности сейсмического воздействия в баллах) места строительства, а также строгим соблюдением правил и требований по возведению конструкций и производству работ в сейсмических районах.

Сейсмические нагрузки действуют в различных направлениях, т.к. носят циклический характер. Поэтому при расчётах конструкций зданий, строящихся в сейсмических районах необходимо учитывать горизонтальные пульсирующие, наряду с обычными нагрузками. В сочетании нагрузок необходимо учитывать особые нагрузки, которые и предполагают наличие сейсмической угрозы в данном географическом районе строительства. Во время землетрясения вступает тот резерв прочности системы, который был заложен при расчётах.

Специальные требования при проектировании зданий, находящихся в зонах с сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов:

- ✓ обеспечивать равномерное распределение жесткостей и масс, применяя симметричные конструктивные схемы;
- ✓ избегать перепада высот при наличии пролетов, проектируя здания прямоугольной формы без архитектурных изысков в виде эркеров;
- ✓ обеспечивать монолитность и однородность конструкций из сборных элементов, располагая стыки вне зоны максимальных усилий;
- ✓ предусматривать условия, обеспечивающие общую устойчивость здания и облегчающие развитие пластических деформаций в соединениях.

Особое значение при строительстве в сейсмических условиях должно быть уделено глубине заложения фундаментов и наличие или отсутствие подземной части здания. Ленточные и сплошные фундаменты в монолитном варианте являются наиболее надежными и устойчивыми при сейсмических воздействиях.

В зданиях до 9 этажей включительно, конструкции фундаментов, стен подвалов и подземных этажей могут выполняться как в сборных конструкциях, так и в монолитном железобетоне. В зданиях выше 9 этажей конструкции фундаментов, стен подвалов и подземных этажей, рекомендуется выполнять в монолитном железобетоне.

Фундаментные блоки монтируются на подушки из сборных элементов. По верху фундаментной подушки устраивается сплошной бетонный пояс толщиной 200 мм, армированный тремя стержнями диаметром не менее 10 мм АII или АIII, при сейсмичности 7 баллов – четырьмя. При сейсмичности 8 и 9 баллов необходимо укладывать шесть стержней. Продольная арматура связывается поперечными стержнями диаметром 6–8 мм через 300 – 400 мм по длине сейсмопояса.

Антисейсмические швы устраиваются в зданиях, если по функциональным и архитектурно-планировочным соображениям нельзя избежать сложной и асимметричной формы здания в плане с перепадами высот 5 м и более. Антисейсмические швы в зданиях со стеновой конструктивной системой устраиваются в виде двойных несущих стен, в каркасных зданиях – установкой двойных рам.

Несущие внутренние и наружные стены воспринимают сейсмические нагрузки в своей плоскости. Рекомендуется рамы каркасов здания, продольные и поперечные стены располагать симметрично относительно продольной и поперечной осей здания. Внутренние стены должны

располагаться на всю длину или ширину здания, т.е. должны быть сквозными. Равномерно расположенные оконные и дверные проемы, простенки должны быть одинаковой ширины, тем самым обеспечивая равномерное восприятие всех нагрузок, включая сейсмические.

Также к числу конструктивных антисейсмических мероприятий относится: применение сейсмостойких конструктивных систем; ограничение высоты зданий; регламентирование условий и области применения материалов по их видам; применение в конструктивных схемах антисейсмических поясов; применение металлических крестообразных связей, расположенных по фасаду здания; армирование элементов каменных конструкций; демпфирующие опоры и ряд других мер, предусмотренных нормами проектирования и строительства. Для каждого строительного объекта устанавливают в баллах расчетную сейсмичность в зависимости от сейсмичности района строительства, принимаемой по карте сейсмического районирования, с учетом класса здания или сооружения. В соответствии с расчетной сейсмичностью назначают конструктивные мероприятия, обеспечивающие необходимую устойчивость и прочность объекта при землетрясении [109].

Условно считается, что сейсмические силы воздействуют на сооружения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Вертикальное воздействие сначала мгновенно приподнимает здания и тем самым уменьшает давление на основание, а затем, наоборот, прижимает к земле и тем самым увеличивает давление. Исследования показывают, что даже при весьма значительных колебаниях почвы вертикальные силы не превышают 10–12% веса сооружения и не могут нарушить прочность и устойчивость фундаментов, поэтому при проектировании зданий учитывают только сейсмические силы, приложенные горизонтально, которые стремятся сдвинуть или опрокинуть сооружения.

Остановимся кратко на поведении кирпичных зданий в сейсмических районах.. Обследования уцелевших во время землетрясений кирпичных зданий показали, что при условии выполнения предусмотренных конструктивных мероприятий по усилению кирпичных зданий антисейсмическими поясами, а также при высоком качестве производства работ они будут обладать достаточной прочностью и устойчивостью даже при сильных землетрясениях (7 и 8 баллов). Если до недавнего времени кирпичные здания высотой в пять этажей являлись преобладающими в

сейсмических районах, то сейчас нередко строятся многоэтажные. Вместе с тем практика строительства показывает, что строители по своей инициативе в целях упрощения часто не выполняют антисейсмические мероприятия, предусмотренные проектом.

Это обстоятельство вызывает необходимость осветить данный вопрос подробнее.

Кирпичные здания относятся к так называемой категории зданий с жесткой конструктивной схемой. Эти здания сопротивляются сейсмическому воздействию как единая цельная пространственная конструкция только в случаях, когда продольные и поперечные стены связаны между собой и с перекрытиями достаточно прочными связями жесткости. Ввиду того что усилия, разрывающие стены в местах угловых сопряжений и пересечений, достигают больших величин, обеспечение пространственной жесткости здания требует проведения – специальных конструктивных мероприятий, а именно: устройство антисейсмических поясов по всему периметру стен, армирование углов и пересечений кладки, заделка перекрытий в стены с помощью специальных анкеров и др.

В кирпичных зданиях горизонтальные сейсмические силы воспринимаются в основном перекрытиями, которые вместе со стенами обеспечивают пространственную жесткость здания и тем самым распределяют эти силы между несущими конструкциями здания. В настоящее время для перекрытий применяются преимущественно многопустотные настилы с круглыми или овальными пустотами шириной 1,2 м и более. Перекрытия из сборных элементов по жесткости равноценны монолитным железобетонным перекрытиям при условии обеспечения надежных связей между плитами и со стенами в обоих направлениях.

Если эти связи отсутствуют или недостаточно прочны, происходит отрыв продольных стен от поперечных и падение стен, расположенных перпендикулярно направлению сейсмических воздействий. При этом полностью или частично падают перекрытия и стены перпендикулярного направления. Это равносильно полному обрушению здания.

Этот вид разрушения является преобладающим в зданиях, в которых антисейсмические мероприятия не предусмотрены или выполнены некачественно.

#### **4.7.2. Методика численного моделирования сейсмических воздействий.**

Для того чтобы корректно выполнить расчет на сейсмические воздействия и предусмотреть антисейсмические мероприятия необходимы численные эксперименты и методика анализа НДС при воздействии сейсмических нагрузок.

Поскольку сейсмическому воздействию подвержены различные районы Украины, России и других стран СНГ, а также Турции, Монголии и др., интенсивность сейсмического воздействия и критерии сейсмобезопасности различны, проблемные вопросы нормирования и научного обеспечения сейсмобезопасности достаточно неоднозначны. Сложность проблемы обеспечения сейсмостойкого строительства можно разделить на две части: геодинамическую и инженерно-строительную. Геологи и геофизики определяют сейсмические воздействия (т.е. нагрузку), которые строители используют для расчета и конструирования зданий. При этом геодинамические данные, зачастую недостаточны для моделирования и расчета верхнего строения. В литературе [1] приводятся сведения, что параметры сейсмического воздействия на земле и на фундаменте здания отличаются. Для устранения этого противоречия строительные нормы коррелируются многочисленными достаточно грубыми коэффициентами. К сожалению, недостаточно применяется практика комплексного исследования системы (грунт-основание-наземная часть) на стадии возведения и на эксплуатационной стадии.

В литературе, как правило, не приводятся системные методические подходы, включающие использование экспериментальных данных, которые позволили бы обеспечить стыковку геодинамических и строительных параметров. Установлены факты различных показаний приборов на основании и на фундаменте, по которым можно полагать, что не вся энергия воздействия от основания передается на сооружение.

Большую роль играет тип фундамента и его связи с основанием и его свойства. Но действующие нормативные документы не всегда учитывают особенности фундамента, а от поведения фундамента зависит сейсмостойкость верхнего строения. Зачастую в нормативных материалах для расчета (оценки) сейсмостойкости зданий конкретные типы сопряжения наземной части строения и фундамента рассматриваются как «жесткая заделка» (т.е. пренебрегают их реальными свойствами и возможностями).

Учет сложных грунтовых условий оценивается весьма грубо, сейсмичность территории города определяется по весьма усредненным показателям. Очевидно, что данные факторы оказывают большое негативное влияние на сейсмостойкость зданий, замена этих факторов в СНиПе на коэффициенты - это вынужденная мера, которая не нацеливает проектировщиков на создание экономических конструкций, обеспечивающих необходимую конструктивную сейсмобезопасность.

В программном комплексе ЛИРА–САПР разработаны методики, позволяющие создавать адекватные компьютерные модели и проводить ряд численных экспериментов на сейсмические воздействия. Во-первых, реализованы действующие нормативы разных стран, в том числе СНиП II-7-81, Московские городские строительные нормы МГСН 4.19-05, строительные нормы Франции NF P 06- 013, строительные нормы США IBC-2006, строительные нормы Украины ДБН В.2.2-24:2009, строительные нормы Еврокода prEN 1998-1:200X и многие другие.

Реализовано несколько методов расчета на сейсмические воздействия, а именно метод спектрального анализа и метод расчета с учетом нелинейности на основе прямого интегрирования. Технология спектрального метода основывается на применении реальных динамических характеристик системы «сооружение – грунт – основание».

В действующих нормативных документах принято, что сейсмическое ускорение фундаментов (и всего сооружения) и основания совпадает. Однако, экспериментальные данные свидетельствуют, что ускорение фундаментов могут в несколько раз отличаться от ускорений грунтов основания [1]. Это обстоятельство можно объяснить тем, что не вся энергия сейсмического возмущения от грунта основания передается на фундамент, т.е. передается некоторая часть возмущения из-за особенностей связей между фундаментом и основанием. «Потеря» (утечка) части этой энергии может происходить по двум причинам:

- ✓ из-за демпфирующего эффекта (естественного или инженерного искусственного) связей между фундаментом и основанием (в том числе из-за сейсмоизоляции);
- ✓ из-за «проскальзывания» горизонтальной сейсмической волны под фундаментом (при преодолении сил трения и специфики односторонних связей между фундаментом и основанием);

- ✓ из-за разброса жесткостей и величины масс в моделях здания (высотная и стилобатная части)

При расчете на сейсмические воздействия применяются различные методики компьютерного моделирования, учитывающие вышеперечисленные эффекты.

Приведем пример одной из методик. На рис. 4.20 приведена структурная схема расчета конструкции, характерной особенностью которой являются неравномерные жесткости и массы отдельных ее частей (высотная и стилобатная часть). Высотная часть при расчете на горизонтальные нагрузки имеет небольшие жесткости и небольшие массы. Жесткости и массы стилобатной части значительно больше. При расчете такого класса зданий первые формы колебаний будут принадлежать той части конструкции, которая вносит небольшой вклад в общую сейсмическую нагрузку. Вместе с тем, формы колебаний, характерные для стилобатной части и вносящие значительный вклад в общую сейсмическую нагрузку относят к высшим формам колебаний. И для того, чтобы получить приемлемую величину сейсмической нагрузки, необходимо учесть большое количество частот колебаний. Для того, чтобы получить формы колебаний той части конструкций, которая вносит значительный вклад, необходимо значительно увеличивать время расчета либо принять вариант определения величины сейсмической нагрузки с некоторым приближением. Для задач, содержащих сотни тысяч масс, определение корректной величины сейсмической нагрузки становится нереальной задачей.

Предлагаемая методика расчета заключается в следующем. Сейсмическое воздействие моделируется двумя загрузками. Активные динамические массы в различных по жесткости частях здания задаются в разных загрузках (например, высотная и стилобатная части здания), с последующим суммированием результатов расчета с помощью РСУ и РСН.

На рис. 4.20 а, б представлены расчетные модели для описанной методики, а на рис. 4.21 и в табл. представлены результаты расчета по двум методикам. Рисунок 4.20 а представляет классическую схему приложения нагрузок, где в первом загрузке прикладывается нагрузка от собственного веса и длительная нагрузка на ригели всех этажей (6 т/м), во втором загрузке: семибалльное сейсмическое воздействие на все здание (сбор динамических масс выполняется автоматически из первого статического загрузке).

На рис. 4.20 б представлена следующая схема моделирования сейсмической нагрузки. Вначале рассматривается вариант приложения нагрузок: длительная нагрузка на ригели стилобатной части здания (6 т/м); собранная нагрузка от верхней части здания приложенная на нижние колонны верхней части здания и семибалльное сейсмическое воздействие (сбор динамических масс выполнялся автоматически из первого статического нагружения), приложенное к стилобатной части. Затем (второй вариант) длительная нагрузка прикладывается на ригели верхней части здания (6 т/м) и семибалльное сейсмическое воздействие (сбор динамических масс выполнялся автоматически из первого статического нагружения), приложенное к верхней части здания. Результаты расчета суммируются.

Результаты расчета, представленные на рис. 4.21 и в табл. 4.5, демонстрируют факт, что усилия и перемещения при расчете по классической методике (схема рис. 4.20 а) идентичны усилиям и перемещениям, полученным при расчете по приведенной методике суммирования результатов. При этом реальную картину сейсмических нагрузок возможно получить уже на первых формах колебаний.

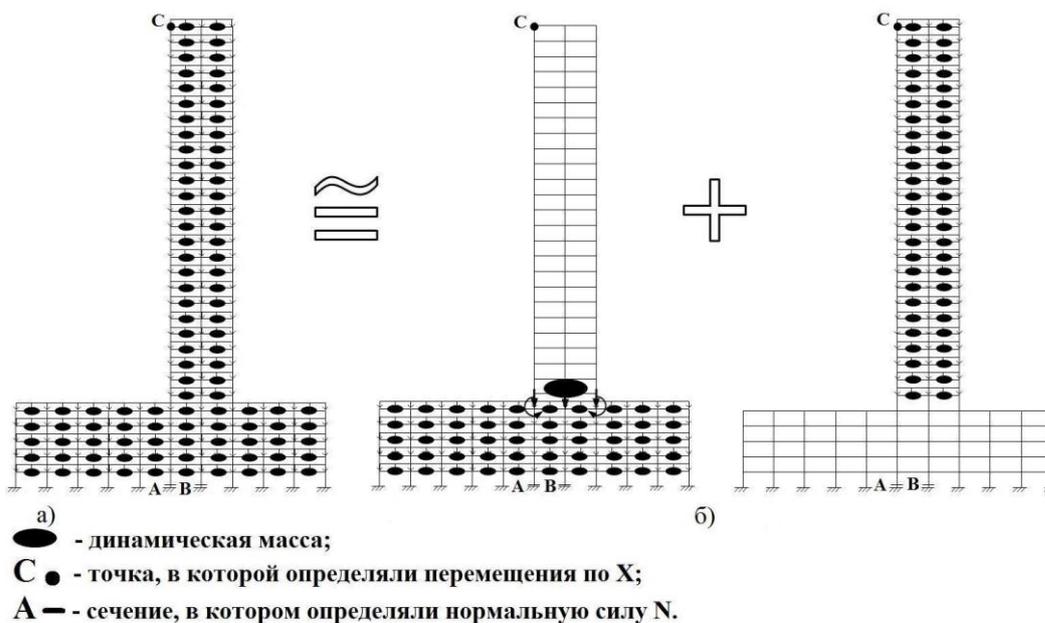


Рис. 4.20. Структурная схема расчета здания с различными жесткостями:

а) классическая схема приложения нагрузок и масс;

б) схема моделирования сейсмической нагрузки двумя нагружениями

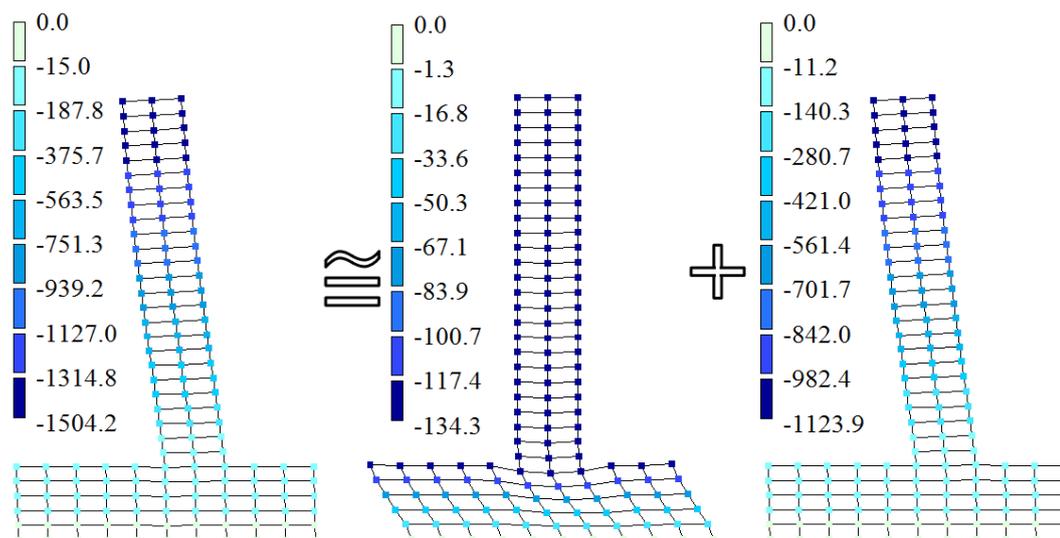


Рис.4.21. Результаты перемещений по расчетам по трем схемам

Таблица 4.5

Усилия и перемещения элементов многоэтажной рамы

Параметры напряженно-деформированного состояния	Расчетная схема I (стандартный вариант расчета)	Расчетная схема II (нагрузка на стилобатной части)	Расчетная схема III (нагрузка на верхней части)	Сумма с РСУ, РСН	Погрешность, %
Нормальная сила N в колонне в т. А (ось 6), т	-2079.98	-1236.53	-648.57	-1885.1	9.37
Нормальная сила N в колонне в т. В (ось 7), т	-1386.01	-1419.78	-0.011	-1419.79	3.01
Перемещение т. С по оси X, мм	-1502.6	-134.21	-1122.73	-1256.94	16.34

Расчет по схеме «б» требует значительно меньшего расхода компьютерного времени, так как расчет по общей схеме, включающей

высокочастотную часть (верхнее строение) и низкочастотную (стилобатную) часть требует определения большого количества форм колебаний.

При решении задач динамики спектральным методом возможно использование согласованной (6 масс в узле) и диагональной (3 массы по линейным направлениям) матрицы масс. При одинаковой конечно-элементной сетке использование согласованной матрицы дает более точный результат, использование диагональной матрицы даст высокую скорость расчета, а для повышения точности необходима более мелкая триангуляция. (рис. 4.22)

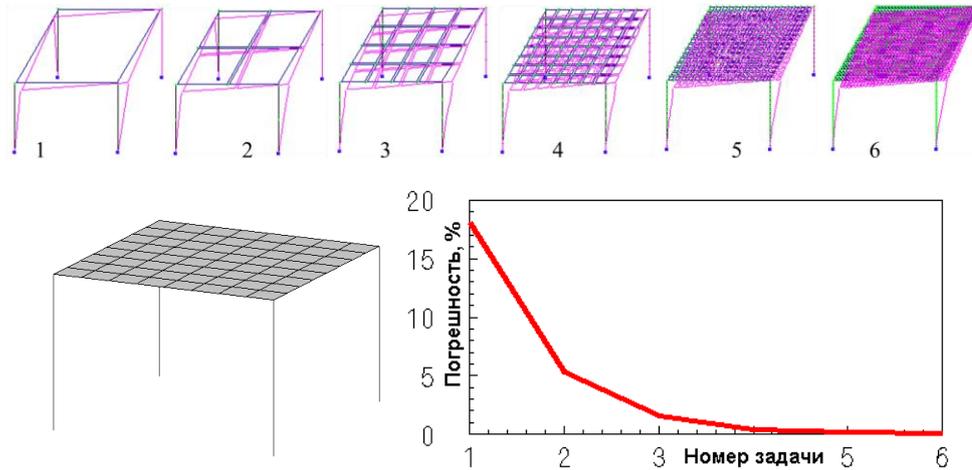


Рис. 4.22. Сравнение определения первой частоты колебаний для системы с использованием диагональной матрицы масс.

Развитие и применение методов конструктивной сейсмобезопасности диктуется современной объективной необходимостью и объясняется требованиями повышения безопасности (живучести) строений, стремясь обойти сложности моделирования сейсмических воздействий и несовершенства теории и методов расчета.

Разработка новых методов компьютерного моделирования с учетом перспективных разработок методов расчета на сейсмические воздействия, такие как расчет по сейсмограммам, учет нелинейных свойств материалов, позволяет корректно провести численные эксперименты и разработать ряд конструктивных мероприятий по сейсмобезопасности зданий и сооружений.

К некоторым конструктивным предложениям можно отнести следующие:

- ✓ фундамент вместе с наземной частью должен представлять замкнутую многосвязную систему;
- ✓ устраивать фундамент в виде сплошной платформы достаточной жесткости;
- ✓ между фундаментной плитой и основанием организовывать скользящий слой, минимизирующий передачу горизонтальных сейсмических смещений основания на фундаментную плиту, т.е. максимально снизить передачу сейсмических воздействий на фундамент;
- ✓ искусственные демпферы, устанавливаемые на оголовки свай.

#### **4.7.3. Моделирование влияния метрополитена на несущие конструкции близстоящих зданий**

Нередко из-за недостатка свободных площадей в крупных городах строительство жилых и общественных зданий производится вблизи линий метрополитена. По характеру передачи колебательной энергии на сооружение транспортная вибрация является кинематическим возмущением исследуемого сооружения. Рост всех видов грузопотоков, увеличение скорости и интенсивности движения транспорта обуславливают необходимость получения качественных и количественных оценок влияния транспортной вибрации на сохранность зданий. Как в отечественной, так и в зарубежной литературе периодически появляются сообщения об отрицательных последствиях транспортной вибрации, однако она, как правило, не учитывается ни при новом строительстве, ни при реконструкциях существующих зданий и сооружений. То, что транспортная вибрация не приводит в настоящий момент к чрезвычайным ситуациям, в определенной степени объясняет и практическое отсутствие нормативов, регламентирующих ее интенсивность в численных оценках по критериям прочности и надежности объектов.

Учитывая общее физическое старение существующих зданий, особенно памятников архитектуры, которые не будут сноситься при модернизации исторически сложившихся центров, вопросы обеспечения надежности сооружений, связанные с транспортной вибрацией, могут в ближайшее время стать вполне актуальными. Выдвижение на передний фронт прикладной науки проблем динамики сооружений в значительной

степени обусловлено быстрым ростом их энергонасыщенности, внедрением новых конструкционных материалов и нестандартных пространственных решений.

Прямое применение традиционных теоретических методов решения задач динамики и методы классической строительной механики не дают устойчивых решений, пригодных для практического применения.

Численное моделирование воздействия на сложные строительные сооружения случайных волн той или иной природы является актуальной задачей для обеспечения надежности и безопасности строительных объектов на этапе эксплуатации [170].

В традиционной динамике строительных сооружений в настоящее время принята концепция собственных частот колебаний строительных элементов, совпадения которых с частотой нагружения приводят к резонансным явлениям. Однако все чаще мы сталкиваемся как в нашей стране, так и за рубежом с катастрофическими разрушениями достаточно сложных, пространственно развитых сооружений. Маловероятно, что причиной этих событий являются статические нагрузки. Скорее всего, такие сложные сооружения находятся в области критической устойчивости. При малом случайном воздействии в нелинейной сложной системе может разыгаться каскад бифуркаций, что приведет к катастрофическому разрушению. Хотелось бы подчеркнуть, что это не резонансные явления и даже не ошибки при проектировании и строительстве – просто здание конструировалось исходя из классических принципов строительной механики, а в результате эксплуатации система оказалась на границе критической устойчивости.

Рассматриваемая проблема имеет следующие основные задачи:

- ✓ измерение динамики грунта и вибрации сооружений от различного типа транспортных потоков и их сочетаний;
- ✓ получение оценок уровня риска превышения динамикой грунта и исследуемых сооружений нормативно-допустимых значений;
- ✓ разработка методики численного моделирования влияния воздействий вибраций на здания и сооружения, находящиеся вблизи метрополитена.

В условиях динамического воздействия наиболее устойчивы к вибрациям конструкции из монолитного железобетона. По сравнению со зданиями из сборных железобетонных элементов они позволяют снизить

уровни вибраций перекрытий на 5-8 дБ. Такое снижение обусловлено особенностями динамической работы монолитных конструкций, испытывающих не резонансы, а более «мягкие» резонансные явления. Наиболее приемлемой схемой здания в этом случае является колонный каркас, эффективность которого увеличивается с увеличением толщины плит перекрытий и уменьшением сечений колонн. В качестве фундамента всегда рекомендуется использовать сплошную монолитную железобетонную плиту, сглаживающую влияние неоднородностей грунтового основания и способствующую распределению колебаний по площади фундамента и, следовательно, их снижению. Монолитные здания, построенные для административно-общественных нужд, могут располагаться даже в непосредственной близости от тоннелей метро.

Методы расчёта, основанные на классических методах, не всегда позволяют полностью обеспечить выполнение данных требований. В связи с этим разрабатываются методы расчёта максимально приближенные к реальным условиям. Поэтому большое значение приобретает создание компьютерных моделей адекватно описывающих работу несущих систем зданий при влиянии динамических нагрузок, вызванными воздействиями метрополитена.

Было проведено исследование для метрополитена глубокого и мелкого заложения.

Для изучения поведения работы несущих конструкций многоэтажного здания, расположенного в 10 м от туннеля метрополитена мелкого заложения разработана абстрактная компьютерная модель здания, с фундаментной плитой и моделью грунта, в котором смоделировано движение метрополитена. Поскольку длина поезда метрополитена достигает 140 м, что превосходит длину обычного жилого дома или длину его температурного блока, при проведении численного эксперимента ограничиваемся рассмотрением плоской задачи.

При движении вагонов метрополитена возникает несколько источников колебаний. Это работа двигателя, компрессора, тормозной системы вагона. Колебания с частотой 35-50 Гц вызываются вертикальными колебаниями неподрессоренных масс вагонов. Колесную пару можно рассматривать как систему с одной степенью свободы, упругостью является упругость рельсового основания. Собственная частота такой системы – 40 Гц. Колебания с частотой 50-60 Гц возникают при воздействии

горизонтальных колебаний. Движение поездов метрополитена вызывает колебания строительных конструкций зданий с частотой 35-60 Гц и амплитудой от долей микрона до 1-3 мкм. Преобладающими являются горизонтальные колебания. Вертикальные колебания имеют тот же частотный состав вдвое, втрое меньшую амплитуду. Наибольшие амплитуды горизонтальных колебаний наблюдаются в уровне пола подвала здания. Здесь амплитуды колебаний стен в 2-2,5 раза больше амплитуд лестничной площадки первого этажа. Выше первого этажа амплитуды колебаний могут изменяться как в направлении уменьшения, так и в направлении некоторого увеличения.

Первопричиной возникновения колебаний является контактное взаимодействие колес подвижного состава и рельсов. Основной причиной возбуждения вибрации системой колесо-рельс является наличие стыков пути, что приводит к подскоку колеса на стыке и неравномерности нагрузки при переходе колеса с одного рельсового звена на следующее [190, 191].

Компьютерное моделирование произведено с применением программного комплекса ЛИРА-САПР методом интегрирования динамических воздействий. Приведенный в данной работе численный эксперимент дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложной системы «наземная часть здания – основание – грунт – тоннель метрополитена с движущимся поездом», заменяя, таким образом, экспериментальные исследования вычислительным экспериментом. Такая реализация приводит к экономии времени при решении ряда подобных задач, и позволяет сделать соответствующие выводы по напряженно-деформированному состоянию несущих конструкций, подвергающимся постоянному воздействию динамических нагрузок.

В программном комплексе расчет производился с помощью подсистемы ДИНАМИКА+ [28, 29]. Была задана вертикальная динамическая нагрузка вдоль оси Z с амплитудой колебаний  $\omega=35$  рад, что соответствует  $f=50$  Гц, количество учитываемых форм колебаний – 100. Выполнен расчет с шагом интегрирования 0,1 с, время интегрирования – 30 с.

На рис. 4.23 а, б и рис. 4.24 а, б приведены расчетные схемы и результаты расчета, на которых отображена форма которую принимает расчетная схема при  $t=16$  с.

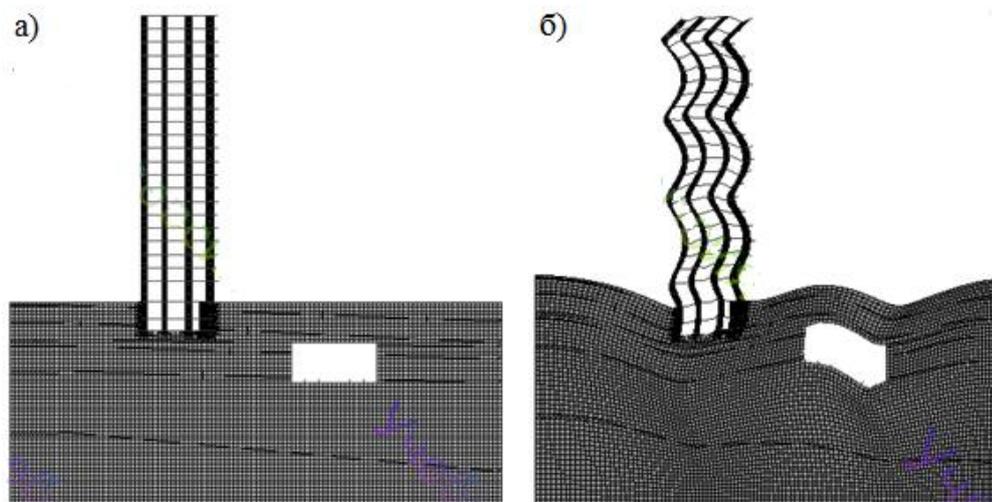


Рис. 4.23. Расчетная схема для учета воздействия метрополитена  
мелкого заложения,  
а – до динамического воздействия; б – после динамического воздействия

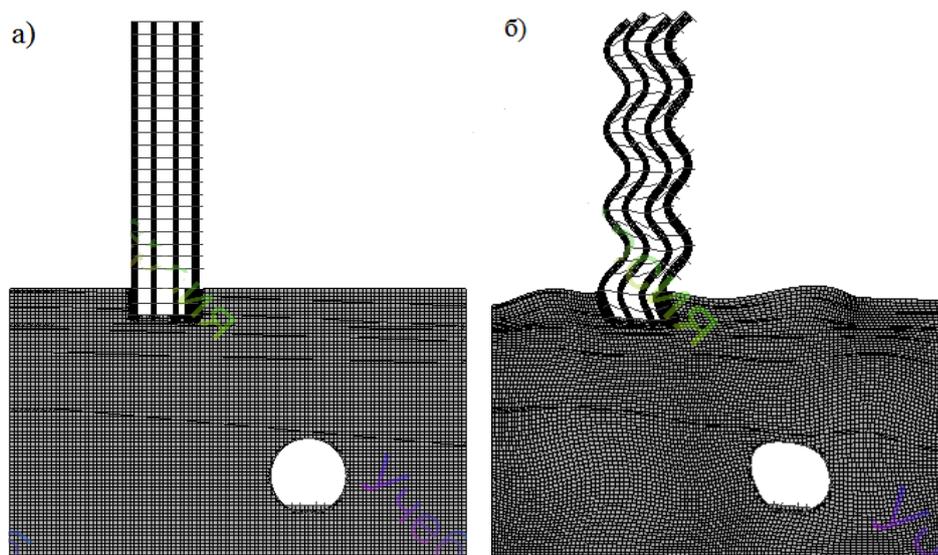


Рис. 4.24. Расчетная схема для учета воздействия метрополитена  
глубокого заложения,  
а – до динамического воздействия; б – после динамического воздействия

На рис. 4.25 приведены графики ускорений в контрольной точке А.

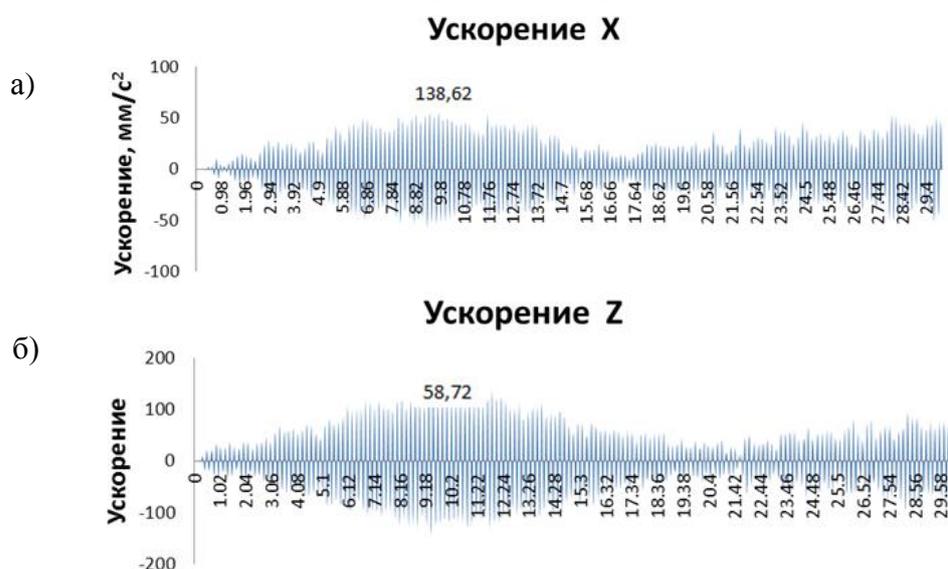


Рис. 4.25.

а - ускорение вдоль оси X в точке А (мелкого заложения);

б - ускорение вдоль оси Z в точке А (мелкого заложения)

В таблице 1 дан сравнительный анализ допустимых виброускорений согласно Санитарных норм, норм ISO [184, 185], и полученных в численном эксперименте результатов.

Допустимые средние квадратичные значения виброускорения по оси Z приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Виброускорения согласно различным нормативным документам

Обозначение нормативного документа	$a \cdot 10^{-3}$ , $m/s^2$ в октавной полосе со среднегеометрической частотой, Гц	
	31,5	56
СН.2.4/2.1.8.566	7,0	12,75
ISO 2631-2	27,6	49,06
Результаты эксперимента № 1	50,38	112,55
Результаты эксперимента № 2	58,72	138,62

При контроле вибрации в жилье от движения поездов метрополитена в качестве нормируемого параметра используется виброускорение, опираясь при установлении допустимого значения на порог чувствительности человеческого организма. Это позволяет перейти к двухметрической оценке воздействия вибрации: по максимальному и эквивалентному значениям нормируемого параметра. В результате проведения численного эксперимента получены данные, из которых видно, что движение вагона метро создает ускорение на верхнем этаже вдвое превышающее допустимое. Поэтому рекомендуется при строительстве использовать демпфирующие устройства и принимать конструктивные меры по снижению уровня проникающей вибрации.

В каждом конкретном случае требуется тщательный подбор параметров виброзащитных мероприятий с учетом физических моделей применяемых систем, конкретных технических и геологических условий.

Анализ проблемы безопасности зданий и сооружений показал, что при воздействиях, не предусмотренных первоначальным проектом или в аварийных ситуациях при наличии в конструкциях трещин и дефектов, требуется более точное моделирование геометрии и свойств материалов с учетом накопления повреждений и структурного разрушения, способности поврежденных материалов воспринимать внешнюю нагрузку. Поэтому интерес представляют задачи и методы расчета несущей способности и процессов разрушения реальных строительных конструкций, и подходы к моделированию строительных объектов с трещинами и дефектами, полученными на разных этапах жизненного цикла здания с учетом нелинейного поведения и возможного разброса механических свойств строительных материалов.

Проведение таких исследований становится возможным при использовании методов математического моделирования с использованием численных методов и современных программных комплексов.

## Глава 5 . МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИЙ

### 5.1. Общие положения. Основные определения

Надежность строительного объекта – это его свойство сохранять эксплуатационные качества в течение заданного отрезка времени. Для строительного объекта такое определение дает возможность широкой трактовки. Так, выход из строя лифта, систем водоснабжения и вентиляции в высотном доме также являются факторами, обуславливающими надежность строительного объекта. Однако, как правило, под надежностью строительного объекта понимают надежность конструкций, так как выход их из строя не только прекращает функционирование объекта, но и может повлечь человеческие жертвы и привести к невозможности восстановления объекта.

Для строительной продукции (зданий, строений и сооружений) основным видом безопасности является конструкционная, характеризующая способность несущего каркаса объекта сопротивляться перегрузкам в чрезвычайных ситуациях и трактуемая как отсутствие в нем недопустимого риска аварии.

Уровень конструкционной безопасности считается достаточным, если фактический риск аварии объекта находится в области приемлемых значений [39, 48, 83, 166].

Границами такой области служат два стандартных значения риска: нормальное, являющееся допустимым значением риска аварии для новых (строящихся) зданий (сооружений), и предельно-допустимое значение, при достижении которого на объекте, находящемся в эксплуатации, следует произвести ремонтные работы с целью снижения риска аварии и продления его безопасного ресурса. Существует и третье стандартное значение риска аварии – предельное, при достижении которого физический (конструкционный) износ объекта становится предельным, а способность несущего каркаса сопротивляться действующим нагрузкам практически исчерпывается.

Область приемлемых значений риска аварии регламентирует уровень конструкционной безопасности зданий и сооружений. Для ее практического применения необходима информация о величине фактического риска аварии [84,87,101].

Инженерные приложения методик расчета риска аварии и безопасного остаточного ресурса зданий и сооружений тесно связаны с процедурами оценки и регулирования уровня конструкционной безопасности строящихся и подержанных зданий и сооружений [146, 147]. Применение этих методик позволяет:

- ✓ отнести техническое состояние исследуемого объекта к одному из трех возможных: безопасному, аварийному или ветхо-аварийному;
- ✓ определить «вклад» каждой группы конструкций несущего каркаса в величину риска аварии исследуемого объекта;
- ✓ рассчитать безопасный остаточный ресурс объекта и сделать прогноз промежутка времени эксплуатации, по истечению которого на этом объекте необходимо произвести мероприятия по снижению риска аварии.

В теории и практике обеспечения безопасности строительных объектов используются следующие основные обозначения и определения:

- ✓ безопасность – свойство объекта в период эксплуатации не создавать угрозы для жизни и здоровья людей, а также угрозы для окружающей среды. В ряде случаев трактуется, как отсутствие недопустимого риска аварии. Считается достаточной, если риск аварии находится в области приемлемых значений;
- ✓ безотказность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние на протяжении заданного срока эксплуатации;
- ✓ надежность несущих конструкций – соответствие конструкции требованиям проекта в части обеспечения ее прочности, жесткости и устойчивости;
- ✓ живучесть – свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации;
- ✓ долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния;
- ✓ авария – предельное состояние объекта, соответствующее полному разрушению, вызванному техногенными или природными

причинами. Достижение таких состояний, как правило, приводит к полной физической непригодности объекта, значительному материальному ущербу и даже к гибели людей;

- ✓ риск аварии – число, показывающее превышение проектного риска аварии, вносимого по умолчанию в строительный объект при его проектировании. Риск аварии является мерой ожидаемого ущерба в случае аварии объекта
- ✓ стандартные риски аварии – значения риска, при достижении которого объект переходит в качественно новое состояние. Такие значения являются инвариантными, и из них формируются требования безопасности строительного объекта;
- ✓ отказ – событие, соответствующее достижению предельного состояния;
- ✓ предельное состояние – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация объекта недопустима

## 5.2. Методика определения риска аварии

Бытующий в среде строителей тезис о том, что здания и сооружения, имеющие достаточный запас прочности по отношению к внешним воздействиям, надежны и по отношению к человеческим ошибкам, практикой не подтверждается: излишний запас прочности не компенсирует ошибки людей. Более того, эти ошибки являются доминирующей причиной аварий объектов строительства.

К окончанию строительства объекта за счёт ошибок людей фактическая  $P_f$  вероятность аварии по сравнению с теоретической (проектной)  $P_m$  величиной возрастает в несколько раз [96]. Этот факт демонстрирует рис. 5.1, на котором приведены законы распределения воздействий  $F$  на объект и его сопротивления  $S$  этим воздействиям. Человеческие ошибки размывают закон распределения сопротивления объекта внешним воздействиям (пунктир на рис. 5.1), что приводит к увеличению вероятности аварии по сравнению с теоретической (проектной) величиной.

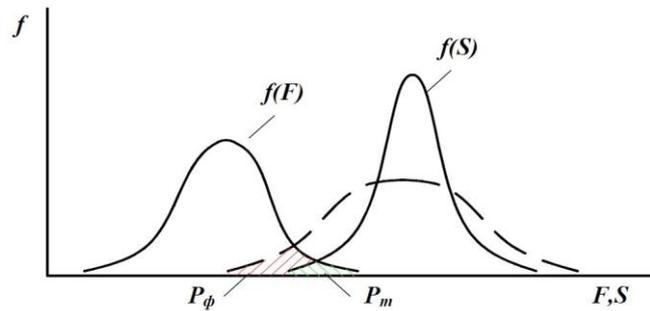


Рис. 5.1. Теоретическая  $P_m$  и фактическая  $P_\phi$  вероятности аварии

Фактическая вероятность аварии объекта может быть представлена в виде:

$P_\phi = P_m + P_\delta$ , где  $P_\delta$  – дополнительная вероятность аварии, формируемая за счет ошибок людей – участников строительства объекта (проектировщиков, поставщиков, строителей, контролеров и др.). Для определения  $P_\delta$  используется теорема гипотез (формула Байеса), позволяющая пересчитать априорные вероятности в свете информации о допущенных ошибках. Вводится два противоположных события:  $C$  – присутствуют ошибки возведения несущих каркасов зданий,  $C^*$  – отсутствуют ошибки. События  $C$  и  $C^*$  образуют полную группу несовместных событий, идентифицируются в процессе строительства, а до начала строительства множество  $C$  пустое. Принимаются следующие обозначения:  $P(C^*) = v$  – вероятность, что в построенном здании ошибок нет,  $P(C) = (1-v)$  – вероятность противоположного события. Априорные (до начала строительства) вероятности наступления и не наступления аварии зданий (сооружений) известны и соответственно равны  $P_m$  и  $(1-P_m)$ . Из формулы Байеса следует соотношение

$$P_\delta = P_m P(C/A) / [P_m P(C/A) + (1-P_m)P(C/A^*)],$$

где  $P(C/A)$  – вероятность события  $C$  при условии, если авария произойдет, а  $P(C/A^*)$  – то же самое, но если авария объекта не произойдет. Приемы нечеткой логики позволяют принять как гипотезу, что условные вероятности

$$P(C/A^*) = v, \text{ а } P(C/A) = 1-v.$$

Действительно, если авария объекта не произойдет, то реализуется событие  $C^*$ , в противном случае – событие  $C$ . После подстановки этих равенств в байесовское соотношение с учетом, что вероятность  $P_m$  имеет порядок  $\sim 10^{-6}$ , имеем,

$$P_{\delta} = P_m (1-\nu)/\nu.$$

Сложение  $P_{\delta}$  и  $P_m$  дает  $P_{\phi} / P_m = 1/\nu$ , в котором под параметром  $\nu$  следует понимать уровень конструкционной надежности несущего каркаса здания.

Столь малые вероятности, каковыми являются величины  $P_{\phi}$  и  $P_m$ , могут быть поняты практиками лишь через свое отношение, являющееся целочисленной величиной. Здесь важно то, что вероятность  $P_m$  как концепт существует (см. рис. 5.1) и гипотетически достигается в случае, если при возведении несущего каркаса ни разу не будут нарушены требования проекта. Поскольку на практике объективно такие нарушения имеют место, то величина  $P_{\phi} / P_m$  всегда больше 1. Так как эта величина показывает, во сколько раз фактический риск аварии выше проектного значения риска, вносимого по умолчанию в объект при его проектировании, она является интегральным показателем технического состояния несущего каркаса объекта, и, следовательно, может быть принята за величину риска аварии объекта строительства  $r$

$$r = P_{\phi} / P_m = 1/\nu. \quad (5.1)$$

Распределение величины риска аварии  $f(x)$  может быть принято в виде [96]:

$$f(r) = (r-1)/\sigma^2 \cdot \exp [-(r-1)^2/2\sigma^2]. \quad (5.2)$$

Известно [96], что в распределения (5.2) параметр  $\sigma$  связан с математическим ожиданием (средним значением) риска аварии  $R$  соотношением:

$$R = 1 + 1,25\sigma. \quad (5.3)$$

Для определения среднего значения риска  $R$  следует воспользоваться вытекающим из формулы (5.1) соотношением

$$R = 1/M\nu, \quad (5.4)$$

где  $M\nu$  – среднее значение (математическое ожидание) случайной величины  $\nu$ , численные значения которой находятся в пределах от 0 до 1.

Стандартные риски аварии – это такие средние значения риска, при достижении которых несущий каркас объекта переходит в качественно иное состояние. По определению стандартные риски аварии являются инвариантами, так как не зависят ни от конструктивного типа, ни этажности объекта. Они используются для формирования требований к уровню конструкционной безопасности зданий (сооружений) при оценке технического состояния их несущих каркасов.

К стандартным значениям риска аварии относятся:

- ✓ нормальный (естественный) риск  $R_n$ , регламентирующий величину риска аварии объекта после окончания его строительства;
- ✓ предельно-допустимый риск  $R_{nd}$ , соответствующий переходу объекта из безопасного в аварийное состояние. При достижении такого риска на объекте должны быть произведены ремонтно-восстановительные работы по его снижению;
- ✓ предельный риск аварии  $R_n$ , соответствующий переходу объекта из аварийного в ветхо-аварийное состояние. При достижении такого риска способность объекта сопротивляться действующим на него нагрузкам практически исчерпывается.

Для отыскания стандартных значений риска аварии используется закон распределения (5.2). При этом нормальный риск аварии приравнивается к величине естественного риска для новых зданий (сооружений), показателем которого может служить математическое ожидание закона распределения риска аварии на неограниченном множестве новых зданий (рис. 5.2). На таком множестве закон распределения величины  $\nu$  практически является симметричным относительно значения  $0,5$ . Этот факт означает, что независимо от вида кривой распределения случайной величины  $\nu$  ее среднее значение  $M\nu$  равно  $0,5$ . Тогда из формулы (5.4) следует, что естественный риск аварии строительного объекта, а следовательно, и величина нормального риска  $R_n$  равна 2. Другими словами, фактическая вероятность аварии объекта после окончания его строительства в среднем увеличивается в два раза по сравнению с вероятностью, закладываемой по умолчанию в объект при проектировании.

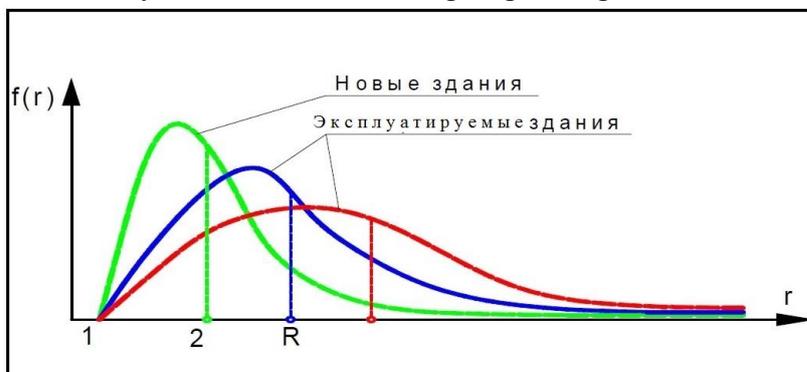


Рис. 5.2. Вид закон распределения риска аварии для новых зданий и его деградация в процессе эксплуатации объектов

Закон распределения риска аварии построенного объекта в процессе эксплуатации размывается (деградирует) (см. рис. 5.2). Причиной деградации закона являются нарушения правил эксплуатации объектов, старение и износ несущих конструкций. В результате совокупного действия этих факторов среднее значение риска аварии смещается вправо. При этом степень неопределенности технического состояния несущего каркаса объекта, показателем которой является величина информационной энтропии, увеличивается. В общем случае (при любом законе распределения) информационная энтропия закона распределения определяется по формуле [96]

$$H = -\sum P(A_i) \log_2 P(A_i), \quad (5.5)$$

где  $P(A_i)$  – вероятность события, определяемая из закона распределения и заключающаяся в том, что риск аварии находится в  $i$ -м диапазоне значений.

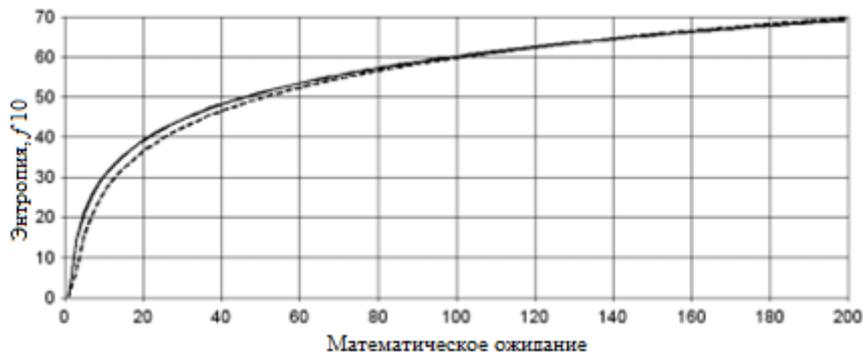


Рис. 5.3. Зависимость информационной энтропии от среднего значения риска аварии объекта строительства

На рис. 5.3 приведен построенный на основе компьютерного эксперимента с формулами (5.2), (5.3) и (5.5) график функции  $H(R)$  (пунктирная линия), показывающий зависимость информационной энтропии от величины математического ожидания  $R$  закона распределения риска аварии. Полученный график аппроксимирован уравнением (сплошная линия на рис. 5.3) вида:

$$H(R) = \log_{2,15} \cdot R. \quad (5.6)$$

График на рис. 5.3 характеризует рост степени неопределенности технического состояния несущего каркаса в зависимости от величины среднего риска аварии объекта, а выражение (5.6) по существу является законом деградации несущего каркаса строительного объекта. Для

практического применения этого закона его теоретическая кривая, показанная на рис. 5.3, разделена на три линейных участка, на стыке которых скорость энтропии скачкообразно меняется, что информирует об изменении технического состояния объекта. Исследования риска аварии новых, подержанных и аварийных строительных объектов различного срока эксплуатации и последующий анализ результатов этих исследований позволил принять решение о расположении стыковых точек (пороговых значений риска аварии), показанных на рис. 5.4. При этом состояние объекта считалось:

- ✓ безопасным, если в его несущих конструкциях не были зафиксированы трещины;
- ✓ аварийным, если зафиксированные трещины не представляли прямой угрозы обрушения конструкции;
- ✓ ветхо-критическим, если имеющиеся трещины представляли собой прямую угрозу обрушения конструкции.

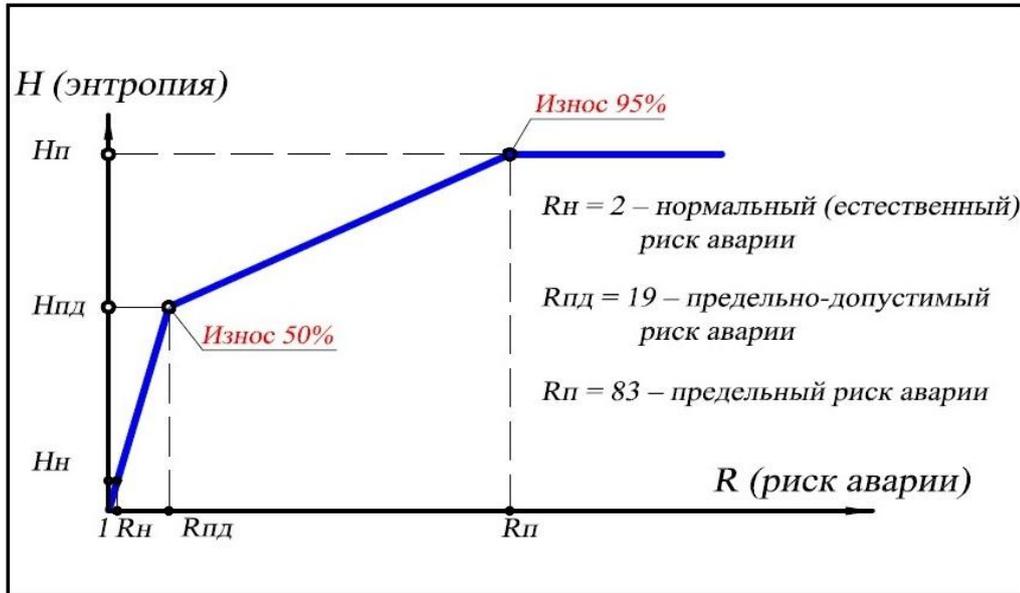


Рис. 5.4. Модель деградации несущего каркаса объекта и пороговые значения риска аварии

Идеализированная диаграмма «энтропия – риск аварии», изображенная на рис. 5.4 позволяет утверждать следующее.

1. Время эксплуатации объекта с момента окончания его строительства до достижения риском аварии первой стыковой точки ( $R=19$ )

определяет безопасный ресурс  $T_6$  объекта. В этот период эксплуатации объекта трещины в конструкциях его несущего каркаса отсутствуют и можно утверждать, что каркас способен сопротивляться не только проектным воздействиям, но и за счет запаса прочности большинству не учтенным при проектировании нагрузкам, возникающим в чрезвычайных ситуациях (так называемые запроектные воздействия). Техническое состояние объекта на этом промежутке времени можно трактовать как безопасное, а величину риска аварии, равную  $19$ , следует принять за предельно-допустимый риск  $R_{nd}$ . При достижении объектом предельно-допустимого риска аварии, величина его физического (конструкционного) износа составляет 50%. При такой величине износа требуется капитальный ремонт здания с целью восстановления способности его несущего каркаса сопротивляться непроектным воздействиям. Если же восстановительные мероприятия на объекте произведены не будут, то риск аварии продолжает расти и время достижения предельного значения риска, равного  $R_n=83$ , определяет предельный ресурс  $T_n$  этого объекта.

2. При превышении объектом предельно-допустимого риска аварии скорость роста информационной энтропии замедляется, что означает переход объекта в иное, отличное от безопасного состояние. Таким состоянием может быть только аварийное, при котором в несущих конструкциях появляются трещины, являющиеся предвестниками аварии. В аварийном состоянии способность несущего каркаса объекта сопротивляться непроектным воздействиям снижается, а с дальнейшим ростом риска аварии полностью исчерпывается.

3. При достижении объектом предельного значения риска аварии  $R_n=83$  максимальной становится не только степень неопределенности технического состояния несущего каркаса, но и величина его конструкционного износа. При  $R > R_n$  способность несущего каркаса объекта сопротивляться любым нагрузкам теоретически исчерпывается, а рост информационной энтропии практически прекращается. Это означает, что объект находится в критически-аварийном состоянии, при котором дата наступления аварии объекта становится открытой.

Стандартные риски аварии  $R_n$ ,  $R_{nd}$  и  $R_n$  являются инвариантами, поскольку из способа их определения следует, что они не зависят ни от конструктивного типа здания, ни от его этажности. Два из них ( $R_n$  и  $R_{nd}$ ) образуют нижнюю и верхнюю границы области (коридора) приемлемых

значений риска аварии объекта. Пока фактический риск аварии остается внутри этого коридора, уровень конструкционной безопасности объекта следует считать достаточным.

### 5.3. Методика решения задач деформирования и разрушения конструкций

Процесс деформирования и разрушения конструкций строительных объектов можно разделить на ряд этапов (см. рис. 5.5).

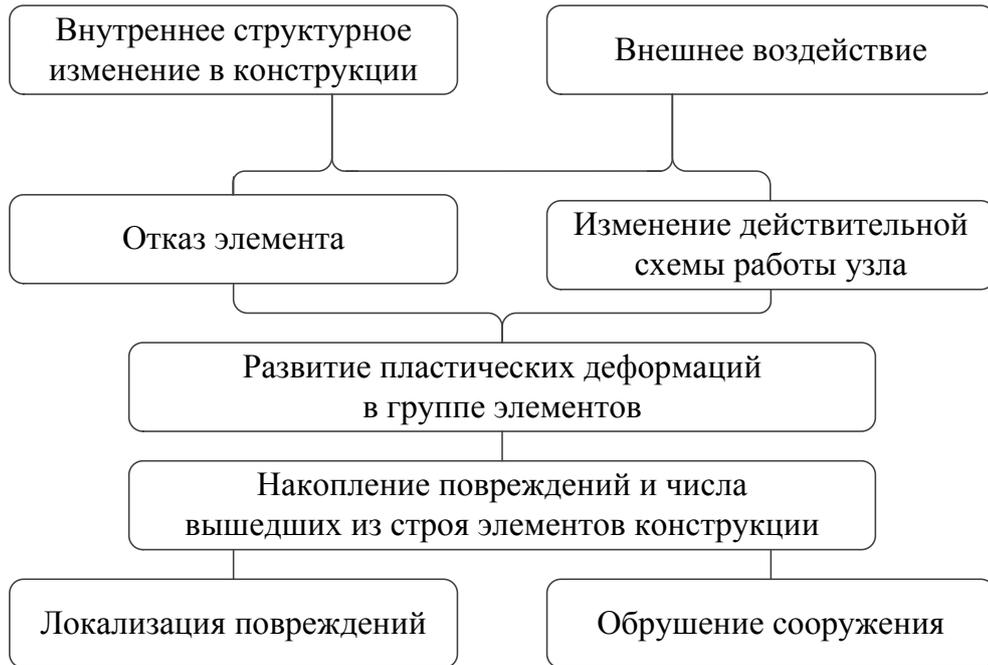


Рис. 5.5. Схема развития аварийной ситуации

Изначально в результате внутреннего структурного изменения (отказ элемента или изменение - его схемы работы) в конструкции начинается процесс изменения режима работы групп элементов с нормального на закритический. Данный процесс сопровождается развитием пластических деформаций, и, в зависимости от свойств материала и времени протекания процесса, накоплением повреждений. В дальнейшем реализуются два сценария: либо происходит накопление «критической массы» поврежденных; и вышедших из строя элементов, при которой происходит

обрушение сооружения, либо происходит локализация повреждений без дальнейшего затрагивания смежных зон конструкции.

С этой точки зрения численное моделирование процесса деформирования и разрушения строительных объектов, оценки общей устойчивости и восприимчивости к структурным изменениям, представляется задачей прохождения каждого из этапов развития аварийной ситуации по приведенной схеме (см. рис. 5.6).

Методику проведения численного моделирования и анализа сложившейся ситуации можно представить в следующем виде (см. рис. 5.2):

1. Оценка жесткостных характеристик, действительных схем работы и остаточных ресурсов несущей способности конструктивных узлов при мгновенном и длительном типах нагружения в условиях нормального режима эксплуатации.

2. Оценка изменения схемы работы и жесткостных характеристик конструктивных узлов при воздействии повышенных нагрузок и развитии пластических деформаций вплоть до выхода из строя.

3. Оценка влияния выявленных схем работы узлов на локальные зоны конструкции.

4. Оценка отклика сооружения на введение возможных выявленных конструктивных изменений

Процессы деформирования, разрушения и обрушения конструкций строительных конструкций по своей сути являются развитыми сильно нелинейными процессами, сопровождающимися большими пластическими деформациями и перемещениями, контактным взаимодействием между группами элементов, динамическими нагружающими эффектами в момент отказа элементов конструкций.

В свете этого результаты комплексного численного моделирования существенно зависят от применяемых методов решения составляющих задач:

- ✓ Нелинейные динамические задачи
- ✓ Геометрически нелинейные задачи с большими перемещениями
- ✓ Геометрически нелинейные задачи с большими деформациями
- ✓ Физически нелинейные задачи с развитой пластикой и накоплением повреждений материалом
- ✓ Задачи контактного взаимодействия различных групп элементов конструкций, в том числе и «самоконтакт»

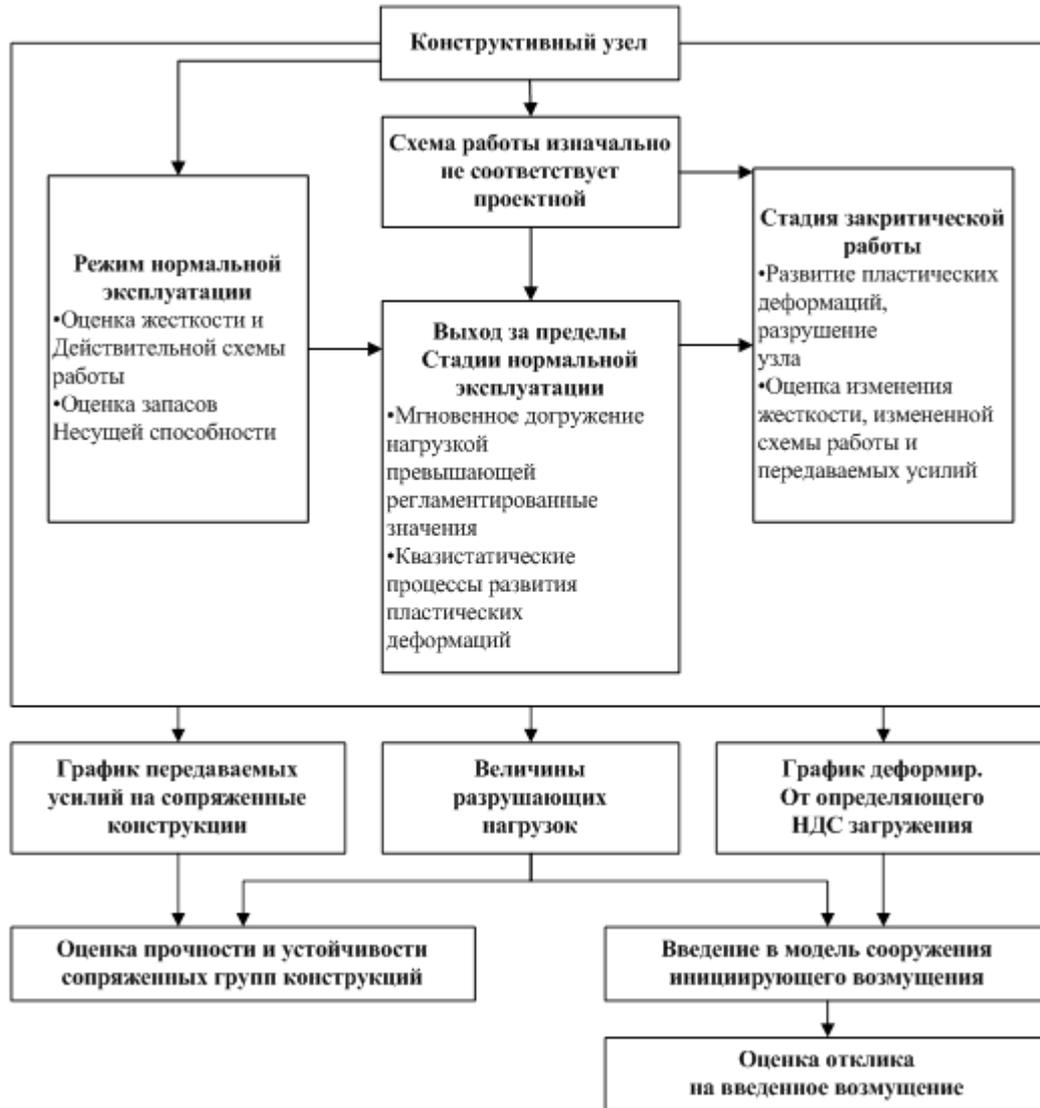


Рис. 5.6. Схема проведения численного эксперимента

#### 5.4. Нормативные требования по обеспечению надежности и конструктивной безопасности строительных объектов

Возможность и необходимость обеспечения надежности строительного объекта обусловила выход соответствующих нормативных документов. В Украине с 01.12.2009г. введены в действие ДБН В.1.2.-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної

безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ». Кроме общих трактований вопросов, связанных с обеспечением надежности строительных объектов (условия эксплуатации и влияние окружающей среды, поддержка рабочего состояния, предупреждение аварий и т.п.) в этом документе содержатся общие указания по расчету безопасности объекта.[25, 116, 122] Условия безопасности формулируются в виде следующих неравенств.

Условие обеспечения безотказности, т.е. невыхода за предельное состояние, записывается неравенством вида

$$g(G_d, f_d, a_d, C, \gamma_n, \gamma_d, T_{ef}) \geq 0, \quad (5.6)$$

где  $g(\bullet)$  - такая функция параметров системы, при которой  $g(\bullet) < 0$  означает достижение запредельного состояния;

$G_d, f_d, a_d$  – расчетные значения нагрузок, прочностных характеристик материалов или сопротивления грунтов и геометрических характеристик конструкции соответственно;

$C$  – ограничение на контролируемый параметр (например, допустимое предельное раскрытие трещины);

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности (коэффициент ответственности), учитывающий значимость конструкции и объекта в целом, а также возможные последствия отказа и учитывается как множитель к расчетному значению нагрузки;

$\gamma_d$  – коэффициент надежности модели, учитывающий неопределенность расчетной схемы и другие аналогичные обстоятельства (например, чувствительность конструкции к локальным разрушениям, начальные несовершенства или повышенную скорость износа) и принимается как множитель до расчетного значения нагрузки.

Зависимость условия (5.6) от времени учитывается в явном виде или путем выбора расчетных значений величин, входящих в (5.6), в зависимости от установленного срока эксплуатации объекта, а именно

$$G_d = G_d(T_{ef}), f_d = f_d(T_{ef}) \text{ и тому подобное.}$$

Для предельных состояний первой группы условие (5.6) чаще всего определяется через две функции:

- $S$  – нагружающий эффект;
- $R$  – несущая способность элемента или поперечного сечения.

Тогда предельное неравенство (5.6) записывается в виде

$$\gamma_n S(G_d, a_d, \gamma_{sd}, T_{ef}) \leq R(f_d, a_d, \gamma_{rd}, T_{ef}) \quad (5.7.a)$$

или (когда это возможно)

$$\gamma_n \gamma_{sd} S(G_d, a_d, T_{ef}) \leq (1/\gamma_{rd}) R(f_d, a_d, T_{ef}) \quad (5.7.б)$$

В формуле (5.7.б) коэффициент  $\gamma_d$  разделен на два множителя, которые отражают неопределенность расчетной модели по отношению к нагружающим эффектам  $\gamma_{sd}$  и несущей способности  $\gamma_{rd}$ , хотя такое разделение не является обязательным.

Предельные состояния второй группы обычно могут быть описаны неравенствами типа

$$S(G_d, f_d, a_d, \gamma_n, \gamma_{sd}, T_{ef}) \leq C / \gamma_{rd} \quad (5.8.a)$$

или

$$\gamma_n \gamma_{sd} S(G_d, f_d, a_d, T_{ef}) \leq C / \gamma_{rd} \quad (5.8.б)$$

где  $C$  – ограничения по эксплуатационной пригодности, соответствующее предельному состоянию, которое рассматривается.

Неравенства (5.6), (5.7) и (5.8) являются принципиальными схемами и должны уточняться для конкретных условий проверки с учетом того, что  $F_d$ ,  $f_d$  и  $a_d$  – это, как правило, несколько величин, а каждое из упомянутых условий может представлять не одну, а несколько совместных неровностей (например, под общим обозначением  $F_d$  следует понимать целый комплекс одновременно действующих нагрузок и воздействий, а при проверке железобетонной конструкции символом  $f_d$  может быть представлена прочность, как бетона, так и арматуры).

Коэффициент ответственности назначается в соответствии с классом ответственности объекта и категорий ответственности конструкций [106]:

А – конструкции, отказ которых может привести к полной непригодности к эксплуатации объекта;

Б – конструкции, отказ которых может привести к осложнениям нормальной эксплуатации, или к отказу других конструкций не принадлежащих к категории А;

В – конструкции, отказ которых может привести к нарушению функционирования других конструкций или элементов.

Таблица 5.1

Класс последствий (ответственности)	Категория ответственности конструкции	Значения $\gamma_n$ , используемых в расчетных ситуациях				
		постоянных		переходных		аварийных
		первая группа предельных состояний	вторая группа предельных состояний	первая группа предельных состояний	вторая группа предельных состояний	первая группа предельных состояний
СС3	А	1,250	1,000	1,050	0,975	1,050
	Б	1,200		1,000		
	В	1,150		0,950		
СС2	А	1,100	0,975	0,975	0,950	0,975
	Б	1,050		0,950		
	В	1,000		0,925		
СС1	А	1,000	0,950	0,950	0,925	0,950
	Б	0,975		0,925		
	В	0,950		0,900		

**Примечание 1.** Если в нормах проектирования определенных типов зданий или сооружений не приведено конкретных рекомендаций по распределению конструкций по категориям ответственности согласно классам последствий (ответственности), разрешается их относить к категории Б.

**Примечание 2.** Для временных зданий и сооружений с установленным сроком эксплуатации до трех лет значения принимаются как для объектов класса 4В независимо от класса последствий (ответственности) конструкции.

Таблица 5.2

Класс последствий от отказа (ответственности) здания или сооружения	Характеристики возможных последствий от отказа здания или сооружения					
	Возможная опасность, количество лиц			Объем возможного экономического ущерба, м.р.з.п.	Потери объектов культурного наследия, категории объектов	Прекращение функционирования объектов коммуникаций транспорта, связи, энергетики, других инженерных сетей, уровень
	Для здоровья и жизни людей, постоянно находящихся на объекте	Для здоровья и жизни людей, периодически находящихся на объекте	Для жизнедеятельности людей, находящихся вне объекта			
СС3 значительные последствия	свыше 400	свыше 1000	свыше 50000	свыше 150000	национального значения	общегосударственный
СС2 средние последствия	от 50 до 400	от 100 до 1000	от 100 до 50000	от 2000 до 150000	местного значения	региональный, местный
СС1 незначительные последствия	до 50	до 50	до 100	до 2000	—	—

В ДБН В.1.2.-14-2009 указывается, что при наличии альтернативных нормативов или при отсутствии в задании указаний по их использованию методы расчета конструкций на безопасность и надежность может выбирать проектировщик.

В ДБН В.1.2.-14-2009 также указано, что проектировщик может использовать вероятностный расчет надежности для уникальных и особо ответственных объектов, если это указано в задании на проектирование, выданным заказчиком проекта и согласовано с генеральным проектировщиком.

При проведении вероятностного расчета могут быть использованы материалы ДБН В.1.2.-14-2009 (рекомендованное дополнение В – вероятностный расчет надежности) или методы, описанные в разделах 5.2 и 5.3.

## **Глава 6 . Информационная поддержка жизненного цикла объекта строительства**

Информационная поддержка жизненного цикла несущей системы объекта строительства производится посредством использования информационной модели конкретного здания или сооружения, отражая его свойства, состояние, взаимосвязь с внешней средой. В настоящее время, во многих отраслях промышленности, при создании информационных систем используют CALS- технологии (Continuous Acquisition and Life-cycle Support), которые позволяют в период проектирования и строительства формировать информационную модель объекта. Основным блоком CALS являются стандарты, обеспечивающие взаимосвязанность данных в процессах проектирования, производства и эксплуатации объекта. Стандартом CALS является модель, которая определяет технологию электронного представления данных об объекте (составе, свойствах, геометрических и физических характеристиках, изменениях модели и т.д.), и логическую модель данных представляющую собой готовое решение, на основе которого создается логично организованная база инженерных данных. Исходя из этого, создание информационной модели любого строительного объекта может основываться на использовании CALS-технологий [111, 112].

Поэтому обобщение в единую информационную модель математических моделей, методов, и программного обеспечения для определения НДС элементов несущей системы здания, адекватно описывающих поведение несущих конструкций на любой стадии жизненного цикла объекта строительства, является актуальной задачей.

### **6.1. Моделирование пространственной работы несущей системы объекта строительства на всех стадиях жизненного цикла**

Для управления объектом строительства и получения достоверной информации о напряженно-деформированном состоянии несущих элементов на любой стадии его ЖЦ создается информационная модель. Информационная модель создается совокупностью программных

комплексов, моделирующих пространственную работу конструктивных элементов с учетом взаимосвязей на различных стадиях жизненного цикла и баз данных, в которых отражены свойства, параметры и состояние объекта, его взаимосвязь с внешним миром, данные о нагрузках и воздействиях. Таким образом, производится замена реального объекта или процесса его поведения на всех этапах его ЖЦ его формальным (виртуальным) описанием. С помощью информационной модели анализируются свойства объекта, прогнозируется его поведение, решаются управленческие и конструкторские задачи и т.п. Использование информационной модели в конструкторской практике позволяет решить ряд вопросов:

- ✓ динамика изменения прочностных характеристик объекта при различных воздействиях и изменениях НДС на всех этапах его ЖЦ;
- ✓ диапазон предельных воздействий на объект, не изменяющих параметрические и прочностные характеристики несущей системы объекта строительства.

Информационные модели несущих конструктивных систем объекта строительства являются неотъемлемой частью строительного производства, основываются на математических моделях, учитывающих пространственную работу несущих систем на любой стадии жизненного цикла, содержат сведения обо всех изменениях, произошедших в исследуемом объекте. На рис. 6.1. приведена информационная модель объекта строительства. Формирование базовой информационной модели начинается на стадии архитектурно-строительного проектирования с помощью программного комплекса САПФИР, дальнейшие изменения напряженно-деформированного состояния соответствующим образом отражаются в базе данных и определяются с помощью программного комплекса ЛИРА-САПР, входящего в структуру создания информационной модели на протяжении всего жизненного цикла здания.

На стадии архитектурно-строительного проектирования в информационной модели формируются топология объекта, концепция, т.е. все атрибуты архитектурного проекта. Далее определяются величины внешних нагрузок и схемы загрузений; внутренние усилия и перемещения, полученные в результате расчета в ПК ЛИРА-САПР; конструктивная схема несущей системы; особые условия проектирования и строительства; формируется окончательный проект с указанием реальных характеристик используемых материалов и конструкций.

На стадии возведения в информационной модели отражаются схемы возведения здания и способы монтажа конструктивных элементов; величины внешних нагрузок и схемы нагружения; внутренние усилия и перемещения, полученные в результате расчета с учетом процесса возведения; отклонения от проектных величин и несоответствия, возникшие в результате монтажа.

На стадии эксплуатации в информационной модели отражаются данные об изменениях напряженно-деформированного состояния несущей системы в результате возникновения нештатных ситуаций; данные по оценке эксплуатационной пригодности конструкций; накапливаются результаты мониторинга несущей системы; отражаются сведения по усилению конструктивных элементов и изменению их расчетных схем.

Важным моментом является наличие в электронном виде проектных данных, данных комплексного и тематического мониторинга и данных о процессах негативно влияющих на состояние несущих систем. При этом данная информация должна быть актуальна и легкодоступна в момент возникновения чрезвычайной ситуации для облегчения принятия проектных решений.

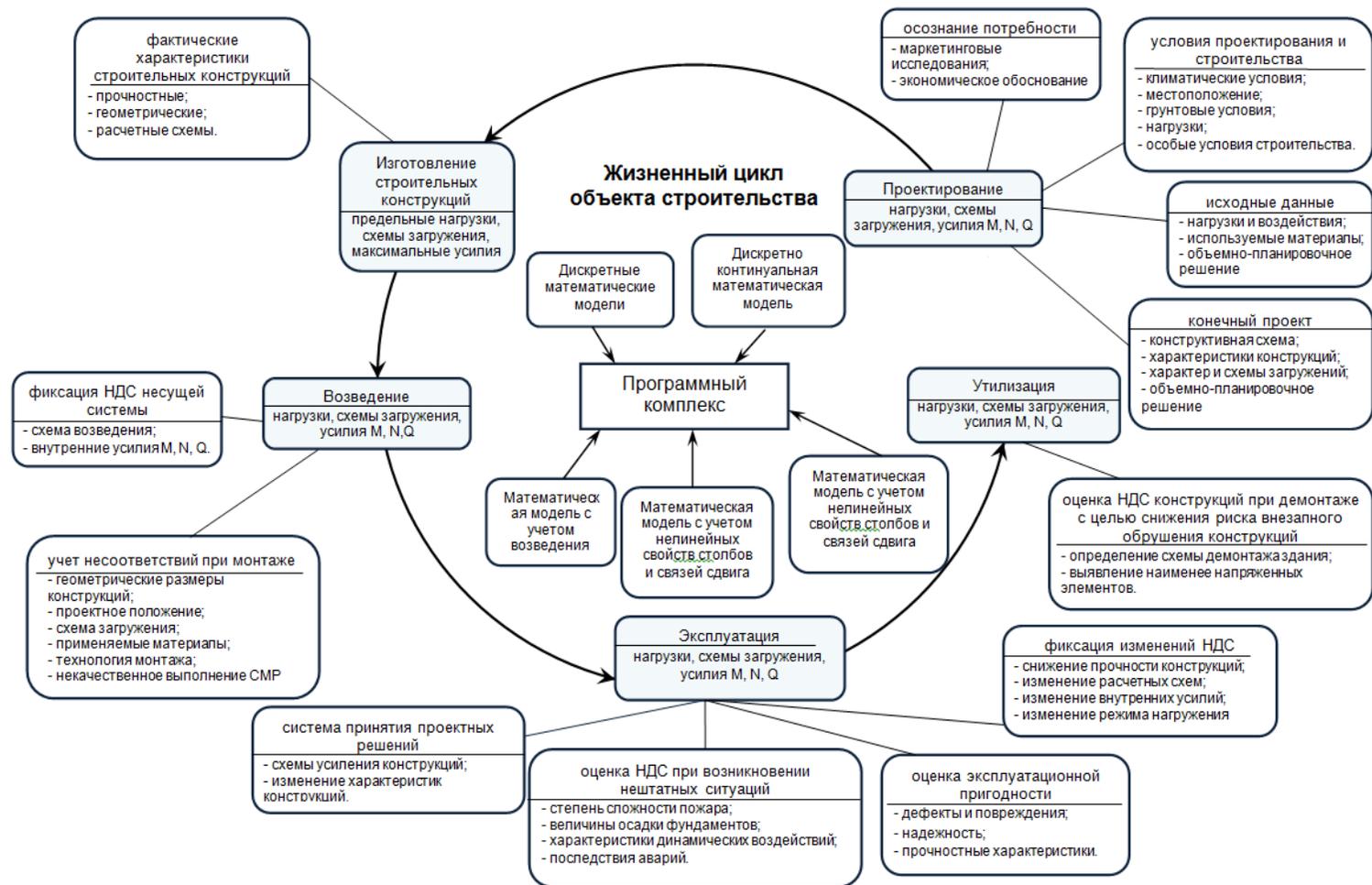


Рис. 6.1. Информационная модель жизненного цикла объекта строительства

Таким образом, создается целостная и взаимосвязанная система управления зданием, интегрированная не только на уровне геометрических моделей и графических интерфейсов, но и на уровне математического описания различных свойств объекта проектирования. Более того, данная система дает возможность говорить об использовании единого информационного пространства на всех этапах жизненного цикла здания.

Информационные модели несущих систем зданий удобны для решения возникающих исследовательских, проектных, производственных и учебных задач, т.к. позволяют проводить компьютерное моделирование и численные исследования объектов строительства. Современное развитие компьютерных технологий позволяет проводить серии численных экспериментов, учитывая различные факторы и моделируя различные ситуации, таким образом, прогнозируя поведение несущей системы при возникновении нештатных ситуаций. Использование информационной модели позволит инженеру принимать наиболее обоснованные и экономически верные решения при возникновении задач, связанных с определением действительного напряженно- деформированного состояния. Такими задачами могут быть реконструкция, утилизация, усиление и т.п. задачи, связанные с определением эксплуатационной пригодности зданий.

## **6.2. Основные подходы и расчетные модели, используемые при расчете и проектировании объекта строительства**

Одним из наиболее важных вопросов проектирования объекта строительства является вопрос выбора конструктивной схемы.

Основные подходы, применяемые при выборе конструктивной схемы объекта строительства наиболее полно можно продемонстрировать при проектировании высотных зданий и сооружений. Высотные здания представляют собой сложные пространственные многоэлементные системы. В них в различных сочетаниях могут соединяться стержневые элементы, элементы плит и оболочек. Численный анализ работы таких сложных систем при воздействии на них статических и динамических нагрузок в настоящее время решается с помощью современных программных комплексов, реализующих конечно-элементные методы расчёта.

В нашей стране развитие высотного домостроения, как и нормативной базы для него, началось сравнительно недавно, гораздо позже

появления вычислительных ресурсов. Можно утверждать, что само проектирование высотных зданий и сооружений неотъемлемо связано с расчетными подходами и методиками и не может быть рассмотрено без контекста компьютерных технологий. Говоря о методах моделирования и анализа НДС несущих конструктивных систем, прежде всего, ориентируемся на современные программные комплексы, усовершенствование реализованных алгоритмов численного моделирования.

**Расчёт объекта строительства в рамках этапа проектирования** представляет собой многоуровневый процесс принятия решений, его обычно проводят по следующей схеме [12, 149, 150]:

1. Анализ конструктивной схемы с целью выявления взаимосвязи элементов конструкции и выбора расчётных моделей, наиболее адекватно отображающих работу строительного объекта в известном интервале вариации нагрузок.

2. Выбор упрощенной расчетной схемы и расчёты в соответствии с этой расчётной схемой с целью предварительного определения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций с учетом принятых сечений элементов, класса бетона, модулей упругости, марок стали и др.

3. Уточнение принятой на предыдущем этапе расчётной модели надземной части объекта, а также фундамента, определение упрощенных расчетных моделей грунтового основания.

4. Расчёт строительного объекта по уточненной расчетной модели на статические нагрузки, а также, при необходимости, на динамические нагрузки, такие как ветровые воздействия с учётом пульсации ветра., сейсмические нагрузки с учетом зоны сейсмичности строящегося объекта, нагрузки от движущегося транспорта и др. В расчёте учитывается влияние податливости основания на собственные частоты колебаний объекта строительства. Особенно это проявляется при расчете высотных уникальных зданий.

5. Окончательная корректировка по результатам расчётов геометрических и прочностных характеристик несущих конструктивных элементов строительного объекта (колонн, балок, диафрагм жёсткости, ядер жёсткости, фундамента).

6. Определение осадок и крена фундамента с учетом физической нелинейности, неоднородности и реологических свойств грунтов основания.

Это наиболее ответственная часть оценки принятых на предыдущих этапах конструктивных решений.

7. Расчет устойчивости на опрокидывание и сдвиг. Этот пункт относится к выполнению расчета высотных или многоэтажных зданий. При расчете устойчивости здания на опрокидывание и сдвиг его конструктивную схему можно рассматривать как жесткое недеформируемое тело, опирающееся на грунтовое основание.

Достаточно часто конструкторы, упрощая расчётную схему здания, вводят ряд различных допущений. Приведем основные из них:

- ✓ диски перекрытий считаются шарнирно связанными с колоннами и диафрагмами, что практически обуславливает принятие жёсткости конструкции на горизонтальные усилия как сумму отдельно взятых жёсткостей диафрагм и колонн;
- ✓ надземная часть конструкций рассчитывается с введением опорных закреплений на уровне верха фундаментной плиты.

Такой подход во многом игнорирует пространственную работу каркаса и эффекты, связанные с совместной работой каркаса с грунтовым или свайным основанием [81].

Рассмотрим общие **особенности совместной работы элементов высотных зданий** для различных конструктивных систем [149]. Вертикальные элементы каркаса (колонны, пилоны, диафрагмы) жестко связанные с плитами перекрытий и фундаментной стеной, создают очень жесткую конструкцию.

Вертикальные нагрузки могут значительно перераспределяться между вертикальными элементами, горизонтальные нагрузки создают не только изгибающие моменты в вертикальных элементах, но и появление в них вертикальных усилий. В этом случае плиты перекрытий вовлекаются в работу на сдвиг и изгиб. Совместная работа диафрагм и колонн обуславливает известный «рамно-связевый» эффект (рис. 6.2). Он вызван тем, что от горизонтальных нагрузок деформированная схема диафрагмы и рамы имеют разные формы, и это приводит к возникновению больших изгибающих моментов в колоннах на верхних этажах. Диафрагма деформируется как консоль, а колонны и пилоны деформируются по закону рамной конструкции. В результате разной деформативной схемы диафрагмы и колонн с перекрытиями, в местах несовместной деформации, в колоннах возникают большие моменты, что приводит к тому, что верхние колонны

могут иметь большую арматуру. Хотя в безригельных каркасах эффект смягчается отсутствием ярко выраженных рам, все же он может привести в случае его неучёта к появлению микротрещин в верхних колоннах, тем более что нормальные силы в верхних этажах могут не обеспечивать необходимое обжатие. Это приводит к увеличению деформируемости каркаса, а также ухудшению условий работы плит перекрытий, так как защемление плит в колонне будет частично нарушено, что представляется достаточно существенным.

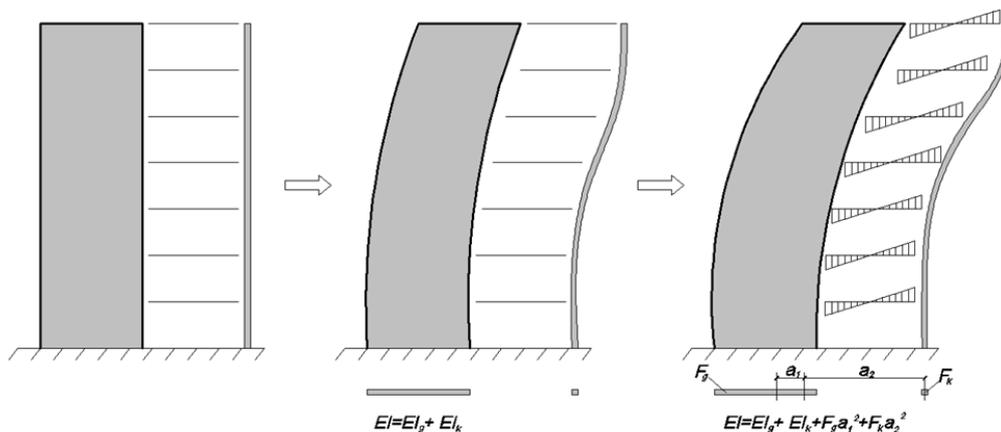
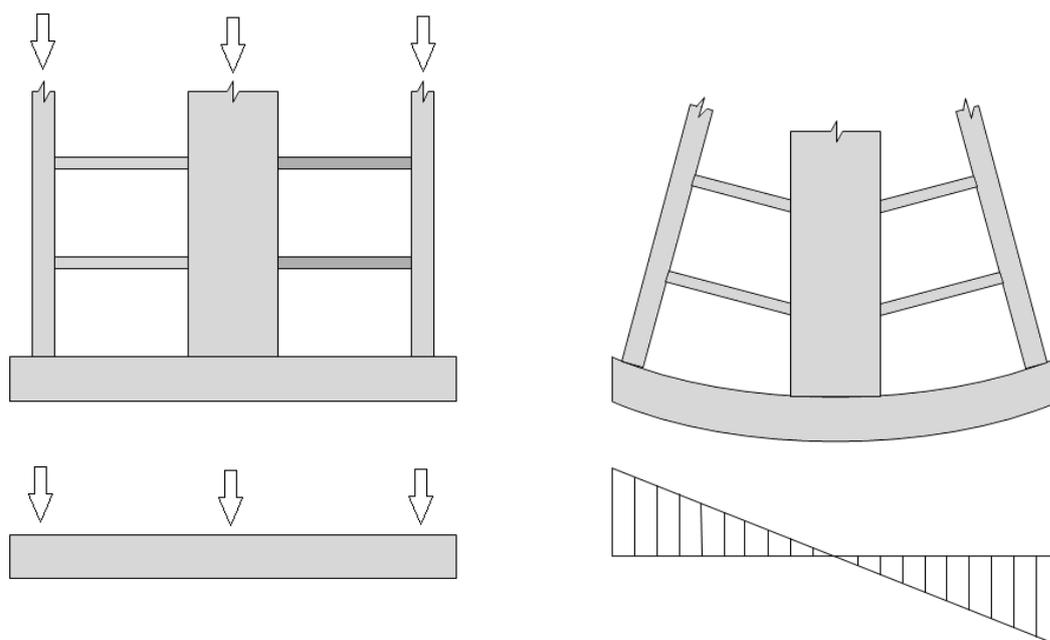


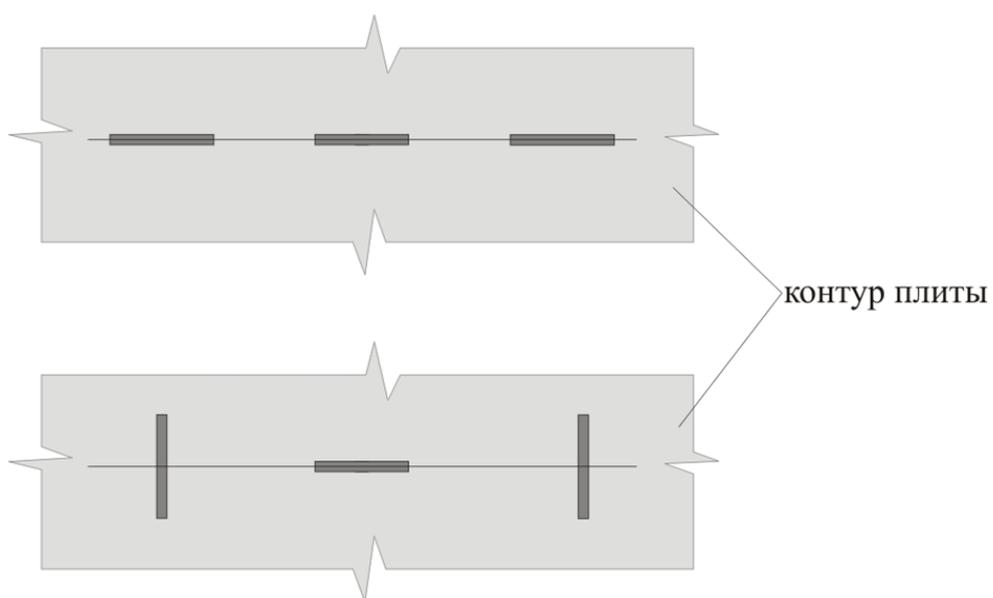
Рис. 6.2. Особенности совместной работы диафрагм и колонн

Эффект, связанный с особенностями совместной работы фундаментной плиты и перекрытий первых этажей может оказаться крайне неблагоприятным для колонн, расположенных в периферийных зонах здания. Мембранная группа усилий в фундаментной плите и нижних перекрытиях создают плиту условно большей высоты. За счет больших моментов в крайних колоннах улучшаются условия работы фундаментной плиты.

Чтобы снять большие моменты и сдвиговые усилия, возникающие в крайних колоннах, их конструируют в виде пилонов, располагая большую сторону пилон вдоль контура плиты перекрытия, т.е. уменьшая ее жёсткость в плоскости действия сдвиговых усилий. При этом совместная работа фундаментной плиты и вышележащих перекрытий будет обеспечиваться за счёт диафрагм (рис. 6.3).



а)



б)

Рис. 6.3. Методы расположения вертикальных несущих элементов для обеспечения совместной работы фундаментной плиты и плит перекрытий

Плиты перекрытий высотных зданий имеют ряд особенностей, которые значительно отличают их от ранее применявшихся сборных плит перекрытий на прямоугольных планах. К основным особенностям можно отнести: сложную конфигурацию в плане, нерегулярно расположенные опоры различного сечения — диафрагма, пилоны, крестовые, уголковые, тавровые колонны, нерегулярно расположенные отверстия, нерегулярные включения балочных ростоверков, переменная толщина плиты, связанная с необходимостью усиления опорных зон в районе колонн. Важным фактором являются возможные неравномерные осадки опор плиты, особенно для верхних этажей, обусловленные неравномерными укорочениями вертикальных элементов в общей схеме здания. В этом случае напряженно-деформированное состояние плит (особенно для верхних этажей) будет значительно отличаться от расчёта плит при условии, что вертикальные опоры не имеют смещений.

В процессе возведения здания неравномерная осадка опор уже происходит от собственного веса (это 50-70% всей нагрузки) и, к моменту формирования монолита верхних этажей, она в значительной степени оказывается выбранной. В течение эксплуатации эффект может усугубиться за счёт деформаций ползучести, которые в наиболее нагруженных элементах (колонны и пилоны) протекают более интенсивно, и плиты перекрытий будут «зависать» на диафрагмах. Если специалисту не удаётся выявить осадку на основе компьютерного моделирования процесса возведения здания, а затем эксплуатационных стадий, на которых отслеживаются деформации ползучести, он должен оценить возможную действительную неравномерность осадки опор и затем скорректировать расчет плиты перекрытия. Можно рекомендовать такой приближенный подход: определить перемещения опор из расчета общей схемы здания, а далее рассчитать плиту и на местную нагрузку, и на величины осадок, составляющих 15-20% осадки, определенной из рассмотрения общей схемы. Наличие многочисленных нерегулярных отверстий не вызывает труднопреодолимых ситуаций для армирования плиты. Отверстия изменяют расчётную схему плиты: они делают плиту более податливой, опорные моменты в районе отверстий несколько увеличиваются, пролетные моменты уменьшаются и в этом случае арматура, окаймляющая отверстия, должна носить только конструктивный характер и не обязательно компенсировать арматуру, изъятую в области отверстия. Еще один вывод: плита с большим

количеством опор различного типа имеет значительное число вариантов приспособления к нагрузкам и всегда «выбирает» наилучший. Поэтому введение различных конструктивных мер, с целью заставить плиту работать по известным схемам, не всегда целесообразно (рис. 6.4).

Отдельным вопросом является расчет фундаментных плит высотных зданий. Очень часто основание фундаментной плиты имеет ярко выраженную неодинаковую жесткость, обусловленную неравномерными свойствами грунтов, повышенной жесткостью грунта и свай в периферийных зонах плиты и другими факторами, существенно влияющими на напряженно-деформированное состояние фундаментной плиты и вышележащих конструкций здания.

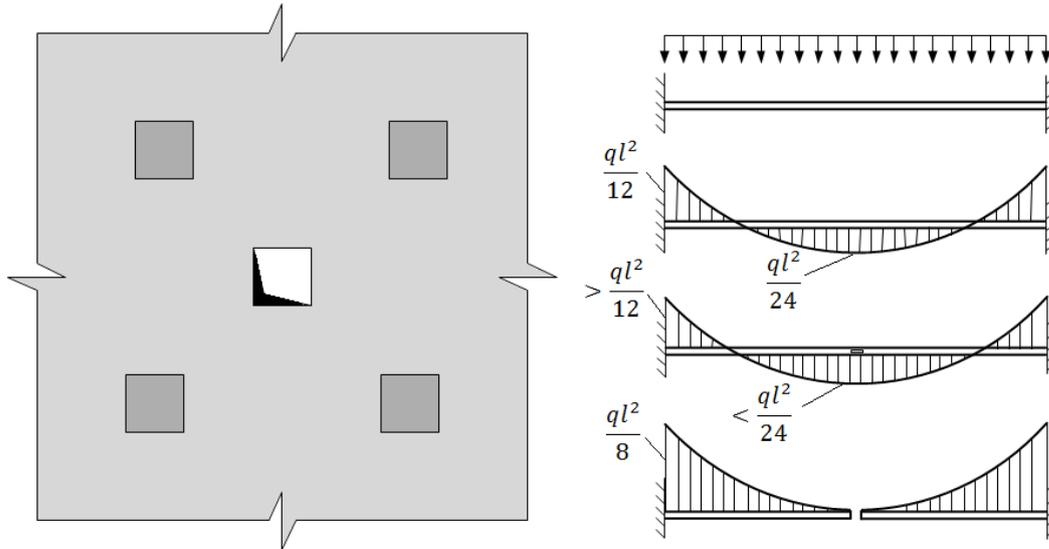


Рис.6.4. Эффекты моделирования отверстий в плитах перекрытий

Но главной ее особенностью является возможность обеспечения совместной работы со всеми вышележащими несущими элементами каркаса, а также со свайным или грунтовым основанием. Следует также отметить известный эффект увеличения усилий в периферийных сваях по сравнению со сваями, расположенными в центральной зоне плиты. Для уменьшения усилий в периферийных сваях, плите и крайних колоннах производят увеличение количества свай непосредственно под зоной больших нагрузок. Оправдан инженерный опыт расстановки свай, состоящий в следующем: количество свай определяется путем деления общего веса здания на

величину несущей способности свай. Определенное таким образом количество свай увеличивается на 20-25%, чтобы компенсировать различные неравномерности, влияние ветровой нагрузки и т.п. Сваи расставляются равномерно, но если есть возможность, шаг их расстановки следует увеличить (в допустимых пределах) непосредственно под вертикальными элементами, особенно под ядром жёсткости (рис. 6.5). В этом случае создаются возможности для резервов, приспособляемости конструкции каркаса.

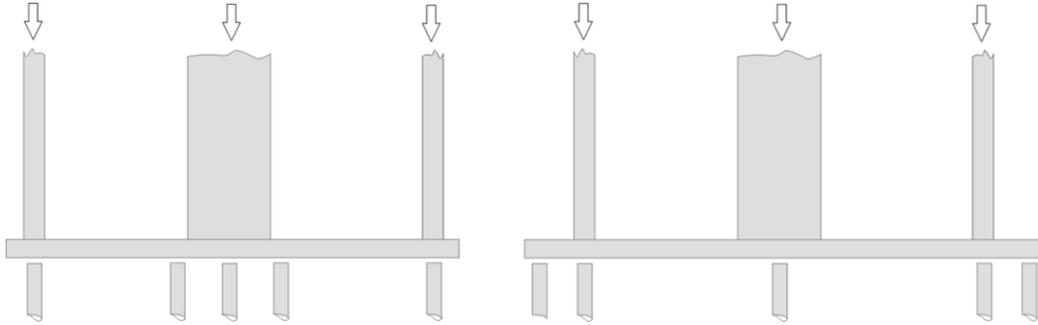


Рис.6.5. Методы расстановки свай

Переходя к особенностям расчета элементов высотных зданий, следует отметить, что при рассмотрении тех или иных расчётных схем высотных зданий основным расчётным инструментом уже многие годы является метод конечных элементов [59]. Этот метод позволяет отразить и учесть при расчетах и проектировании следующие специфические факторы, связанные с:

- ✓ совместной деформацией элементов сложных комбинированных систем, состоящих из стержней, пластин и оболочек;
- ✓ поведением под нагрузкой конструкций со сложной структурой (изменчивость механико-геометрических характеристик в пределах элемента, наличие ребер жесткости различного вида опор и граничных условий);
- ✓ конструкцией узлов, как правило, характеризуемых различной податливостью при возможных воздействиях;
- ✓ видом нагружений (статическое, динамическое, температурное и др.);
- ✓ процессом возведения здания, когда на отдельных этапах может изменяться конструктивная схема сооружения;

- ✓ реологическими свойствами материала, и первую очередь с его пластичностью;
- ✓ расчётом здания с учетом деформированной схемы.

Программный комплекс ЛИРА–САПР для расчёта и проектирования конструкций позволяет не только составить и исследовать подробные расчётные схемы, но и провести математическое моделирование процесса всего жизненного цикла здания, включая стадии возведения и эксплуатации. Обладая таким инструментарием, специалист может получить исчерпывающую информацию о том, как работает конструкция, где её слабые места, на что следует обратить внимание в первую очередь [128]. Так же как при натуральных испытаниях квалифицированный специалист, приступая к расчёту, должен знать, что он ожидает от результатов, какие эффекты необходимо выявить. Различные математические модели могут отражать те или иные свойства конструкции, но главной остается проблема построения самой модели, по возможности максимально адекватно отражающей соответствующие конструктивные решения.

### **6.3. Краткие сведения о программной реализации**

Описанные в предыдущих разделах методы компьютерного моделирования процессов жизненного цикла объекта строительства на основе применения МКЭ требуют соответствующей программной реализации [49, 50]. Все существующие в настоящее время пакеты программ конечно-элементных расчетов, включая и программный комплекс ЛИРА–САПР, условно можно структурировать на три части – препроцессор, процессор, постпроцессор. Каждая из них имеет свою задачу по подготовке, расчету, графическому оформлению результатов. Все три части функционируют в единой интуитивной графической среде пользователя.

Препроцессор, имеет своей целью автоматизацию подготовки данных, непосредственно требующихся для расчетов. Это информационная система, задачей которой является генерация расчетной модели, на базе созданной специальными средствами трехмерной архитектурной модели реальной конструкции с необходимой степенью детализации реальной геометрии. В нашем случае функцию архитектурного препроцессора выполняет программный комплекс САПФИР, который после импортирования или создания качественной архитектурной модели,

преобразует ее в аналитическую модель, затем экспортирует в расчетный программный комплекс ЛИРА–САПР [90, 91], где модель преобразуется в расчетную схему. На основе этого препроцессора пользователь имеет возможность задавать исходную информацию, оперируя конструктивными элементами – плита, диафрагма, колонна, лестница, пандус и др.

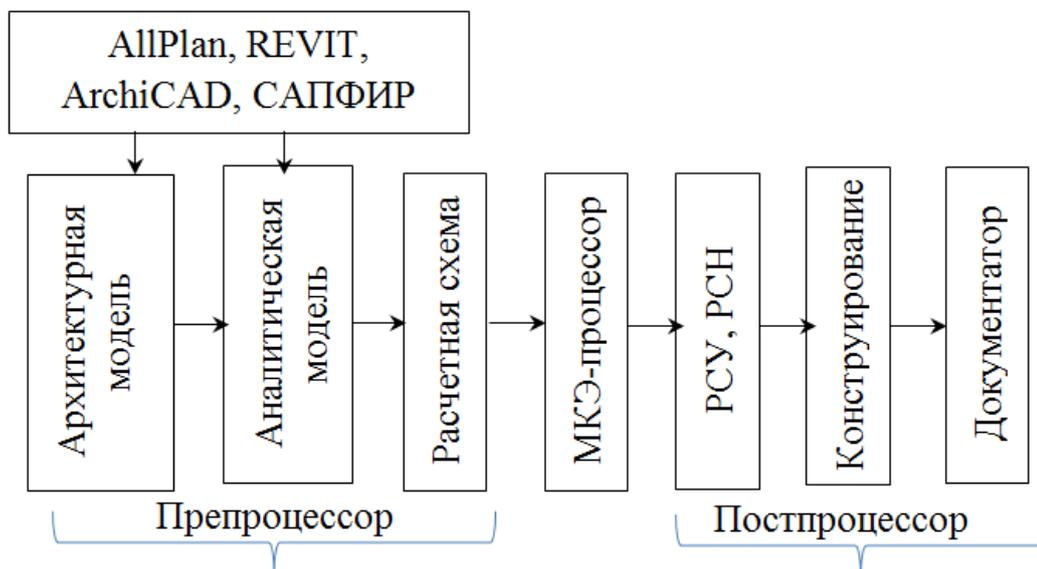


Рис. 6.6. Схема программной реализации компьютерного моделирования

Для ясности схемы, представленной на рис. 6.6, дадим определение каждой позиции. Архитектурная модель призвана продемонстрировать органичность размещения объекта, его архитектурную ценность, передать планировку помещений здания, его разнообразные фактуры, текстуры и архитектурные детали. Аналитическая модель представляет имитационную модель физической модели несущей конструкции, состоящей из конструктивных элементов, геометрии, свойств материалов и нагрузки. Создается автоматически из архитектурной модели. Аналитическая модель экспортируется в программу для расчета и проектирования несущих конструкций. Расчетная схема конструкции – это упрощенная схема, освобожденная от несущественных особенностей, не влияющих существенным образом на работу конструкции в целом. Переход от реального объекта (в нашем случае, архитектурной модели реального

объекта) к расчетной схеме происходит путем идеализации свойств материала, системы приложенных нагрузок, геометрии реального объекта, типов граничных условий. Вопросы идеализации решаются при создании аналитической модели. Основным различием между аналитической моделью и расчетной схемой является степень детализации и идеализации (упрощения). При создании аналитической модели всегда имеется возможность внесения изменений на любой стадии создания. При этом всегда нужно помнить правило, что чем точнее расчётная схема соответствует действительному сооружению, тем более трудоёмок его расчёт. При этом отметим, что один и тот же реальный объект может иметь несколько расчетных схем, а одной и той же расчетной схеме может быть поставлено в соответствие много различных реальных объектов.

Расчетную схему всегда можно разделить на составляющие, схематично показанные на рис. 6.7.

**Геометрическая модель.** При создании расчетной схемы вводятся упрощения в геометрию реального объекта. Основным упрощающим приемом является приведение геометрической формы тела к схемам бруса (стержня) или оболочки (пластины). Следующим этапом является построение конечно-элементной сетки, определение массива координат узловых точек в соответствующей последовательности, позволяющей однозначно определять, какие узлы принадлежат соответствующему конечному элементу.

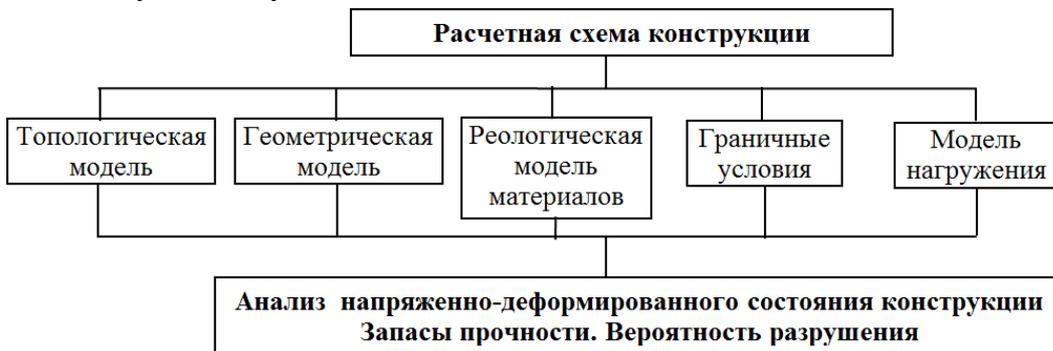


Рис. 6.7. Составляющие расчетной схемы конструкции

На этом этапе уже в неявной форме задается точность получаемого в дальнейшем решения, так как точность определяется сеткой конечных элементов. Для получения необходимой точности требуется

дифференцированное (нерегулярное) разбиение расчетной модели на конечные элементы. Так, например, принято, сгущать сетку в местах с большими градиентами (изменениями) параметров напряженного состояния и вполне допустимо разряжать сетку в зонах постоянных или слабо изменяющихся напряжений.

Существует несколько правил, которые позволяют получать удовлетворительное решение задачи в сложных ситуациях. Во-первых, сетка КЭ сгущается в зонах, где, либо геометрия конструкции претерпевает существенные изменения, либо прикладываются локализованные нагрузки, либо изменяются граничные условия, либо происходит смена материала (физико-механических свойств). Во-вторых, для оценки точности решения задачи можно провести два расчета с удвоением густоты конечно-элементной сетки, а затем применив процедуру Ричардсона [56, 59] составить представление о точном решении.

В настоящее время существует большое количество методов и соответствующих программ, позволяющих автоматизировать построение сетки КЭ. Программный комплекс ЛИРА–САПР позволяет импортировать модели, с уже построенной сеткой конечных элементов. Но, как правило, для анализа НДС строительных конструкций, конечно-элементная сетка строится либо непосредственно в ПК ЛИРА–САПР, либо в ПК САПФИР, либо в ПК МОНОМАХ–САПР.

**Реологическую модель материала** можно классифицировать таким образом, как показано на рис. 6.8.



Рис. 6.8. Классификация свойств модели материалов согласно различным теориям

Для однородного и изотропного материала механическими характеристиками, определяющими его свойства, является модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона ( $\mu$ ). МКЭ допускает, что каждый КЭ

может иметь свои собственные механические свойства. Поэтому блок определения свойств материала должен определять для каждого КЭ два параметра  $E$  и  $\mu$ .

Сложные анизотропные среды требуют более сложных процедур определения их свойств.

Физически нелинейная среда, которой является бетонный массив, требует более обширной информации о своих свойствах. Степень объема этой информации зависит от той математической модели, которая используется. Это могут быть предельные напряжения на растяжение и сжатие, это может быть вид предельной поверхности, это может быть диаграмма зависимости напряжений от деформации и т.д. Поэтому для принятой математической модели необходимо обеспечить задание информации о соответствующих свойствах материала и реализация в программном комплексе различных теорий.

#### **Граничные условия.**

Задание граничных условий формально сводится к определению списка (номеров) узлов, на перемещения которых накладываются ограничения и идентификация типа этих ограничений. Как правило, ограничения определяются в виде условия отсутствия того или иного компонента перемещений в ориентации относительно глобальных декартовых координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Выбор типа граничных условий зависит от постановки задачи и является одним из наиболее ответственных шагов, так как неправильная их постановка приведет к неверному решению. Общим требованием к граничным условиям является то, что они должны быть таковыми, чтобы обеспечивать геометрическую неизменяемость всей конструкции.

#### **Модель нагружения.**

##### Задание внешних нагрузок.

Как известно, внешние нагрузки могут быть различных типов: статическими и динамическими. В свою очередь статические нагрузки бывают силовыми и деформационными, а по типу приложения распределенные, поверхностные и локальные. Кроме этого, по видам нагрузки могут быть хорошо формализуемые и слабо формализуемые. К слабо формализуемым относятся ветровые, сейсмические, некоторые динамические нагрузки, нагрузка от давления грунта и др. Необходимо определить те области (конечные элементы), где они действуют, и задавать

их интенсивности. Как правило, всегда действует сила тяжести (собственный вес) на все КЭ конструкций. Этот тип нагрузки определяется автоматически, исходя из заданного удельного веса материала. Иногда необходимо учесть нагрузки, действующие ортогонально поверхности как угодно расположенного конечного элемента, например, давление внутри резервуара, давление грунта. В этом случае нагрузки на конечный элемент задаются в местной системе координат, так как эта система координат, как правило, предполагает направление одной из осей ортогонально направленной к плоскости КЭ.

Нагрузки могут автоматически создаваться во время генерации аналитической модели из архитектурной. Так, в этот момент генерируется нагрузка от перегородок и жилых помещений, если они были заданы в архитектурной модели. Все создаваемые нагрузки могут иметь произвольное направление в пространстве и могут быть разнесены по разным загружениям.

Особое место занимает инструмент задания ветровой нагрузки. Ветровая нагрузка автоматически генерируется согласно нормативной документации в зависимости от направления воздействия, ветрового района, типа местности и аэродинамического коэффициента. Силуэт здания проецируется на плоскость, перпендикулярную направлению ветра. Далее, для каждого междуэтажного перекрытия определяется грузовая площадь в зависимости от высоты этажа. И наконец, с грузовой площади на каждое перекрытие собирается ветровая нагрузка  $w = w_0 \cdot k \cdot c$ , где  $w_0$  – нормативное значение ветрового давления,  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте,  $c$  – аэродинамический коэффициент. По умолчанию аэродинамический коэффициент принимается как сумма аэродинамических коэффициентов с наветренной стороны и подветренной стороны:  $c = 0,8 + 0,6 = 1,4$ . Сгенерированные ветровые нагрузки прикладываются к аналитической модели. Может быть задано произвольное количество ветровых нагрузок на здание.

#### **Учет процесса возведения.**

В ПК ЛИРА-САПР реализован следующий подход к заданию последовательности возведения конструкций строительного объекта, используя новое понятие: монтажное событие. Монтажное событие – это одновременное возведение, т.е. монтаж, или, наоборот, демонтаж некоторой части здания. Событием может быть монтаж или демонтаж несущих

конструкций, приложение или снятие временной нагрузки. Одно или несколько монтажных событий, следующих одно за другим, образуют стадию монтажа, которая импортируется из ПК САПФИР (система САПФИР–КОНСТРУКЦИИ) в ПК ЛИРА–САПР. Все события и стадии отображаются в виде шкалы «последовательность возведения». События можно генерировать как автоматически, например, включив в одно событие все конструктивные элементы одного этажа, или вручную, добавляя и исключая в активное событие необходимые элементы. Процесс возведения конструкций строительного объекта можно раздробить на достаточное количество монтажных событий, чтобы потом, объединяя их в стадии, получить в результате расчетную схему с необходимым числом стадий монтажа. Реализованы интерактивные инструменты для задания монтажных стадий, возможен контроль объектов монтажных стадий, автоматический сбор нагрузок от собственного веса элементов конструкций на каждой стадии монтажа и, наконец, автоматическое формирование монтажных таблиц в терминах ЛИРА–САПР, а в их числе – стадийных и дополнительных монтажных загрузений.

Для расчета созданной модели выбирается расчетный МКЭ–процессор. В составе ПК ЛИРА–САПР реализовано несколько расчетных процессоров, предназначенных для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции на основе метода конечных элементов в перемещениях. Расчетные процессоры реализуют современные усовершенствованные методы решения систем уравнений, обладающие высоким быстродействием и позволяющие решать системы с очень большим числом неизвестных.

Линейный МКЭ–процессор предназначен для решения задач, описывающих работу материала конструкций в линейно-упругой постановке. Нелинейный процессор позволяет решать задачи, связанные с физической нелинейностью материала в рамках нелинейной теории упругости и в упруго-пластической постановке (бетон, железобетон, сталебетон, металл, грунт). Решение таких задач производится шаговым и шагово-итерационным методом. Нелинейный процессор позволяет решать задачи, связанные с геометрической нелинейностью (ванты, большепролетные покрытия, мембраны), а также и с конструктивной нелинейностью (контактные задачи, односторонние связи, трение). В состав библиотеки нелинейных конечных элементов входят также элементы,

позволяющие производить одновременный учет физической и геометрической нелинейности. При расчетах геометрически нелинейных задач шаговым методом производится автоматический выбор шага нагружения с учетом его истории, а при расчетах с учетом физической нелинейности количество шагов, как правило, назначает пользователь.

Расчетные процессоры содержат обширную библиотеку 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. Допускается наличие абсолютно жестких вставок, как в стержневых, так и в плоскостных конечных элементах. Реализованы законы деформирования различных классов железобетона.

Опишем, какие основные этапы включает в себя МКЭ–процессор.

#### 1. Определение локальных, глобальных и местных систем координат.

Глобальная система координат ( $g$ ) предназначена для задания общей геометрии системы – координат узлов, ориентации некоторых нагрузок, ориентации местных ( $m$ ) и локальных ( $l$ ) систем координат. Глобальная система координат может быть декартовой, сферической, цилиндрической или другой системой, которая может быть задана аналитически. Местная система координат является прерогативой конечного элемента и предназначена для ориентации конечного элемента относительно глобальной системы координат, удобства построения матрицы жесткости, задания местной нагрузки, определения напряжений и усилий. Как правило, местная система координат – декартовая. Локальная система координат является прерогативой узла и предназначена для ориентации некоторых его атрибутов: узловой нагрузки, узловых перемещений, закреплений (граничных условий). Как правило, локальная система координат тоже декартовая. Реализации различных сочетаний этих систем предоставляет много удобств при составлении компьютерных моделей [59].

2. Построение матрицы жесткости. На этом этапе вычислений используются соотношения, выведенные при построении математической модели. В частности, для каждого конечного элемента каждой конструкции строится матрица жесткости. Входной информацией здесь являются тип

конечного элемента, координаты узлов и механические характеристики. Эта информация извлекается из базы данных, подготовленной препроцессором.

Вычисленные элементы матриц жесткости отдельных КЭ помещаются в соответствующие адреса хранения глобальной матрицы жесткости. Физически этот процесс представляет собой сборку КЭ в единый ансамбль, представляющий всю конструкцию в целом. Построение матрицы жесткости может выполняться несколькими способами:

- ✓ Непосредственное использование заранее полученных формул для каждого элемента матрицы жесткости. Этот способ, как правило, используется для простых (стержень, прямоугольный или треугольный элемент балки-стенки) и часто используемых конечных элементов, так как он обладает наибольшим быстродействием.
- ✓ Использование численного интегрирования. Этот прием применяется в случае затруднительного получения формул (треугольные и четырехугольные элементы плит и оболочек и т.п.). При этом используются точные формулы численного интегрирования.

3. Учет граничных условий. Существует несколько методов учета граничных условий. Граничные условия в виде наложенных абсолютно жестких связей реализуется при помощи вычеркивания из общей матрицы жесткости строк и столбцов, соответствующих перемещению, по направлению которого наложена связь. Наличие локальной системы координат позволяет моделировать случаи, когда наложенные связи не совпадают с глобальной системой координат. В некоторых случаях для моделирования граничных условий используется одноузловой элемент конечной жесткости КЭ-51. Например, для моделирования свай элемент вводится по направлению  $Z$  и отражает зависимость нагрузка – осадка.

4. Решение системы линейных алгебраических уравнений. Отличительной особенностью возникающих алгебраических задач при расчете реальных конструкций МКЭ является большая размерность, достигающая нескольких десятков тысяч неизвестных. Это обстоятельство предъявляет жесткие требования к методам решения таких систем. В настоящее время имеется много прямых и итерационных методов решения систем линейных уравнений высоких порядков (профильные, фронтальные, многофронтальные, многосеточные, агрегатные и мн. др.) в той или иной степени направленных на преодоление проблемы плохой обусловленности матрицы и больших затрат времени.

Все эти методы можно разделить на прямые (заранее известно количество вычислений, но неизвестно какая точность будет достигнута) и итерационные (задается точность, которую надо достичь, но неизвестно количество вычислений для достижения этой точности и вообще нет гарантии, что эта точность будет достигнута) [49,56,77].

Практически все прямые методы основаны на методе исключения Гаусса. Общей идеей большинства итерационных методов для решения уравнений  $Ku=P$  является построение некоторой положительно определенной матрицы  $B$ . В матрице  $B$ , на каждом шаге решается линейная система уравнений

$$BV_n = H - Ku_n$$

по найденному  $V_n$  определяется  $u_{n+1}$ .

Матрица  $B$ , должна быть такой, чтобы система  $Bv=Q$  решалась значительно быстрее исходной. Прямой метод решения разреженных матриц\* представляет собой обыкновенный метод Гаусса с нумерацией неизвестных таким образом, чтобы минимизировать количество вычислений, т.е. количество элементов матрицы, заполняемых в процессе исключения.

При решении систем линейных уравнений больших порядков ( $10^6$  и более) начинает сказываться плохая обусловленность матрицы, которая может приводить к большим, иногда неприемлемым погрешностям решения задачи. Наиболее действенным приемом в борьбе с этим эффектом является метод суперэлементов. Из всех известных программ метод суперэлементов реализован только в ПК ЛИРА-САПР и ПК МОНОМАХ-САПР.

5. Вычисление поля напряжений. Полученный после решения системы алгебраических уравнений вектор узловых перемещений позволяет оценить жесткость конструкции и построить либо поля перемещений, либо новую конфигурацию. Однако для решения задачи прочности необходимо выполнять еще один шаг, связанный с вычислением напряжений. Компоненты напряжений вычисляются либо в ориентации глобальной декартовой системы координат либо вдоль локальных осей.

---

\* Реализованный в ПК ЛИРА-САПР этот метод в ряде случаев позволяет в 8-10 раз ускорить процесс решения системы линейных уравнений по сравнению с ленточными структурами.

Существуют, так называемые, точки суперсходимости, где погрешность наименьшая. Однако, это имеет место лишь для линейных задач. В случае физической нелинейности желательно определять напряжения в большем числе точек, так как в каждой из них соотношения упругости могут различаться. С другой стороны, используемые аппроксимации для перемещений дают разрывные напряжения на межэлементных границах. Поэтому, если организовать вычисление напряжений прямо в узловых точках, то их значения со стороны каждого прилегающего к данному узлу элемента будут различаться.

6. Метод расчета «шаговая нелинейность» (выполняется нелинейным МКЭ–процессором). Метод позволяет выполнить численное моделирование процесса нагружения – проследить развитие трещин, нарастание перемещений вплоть до разрушения элементов конструкции при последовательном нагружении конструкции. При решении нелинейных задач шаговыми методами принцип суперпозиции не имеет места, поэтому РСУ не составляется. Что касается РСН, то здесь последовательность несколько иная по сравнению с расчетом в линейной постановке. В этом случае РСН составляется на уровне сочетания нагрузок, и для каждого конкретного РСН выполняется нелинейный расчет.

7. Новый метод расчета «инженерная нелинейность». Смысл метода заключается в возможности задания исходных данных, как для линейного расчета, но выполнения расчета с учетом физически-нелинейных свойств материала. Задается «определяющее» нагружение, которое, по мнению проектировщика, в основном определит напряженно-деформированное состояние элементов конструкции – развитие трещин, пластические деформации бетона и арматуры. «Определяющее» нагружение может задаваться как набор загрузок, каждое со своим коэффициентом. На назначенное определяющее нагружение выполняется расчет в нелинейной постановке с подбором на каждой итерации арматуры железобетонных элементов. Расчет выполняется, на основе итерационного метода секущих (метод Биргера). В результате расчета определяются жесткостные характеристики элементов, соответствующие секущим модулям деформации на последней итерации нелинейного расчета. Жесткостные характеристики стержневых элементов определяются как для стержней переменной жесткости, а для пластинчатых элементов – как для ортотропных пластин. На основе полученных новых жесткостных характеристик выполняется

линейный расчет на все заданные нагрузки (в том числе и динамические), определяются РСУ, РСН, подбирается проектная арматура и выполняется конструирование в конструирующих системах ПК ЛИРА–САПР. В этом методе нелинейного расчета арматура подбирается автоматически в процессе расчета, и дает достаточно адекватные результаты. Так, многочисленные исследования, проведенные на стадии тестовой эксплуатации, показывают, что перемещения от эксплуатационных нагрузок в 2,5...3,5 раза превышают перемещения, полученные на основе линейно-упругого расчета, и в ряде случаев наблюдается некоторое перераспределение усилий. Инженерная нелинейность ни в коем случае не может заменить расчет с учетом физической нелинейности на основе шаговых методов, которые с точки зрения математики являются строго обоснованными. Появление метода расчета «инженерная нелинейность» позволяет интегрально оценить влияние изменения жесткостей на перераспределение усилий и увеличение перемещений для эксплуатационных нагрузок в практических расчетах.

Вспомогательные расчетные процессоры позволяют проводить дальнейшие исследования расчетной модели по результатам основного расчета.

1. Система РСУ позволяет произвести выбор наиболее опасных сочетаний усилий по критерию экстремальных напряжений и в соответствии с нормативными требованиями многих стран.

2. Система РСН позволяет определить перемещения, усилия и напряжения от стандартных и произвольных линейных комбинаций нагрузжений. Под стандартными линейными комбинациями подразумеваются комбинации (сочетания), которые установлены нормативными документами.

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

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

5. 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.

6. Процессор «МЕТЕОР» предоставляет возможность комбинировать результаты расчета топологически идентичных расчетных схем, варьируя граничные условия, жесткостные характеристики, параметры упругого основания, жесткости узлов и т.п.

7. Система ДИНАМИКА–плюс – реализует метод прямого интегрирования уравнений движения по времени, что позволяет производить компьютерное моделирование вынужденных колебаний физически и геометрически нелинейных систем.

Перейдем к описанию постпроцессора, позволяющего анализировать результаты проделанных расчетов по изополям перемещений и напряжений, по эпюрам усилий и прогибов, по мозаикам разрушения элементов, по главным и эквивалентным напряжениям, по формам потери устойчивости, по анимации колебаний конструкции и по многим другим параметрам.

Постпроцессор включает в себя инструментарий построения эпюр, изополей, составления таблиц РСУ, РСН, документирование результатов расчета, конструирование стальных и железобетонных элементов рассчитываемого объекта. Постпроцессор включает в себя несколько систем.

Конструирующая система АРМ–САПР реализует подбор площадей сечения арматуры колонн, балок, плит и оболочек по первому и второму предельным состояниям в соответствии с нормативами стран СНГ, Европы и США. Существует возможность задания произвольных характеристик бетона и арматуры, что имеет большое значение при расчетах, связанных с реконструкцией сооружений. 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 (ЛАРМ–САПР), 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 СТК–САПР работает в двух режимах – подбора сечений элементов стальных конструкций, таких как фермы, колонны и балки, и проверки заданных сечений в соответствии с нормативами стран СНГ, Европы и США. Допускается объединение нескольких однотипных элементов в конструктивный элемент. Система

может функционировать в локальном режиме, позволяя проверить несколько вариантов при конструировании требуемого элемента.

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

Формирование отчетов по результатам работы с комплексом производится с помощью системы ДОКУМЕНТАТОР. Эта система позволяет представить всю полученную информацию, как в табличном, так и в графическом виде.

Система КМ–САПР – позволяет по данным расчета стальных конструкций (элементов и узлов) получить полный комплект чертежей КМ в среде AutoCAD: монтажные схемы с маркировкой элементов и узлов, ведомости элементов, чертежи узлов с трехмерной визуализацией, а также их спецификации.

Система САПФИР–ЖБК позволяет по результатам подобранной арматуры в несущих конструктивных элементах обеспечить автоматизированное конструирование железобетонных плит перекрытия, диафрагм жесткости, колонн в зданиях с монолитным несущим каркасом и документирование проектно-конструкторских решений в виде полного спектра необходимых чертежей и спецификаций.

Таким образом, ПК ЛИРА–САПР состоит из большого количества взаимосвязанных информационных систем. Организация взаимосвязей между системами ПК ЛИРА–САПР обеспечивает процесс работы с комплексом таким образом, что выполняется информационное моделирование строительного объекта (ВМ) – от создания расчетной модели к конструированию элементов и к документированию результатов расчета и конструирования. Общая схема функционирования ПК ЛИРА–САПР представлена на рис. 6.9.

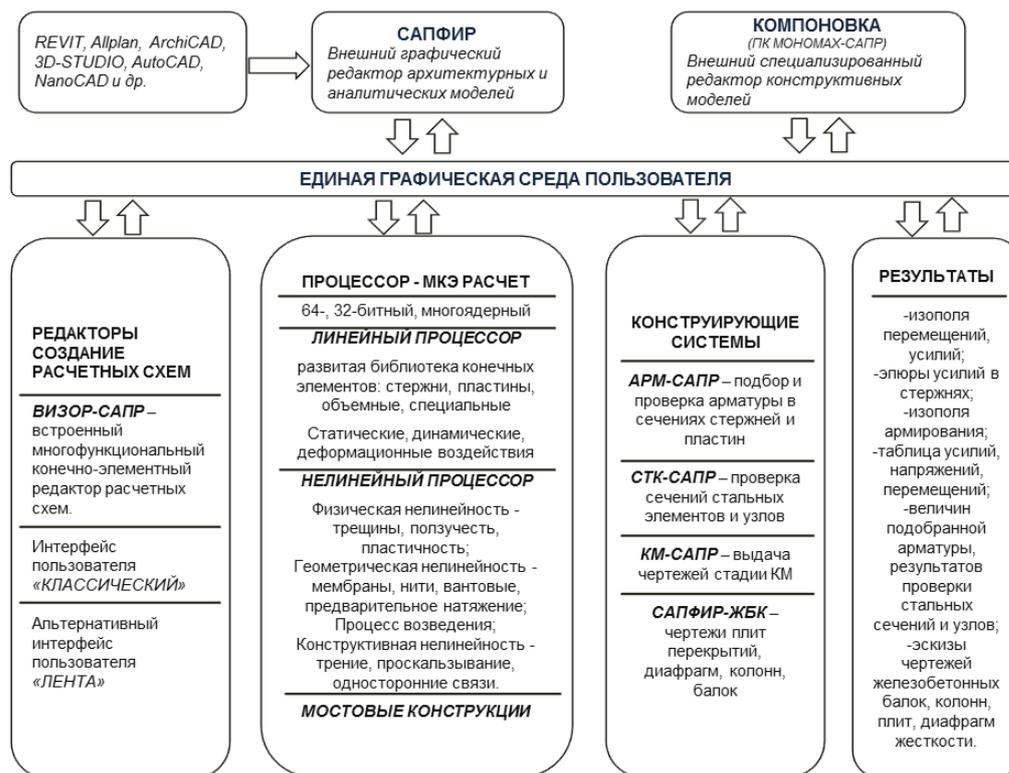


Рис.6.9. Схема функционирования ПК ЛИРА-САПР

Единой графической средой, организующей обмен информацией между препроцессорами и постпроцессорами, является система ВИЗОР-САПР, которая располагает обширным набором возможностей и функций для формирования адекватных конечно-элементных и суперэлементных моделей рассчитываемых объектов. ВИЗОР-САПР позволяет произвести подробное визуальное обследование созданных моделей и их корректировку, описать физико-механические свойства материалов. В этой же среде задаются связи, разнообразные нагрузки, характеристики различных динамических воздействий, а также назначаются взаимосвязи между различными загрузками с целью определения их наиболее опасных сочетаний.

ВИЗОР-САПР дает исчерпывающую информацию по всему объекту и по его элементам, а также предоставляет возможность визуализации напряженно-деформированного состояния схемы.

## Заключение

Современный уровень развития строительства диктует новые требования к процессу проектирования и, соответственно, к компьютерному моделированию строительных объектов. Проблема безопасности зданий и сооружений, а также развитие методов определения несущей способности конструкций зданий, прогнозирование их поведения в аварийных и предаварийных ситуациях (закритические нагрузки, нагрузки, не предусмотренные проектом, развитие системы трещин) являются весьма важными в строительном проектировании. Методы математического моделирования с применением современных компьютерных технологий, современных программных комплексов и численных методов во многих случаях являются единственно возможным инструментом для проведения таких исследований.

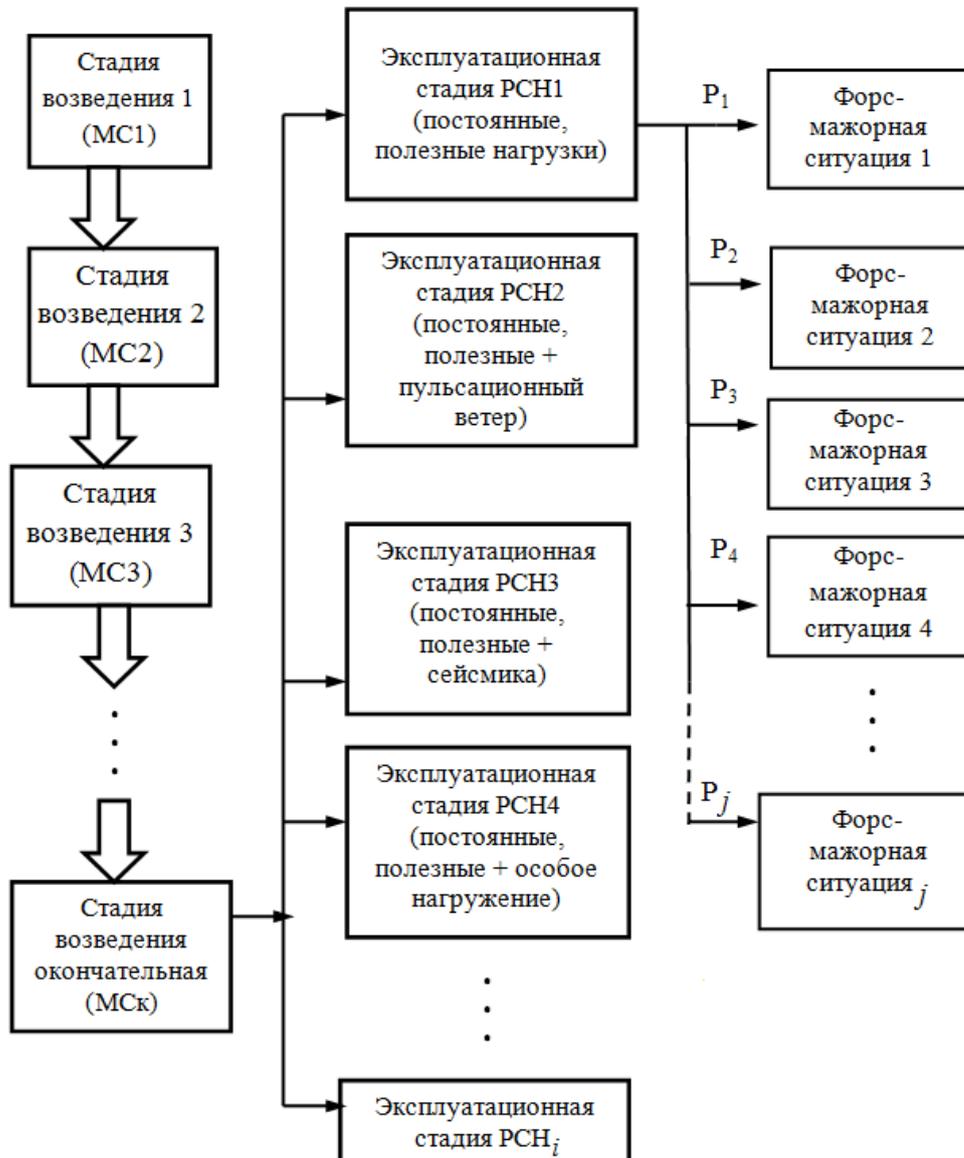
Изложенные в книге методы компьютерного моделирования процессов жизненного цикла строительного объекта, говорят о необходимости развития методологии создания математического и программного обеспечения для исследования процессов деформирования и разрушения строительных объектов с целью определения резервов их несущей способности конструкций при накоплении структурных повреждений или возникновении форс-мажорных аварийных ситуаций.

На рисунке ниже приведена структурная методологическая схема моделирования строительного объекта с учетом всех процессов изменения напряженно-деформированного состояния конструкций на каждой стадии.

Стадии возведения соответствуют последовательности возведения конструкции, каждая из которых «помнит» историю нагружения. Стадии последовательно сменяют друг друга, соответственно возведенная конструкция на каждой стадии имеет измененное НДС. Последняя  $МС_k$  стадия соответствует возведенной конструкции, и ее НДС «помнит» всю информацию последовательности возведения, связанную с изменениями конструктивной схемы, добавлением и снятием монтажных нагрузок и т.п.

Стадия  $МС_k$  является стартовой для расчета на эксплуатационные нагрузки. НДС на эксплуатационных стадиях определяется расчетом на различные сочетания нагрузжений ( $РСН1$  - эксплуатационные статические нагрузки;  $РСН2$  – полезные нагрузки с учетом пульсационной ветровой

составляющей, РСН2 – полезные нагрузки с учетом сейсмического воздействия и т.д.), Некоторые эксплуатационные стадии в свою очередь являются стартовыми для моделирования форс-мажорных ситуаций, которые могут возникнуть с какой-то вероятностью  $P_j$ .



**Структурная схема моделирования строительного объекта**

Такая методология предусматривает наличие мощных компьютеров и наукоемких программных комплексов, поскольку требуется проведение

большого количества расчетов с учетом геометрической, физической, конструктивной, генетической нелинейности. Также для определения реального НДС на эксплуатационной стадии, даже без учета возможной форс-мажорной ситуации, необходимо учитывать реологические свойства материалов (ползучесть бетона, возникновение трещин, коррозия и т.д.), что обуславливает необходимость проведения расчета в нелинейной постановке.

---

**Литература**

1. Абовский Н. П. Системный подход к сейсмоизоляции зданий приложных грунтовых условиях / Н. П. Абовский, В. И. Палагушкин, М. В. Лапеев. // Жилищное строительство. – 2010. – № 7. – С. 43 - 45.
2. Акимов В. А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
3. Алейников С. М. Расчёт контактного взаимодействия фундаментных конструкций с пористо-упругим основанием / С. М. Алейников // Современные методы стат. и динам. расчёта сооружений и конструкций. – 1994. – №3. – С. 171 - 181.
4. Алмазов В. О. Аварии и мониторинг. Методическое пособие для проектировщиков и строителей / Владлен Ованесович Алмазов. – М.: МГСУ, 2008. – 31 с.
5. Алмазов В. О. Железобетонные каркасы без прогрессирующего разрушения / Владлен Ованесович Алмазов – М.: МГСУ, 2008. – 32 с.
6. Алмазов В. О. Предотвращение прогрессирующего разрушения / В. О. Алмазов, С. А. Белов, А. М. Набатников // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан (научно-практическая конференция). – М.: МГСУ. – 2004. – 11 с.
7. Алмазов В. О. Проектирование железобетонных конструкций по евро нормам / Владлен Ованесович Алмазов. – М.: АСВ, 2007. – 216 с.
8. Бамбура А. М. Єврокод-2 і Єврокод-8 для проектування сейсмостійких споруд / А. М. Бамбура, Ю. І. Немчинов, О. Б. Гурківський і др. // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Будівельні конструкції". – К.: ДП НДІБК, 2012. – № 76 – С. 353 - 360.
9. Бамбура А. М. Несуча здатність залізобетонних елементів кільцевого перерізу зв спрощеними діаграмами деформування бетону та арматури / А. М. Бамбура, О. В. Дорогова // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Будівельні конструкції. – К.: ДП НДІБК, 2012. – № 76. – С. 382 - 392.
10. Бамбура А. Н. К оценке прочности железобетонных конструкций на основе деформационного подхода реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры / А. Н. Бамбура // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: Материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. – М.: 2001. – С.750-757. (Нет номера журнала)
11. Барабаш М. С. Программные комплексы САПФИР и ЛИРА-САПР – основа отечественных BIM-технологий. М. С. Барабаш, О. И. Палиенко, Д. В. Медведенко. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2013. – 366 с.

12. Барабаш М. С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій / М. С. Барабаш, С. В. Козлов, Д. В. Медведенко. – Киев: НАУ, 2012. – 572 с.
13. Барабаш М. С. Нова концепція автоматизації проектування об'єктів будівництва на основі цифрової моделі / М. С. Барабаш, С. Д. Коба // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – К.: ДНДІАСБ, 2004. – № 5. – С. 31 - 34.
14. Барабаш М. С. Аналіз автоматизованих систем проектування просторових конструкцій / М.С. Барабаш // Науковий журнал: Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2004 – № 4. – С. 134 - 137.
15. Барабаш М. С. Методи експертних оцінок при автоматизованому проектуванні нетипових конструкцій / М. С. Барабаш, Т. В. Тугай // Науковий журнал: Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2005 – № 3, – С. 151 - 156.
16. Барабаш М. С. Деякі аспекти побудови розрахункових схем з використанням нових технологій автоматизації проектування (англ. мовою) / М. С. Барабаш, Г. Ленда // Науковий журнал: Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2006 – № 3 (29). – С. 72 - 77.
17. Барабаш М. С. Організація технології інтеграції систем автоматизованого проектування на базі КАЛПСО / М. С. Барабаш, А. В. Терещенко // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – К.: ДНДІАСБ, 2007. – № 4. – С. 40 - 44.
18. Барабаш М. С. Дослідження сумісної роботи фундаментної плити з палями / М. С. Барабаш, М. О. Бут, Р. В. Остапенко // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – К.: ДНДІАСБ, 2007 – №6. – С. 40 - 43.
19. Барабаш М. С. Применение интеллектуальных систем для автоматизированного расчета и проектирования железобетонных конструкций / М. С. Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. – Дн-вск, ПГАСА, 2007. – № 43. – С. 43 - 47.
20. Барабаш М. С. Аналіз основних проблем проектування багатофункціональних висотних будівель / М. С. Барабаш, А. В. Дзюба // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – К.: ДНДІАСБ, 2007. – № 10. – С. 38 - 40.
21. Барабаш М. С. Аналіз моделей ґрунтового середовища з метою визначення способу підсилення основи конструкції та коректне завдання її розрахункової схеми в ПК ЛІРА / М. С. Барабаш, С. М. Хоптинець, С. В. Дідух // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. –2009. – № 6. – С. 34 - 38.
22. Барабаш М. С. Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий //

- Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2009. – № 50. – С. 157 - 162.
23. Барабаш М. С. Исследование вопросов живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2010. – № 56. – С.123 - 128.
24. Барабаш М. С. Методи розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану плитно-палевих протизсувних конструкцій / М. С. Барабаш, М. В. Михальчук // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2010. – № 4. – С. 37 - 41.
25. Барабаш М. С. Аналіз надійності висотної будівлі з урахуванням ризику прогресуючого обвалення / М. С. Барабаш, К. М. Мисливець // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2010. – № 5 – С. 37 - 41.
26. Барабаш М. С. Методи мінімізації ймовірності прогресуючого руйнування висотної будівлі при дії сейсмічних навантажень / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерський, Я. В. Покотило // Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві. – 2011. – № 1 (21) – С.17 - 23.
27. Барабаш М. С. Концепция интеграции систем автоматизированного проектирования с использованием технологии информационного моделирования / М. С. Барабаш, А. С. Городецкий // Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві. – 2011. – № 1 (21) – С. 67 - 70.
28. Барабаш М. С. Численное моделирование воздействия динамических нагрузок метрополитена на близстоящие здания / М.С. Барабаш, Ю.В. Гензерський, В. Овчарова // Містобудування та територіальне планування: Наук-техн. збірник. – К., КНУБА, 2013. – Вип.48. – С.46-52.
29. Барабаш М. С. Особливості моделювання висотних будівель з урахуванням впливу динамічних навантажень / М. С. Барабаш, І. О. Усольцев // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. –2012. – № 1 – С. 24 - 28.
30. Барабаш М. С. Анализ проблем безопасности строительных объектов в районах высокой сейсмичности / М. С. Барабаш, В. П. Максименко, Л. В. Филинский // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) // ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К.: ДП НДІБК, 2012, ТОВ «Видавництво СТАЛЬ», 2012. – № 76 – С. 222 – 229.
31. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование уникальных строительных объектов средствами программных комплексов семейства ЛИРА / М. С. Барабаш // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2012. – № 4 – С. 25 - 32.

32. Барабаш М. С. Влияние процесса возведения на пространственную работу несущих систем зданий / М. С. Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2012. – № 65. – С. 29 - 34.
33. Барабаш М. С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий / М. С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – М.: Изд-во «АСВ», 2012. – Vol. 8, Issue 3 – С. 58 - 68.
34. Барабаш М. С. Архітектурно-будівельне проектування об'єкта будівництва на основі моделювання його життєвого циклу / М. С. Барабаш // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. збірник. – К.: НАУ, 2013. – № 9. – С. 27 - 34.
35. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла конструкций / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерський // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2013. – № 47. – С. 83 - 89.
36. Барвашов В. А. Трехпараметрическая модель грунтового основания и свайного поля, учитывающая необратимые структурные деформации грунта / В. А. Барвашов, В. Г. Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978. – №4. – С. 17 - 20.
37. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов; [пер. с англ.] / К. Бате, Э. Вилсон – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
38. Бачииский В. Я. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии / В. Я. Бачииский, А. Н. Бамбура, С. С. Ватагии // Бетон железобетон. – 1984. JSfslO. –С. 18 - 19. (нет номера и издательства)
39. Безпека промислових підприємств. Загальні положення та вимоги: ДСТУ3273-95. – [Чинний від 01-07-1996]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 44 с. – (Національний стандарт України).
40. Белостоцкий А.М. Комплексное расчетное обоснование напряженно-деформированного состояния высотных многофункциональных комплексов /А.М. Белостоцкий, Д.К. Каличаева [и др.] // Стр. мех. и расч. соор., 2006. - №6. - С.52-56.
41. Белостоцкий А.М. Численное моделирование состояния высотных зданий и комплексов в контексте обеспечения безопасности мегаполиса. // Труды конференции «Особенности проектирования и строительства жилых и общественных высотных зданий».- СПб.:ЛенНИИПроект, 2006. - С.65-67.
42. Бетонные и железобетонные конструкции. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 01-07-2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 73 с. – (Державні будівельні норми України).

43. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003: СП 63.13330.2012. – [Введен в действие с 01-01-2013 ]. – М.: Минрегион России, 2012. – 155 с. – (Свод правил).
44. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84\*. – [Введен в действие с 01-01-1986]. – М.: Стройиздат, 1985.. – 155 с. – (Строительные нормы и правила).
45. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике / Владимир Васильевич Болотин – М.: Госстройиздат, 1965. – 279 с.
46. Богдан А. С. Проектирование и строительство высотного Общественного центра / А. С. Богдан, А. А. Франивский // Научно-технический и производственный журнал «Жилищное строительство». – 2009. – №11 – С.24 - 27.
47. Бойко И. П. Напряжённо-деформированное состояние грунтового массива при устройстве новых фундаментов вблизи существующих зданий / И. П. Бойко, В. А. Сахаров // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: Труды докладов XX Международной конференции (Санкт-Петербург, 24–26 сентября, 2003 г.) – СПб., 2003. – Т. II – С. 111-116.
48. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / Владимир Васильевич Болотин. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
49. Вайнберг Д. В. Метод конечного элемента в механике деформируемых тел / Д. В. Вайнберг, А. С. Городецкий, В. В. Киричевский, А. С. Сахаров // Прикл. мех. – 1972. – Т.8, №8. – С. 3-28.
50. Вайнберг Д. В. Методы спуска в программировании задач строительной механики пластин и оболочек / Д. В. Вайнберг, Е. С. Дехтярюк, А.Л. Синявский // ЭЦВМ в строительной механике. Труды первого всесоюзного совещания по применению ЭЦВМ в строительной механике (г. Ленинград, 1963г.). – Л– М.: Издательство литературы по строительству, 1966.
51. Ветошкин А. Г. Надежность и безопасность технических систем / А. Г. Ветошкин, В. И. Марунин; под ред. д. т. н., проф., академика МАНЭБ А. Г. Ветошкина – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2002. – 129 с.
52. Ветошкин А. Г. Надежность технических систем и техногенный риск / Александр Григорьевич Ветошкин – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 154 с.
53. Верюжский Ю.В., Компьютерные технологии проектирования железобетонных конструкций / Ю. В. Верюжский, В. И. Колчунов, М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский. – Киев: НАУ, 2006. – 808 с.

54. Гарагаш И. А. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации / И. А. Гарагаш, В. Н. Николаевский // Успехи механики. – 1989. – № 1. – С.131 - 183.
55. Гильман Г. Б. Расчет пространственных систем с изменяющейся в процессе нагружения расчетной схемой / Г. Б. Гильман, В. С. Борисенко // ЭВМ в исследованиях и проектировании объектов строительства. – К.: КиевЗНИИСП. – 1973. – С. 27 - 37.
56. Городецкий А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. – М.: Транспорт, 1981. – 142 с.
57. Городецкий А. С. Вопросы расчета конструкций в упруго-пластической стадии с учетом применения ЭЦВМ / А. С. Городецкий // ЭЦВМ в строительной механике. Труды первого всесоюзного совещания по применению ЭЦВМ в строительной механике (г. Ленинград, 1963г.) – Л.-М.: Издательство литературы по строительству, 1966.
58. Городецкий А. С. К расчету тонкостенных железобетонных конструкций в неупругой стадии / А. С. Городецкий //Сборник трудов НИИСК «Строительные конструкции». –К.:Будівельник, 1965. – № 3.
59. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – 2-е изд., доп. – Киев: "ФАКТ", 2007. – 394 с.
60. Городецкий А. С. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «ЛИРА -WINDOWS» / Александр Сергеевич Городецкий – К.: "ФАКТ", 1996. – 140 с.
61. Городецкий А. С. О стержневых расчетных схемах тонкостенных железобетонных конструкций / А. С. Городецкий, Г. Б. Гильман // Строительство и архитектура, 1968. – №10
62. Городецкий А. С. Повышение качества расчетов строительных конструкций на основе совместного использования программных комплексов STARK ES и ЛИРА / А. С. Городецкий, Ю. П. Назаров, Ю. Н. Жук, В. Н. Симбиркин // Информационный вестник Мособлгосэкспертизы. – 2005. – № 1 (8). – С. 42 - 49.
63. Гроздов В. Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений / Вячеслав Тихонович Гроздов. – Санкт-Петербург: Издательский Дом KN+, 2001. – 48 с.
64. Гуслиста Г. Е. Методика спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» для будівель, розташованих на схилах / Г. Е. Гуслиста // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: сб. науч. тр. Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Днепропетровск: ПГАСА, 2010. – № 56 – С. 128 - 137.

65. Гуслиста Г. Е. Розрахунок конструкцій заглиблених споруд з урахуванням технології їхнього зведення / Г. Е. Гуслиста, Т. Д. Нікіфорова, М. В. Савицький // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – 2006. – № 6. – С. 30 - 34.
66. Гуслиста Г. Е. Урахування різних видів нелінійностей при комп'ютерному моделюванні заглиблених споруд / Г. Е. Гуслиста, М. В. Савицький // Теоретичні основи будівництва : збірник наукових праць Придніпровської державної академії будівництва та архітектури та Варшавського технічного університету.– Варшава, 2007. – № 15. – С. 225 - 230.
67. Дарков А. В. Строительная механика / А. В. Дарков, Н. Н. Шапошников. – Г.: Высш. шк., 1986. – 608 с.
68. Дмитриев Л. Г. Возможные расчетные стержневые модели некоторых непрерывных систем / Л. Г. Дмитриев // ЭЦВМ в строительной механике. Труды первого всесоюзного совещания по применению ЭЦВМ в строительной механике (г. Ленинград, 1963г.). – Л.-М.: Издательство литературы по строительству, 1966.
69. Добромислов А. Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений / А. Н. Добромислов // Промышленное строительство – 1990. – № 9. – С. 9 – 10
70. Добромислов А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам: справ. пособ. / Андрей Николаевич Добромислов. – М.: АСВ, 2006. – 72 с.
71. Добромислов А. Н. Ошибки проектирования строительных конструкций: научное издание/ Андрей Николаевич Добромислов – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 184 с.
72. Железобетонные конструкции : Спец. курс. Учеб. пособие для вузов / [В. Н. Байков, П. Ф. Дроздов, И. А. Трифонов и др.]; под ред. В. Н. Байкова. – [3 изд. перераб.] – М.: Стройиздат, 1981. – 767 с.
73. Железобетонные конструкции: Курсовое и дипломное проектирование / [А. Я. Барашиков, Л. М. Будникова, А. П. Гусейца]; под ред. А. Я. Барашикова. – Киев: Более высокая шк., 1987. – 416 с.
74. Жилые здания: МГСН 3.01-01. – [Введен в действие с 02-10-2001]. – М., 2001. – 73 с. – (Московские городские нормы).
75. Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов / Ю. К. Зарецкий. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1989. – 607 с.
76. Зенкевич О. Метод конечных элементов / Ольгерд Зенкевич; [пер. с англ.]. – Г.: Мир, 1975. – 541 с.
77. Золотов А.Б. Корректный аналитический метод расчета строительных объектов регулярной структуры / А.Б. Золотов, П.А. Акимов, В.Н. Сидоров

- и др. // Сборн. научн. трудов. «Вопросы прикладной математики и вычислительной механики» - М.: МГСУ, 2007. - №10
78. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н. И. Карпенко – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.
79. Клейн Г. К. Расчет балок на сплошном основании, непрерывно неоднородном по глубине / Г.К. Клейн // Строительная механика и конструкции. Сб. трудов МИИГС Мосгорисполкома. – 1954. – №3. – С.120.
80. Клейн Г. К. Учет возрастания модуля деформации грунта с увеличением глубины при расчете балок на сплошном основании / Г. К. Клейн, А. Е. Дураев // Гидротехническое строительство. – 1971.–№ 7.-С. 19 - 21.
81. Ключева Н. В. К расчету живучести пространственной системы «основание – фундамент – каркас – здание» / Н. В. Ключева, Е. Д.Воробьев // Теоретические и практические проблемы геотехники // Межвузовский тематический сборник трудов., С-Пб гос. арх.-стр. ун.–т С-Пб. – 2005. – С. 93–96.
82. Кочкаров А. А. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты / А. А Кочкаров, Г. Г. Малинецкий. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2003. – (Препринт, Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, 2003–53)
83. Кудишин Ю. И. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2007. – № 2. – С. 49 - 55.
84. Кудишин Ю. И. К вопросу о живучести строительных конструкций / Ю. И. Кудишин, Д. Ю. Дробот // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008. - № 2 (217). – С. 36 – 43
85. Кутухтин Е. Г. Легкие конструкции одноэтажных производственных зданий / Е. Г. Кутухтин, В. М. Спиридонов, Ю. Н. Хромец. – Г.: Стройиздат, 1988. – 263 с.
86. Лантух-Лященко А. И. ЛИРА. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций: учебное пособие / А. И. Лантух-Лященко. – К. – М.: 2001. – 312 с.
87. Леденев В. В. Предупреждение аварий: учеб. пособие / В. В. Леденев; В. И. Скрылев – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 240 с.
88. Линченко Ю. П. Основы автоматизированного проектирования : учебное пособие / Ю. П. Линченко. – 2-я редакция – Симферополь: НАПКС, 2004 г. – 336 с.
89. Линченко Ю. П. Дефекты незавершенного здания из монолитного железобетона и предложения по их оценке / Ю. П. Линченко, М. В. Васильев // Збірник наукових праць «Будівництво та техногенна безпека». – Симферополь: НАПКС, 2005 г. – № 12. – С. 32 - 37.

- 
90. ЛИРА 9.4. Руководство пользователя. ОСНОВЫ : учебное пособие / [Е. Б. Стрелец-Стрелецкий, В. Е. Боговис, Ю. В. Гензерский] ; под ред. академика РААСН, докт. техн. наук, проф. А. С. Городецкого. - К. : Издательство «ФАКТ», 2008. - 164 с.
91. ЛИРА 9.2. Примеры расчета и проектирования. Учебное пособие. / М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский, Д. В. Марченко, В. П. Титок. – К.: “Факт”, 2005. – 138 с.
92. Люблинский В. А. Информационная поддержка жизненного цикла несущей системы многоэтажного здания / В. А. Люблинский, Ю. В. Белокопытова // Строительство: материалы, конструкции, технологии: материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Братск: ГОУВПО «БрГТУ», 2003. – С. 9 - 11.
93. Люблинский В. А. Информационные системы в строительстве: учеб. пособие для вузов / В. А. Люблинский. – Братск: «БрГУ», 2005. – 88 с.
94. Мандриков А. П. Примеры расчета железобетонных конструкций / А. П. Мандриков. – М.: Стройиздат, 1989. – 506 с.
95. Мельчаков А. П. О формате технического регламента на величину риска аварии зданий и сооружений / А. П. Мельчаков, А. Г. Васильев, М. В. Косогорова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – № 22. – С. 29 - 33.
96. Мельчаков А. П. Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов (Теория, методики и инженерные приложения): учеб. пособ. / А. П. Мельчаков. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 49 с.
97. Металлические конструкции / [Ю. И. Кудишин, Е. И. Беленя, В. С. Игнатъева и др.]. – Г.: Издательский центр «Академия», 2007. – 688 с.
98. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів / [О. О. Нілов, В. О. Пермяков, О. В. Шимановський и др.]; під загальною редакцією О. О. Нілова та О. В. Шимановського. – Видання 2-е, перероблене і доповнене. – К.: Видавництво «Сталь», 2010. – 869 с.
99. Михлин С. Г. О постоянных множителях в оценках погрешности вариационной сеточной аппроксимации / С. Г. Михлин – В кн.: Записки научных семинаров. – Л.: 1978. – Т. 80. – С. 125 - 166.
100. Михлин С. Г. Вариационные методы математической физики / С. Г. Михлин – М.: Наука, 1970. – 512 с.
101. Митцел А. Аварии бетонных и каменных конструкций / А. Митцел, В. Стахурский, Я. Сувальский; пер. с пол. Зайцевой И. В. – М.: Стройиздат, 1978. – 304 с.
102. МОНОМАХ-САПР 2013. Учебное пособие. Примеры расчета и проектирования / [Д. А. Городецкий, С. В. Юсипенко, Л. Г. Батрак и др.]. – К.: Электронное издание, 2013. – 368 с.
-

103. Московские городские строительные нормы. Многофункциональные высотные здания и комплексы: МГСН 4.19-05. – [Введен в действие с 28-12-2005-]. – М., 2005. – 71 с. – (Московские городские строительные нормы).
104. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*: СП 20.13330 2011. – [Введен в действие с 20-05-2011]. – М., 2011. – 79 с. – (Свод правил)
105. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006. – [Введен в действие с 01-01-2007]. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 78 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
106. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету: ГОСТ27751-88 (СТ СЭВ384-87). – [Введен в действие с 1988-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 10 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
107. Назаров Ю. П. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях / Ю. П. Назаров, А. С. Городецкий, В. Н. Симбиркин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 4. – С. 5 - 9.
108. Назаров Ю. П. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла конструкций / Ю. П. Назаров, А. С. Городецкий, В. Н. Симбиркин // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений: сборник научных статей в двух частях / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – ч. 2. – М.; ЦПП, 2009. – С. 209 - 216.
109. Назаров Ю. П. Расчетные модели сейсмических воздействия / Ю. П. Назаров. – М.: Наука, 2012. – 414 с.
110. Новожилов В.В. Теория упругости / Валентин Валентинович Новожилов – Л.: Судпромгиз, 1958. – 368 с.
111. Норенков И. П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И. П. Норенков, П. К. Кузьмик – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 360 с.
112. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов / Игорь Петрович Норенков – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
113. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений/ Ю. И. Немчинов. – К.: НИИСК, 2008. – 480 с.
114. Немчинов Ю.И. Особенности строительства в сейсмических районах Украины и совершенствование норм проектирования зданий и сооружений / Ю.И. Немчинов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2000. – №1. – С. 8–15.
115. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – [Введен в действие с 01-01-1987]. – Г.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 48 с. – (Строительные нормы и правила).

116. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований: ДБН В.1.2-14-2009. – [Введен в действие с 01-12-2009]. – К.: Минрегионстрой Украины, 2009. – 45 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
117. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция: СНиП 2.02.01-83\*: СП 22.13330.2011. – [Введен в действие с 20-05-2011]. – М., 2011. – 161с. – (Свод прави)
118. Основания зданий и сооружений: СП 50-101-2004. – [Введен в действие с 03-09-2004]. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 130с. – (Свод правил по проектированию и строительству).
119. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. – [Чинний від 01-07-2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 20011. – 107 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
120. Перельмутер А. В. Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций / А. В. Перельмутер // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2004. – № 6. – С. 38 - 41.
121. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
122. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / Анатолий Викторович Перельмутер. – Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. – 254 с.
123. Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций / Анатолий Викторович Перельмутер. – Киев:УФИМБ, 1998. – 148 с.
124. Повреждения зданий / под ред. И. А. Петрова; пер. с англ. Г. А. Ивановой. – М.: Стройиздат, 1982. – 143 с.
125. Перельмутер А. В. Об очинке живучести несущих конструкций / Анатолий Викторович Перельмутер // Металлические конструкции: Работы школы профессора Н. С. Стрелецкого. – М.: МГСУ, 1995. – С. 62-68.
126. Пособие по проектированию жилых зданий. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85), (Приложение 2, Рекомендации по обеспечению устойчивости крупнопанельных зданий при аварийных воздействиях.Ю.М. Стругацкий, Ю.А. Эйсман). ЦНИИЭП жилища Госкомархитектуры. М., 1989, с. 232-268.
127. Применение ЭЦВМ к расчетам строительных конструкций в практике проектных организаций (опыт института Гипротас) / [Р. А. Резников, А. М. Горлов, В. С. Левитман, Л. С. Якобсон и др.]. // ЭЦВМ в строительной механике. Труды первого всесоюзного совещания по применению ЭЦВМ в строительной механике (г. Ленинград, 1963г.). – Л.-М.: Издательство литературы по строительству, 1966.

128. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013. Учебное пособие / [ Д. А. Городецкий, М. С. Барабаш, Р. Ю. Водопьянов и др. ]; под редакцией академика РААСН А. С. Городецкого. – Москва, 2013г. – 376 с.
129. Проектирование высотных жилых и гражданских сооружений: ДБН В.2.2-24:2009. – [Введен в действие с 01-09-2009]. – К.: Минрегионстрой Украины, 2009. – 103 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
130. Проектирование железобетонных конструкции. Справочное пособие / [А. Б. Гольшев, В. Я. Бачинский, В. П. Полищук и др.]; под ред. А. Б. Гольшева. – Киев: Строитель, 1985. – 496 с.
131. Расторгуев Б. С. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях: учебное пособие / Б. С. Расторгуев, А. И. Плотников, Д. З. Хуснутдинов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 152 с.
132. Расторгуев Б. С. Деформирование конструкций перекрытий каркасных зданий после внезапного разрушения одной колонны / Б. С. Расторгуев, К. Н. Мутока // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2006. – № 1.
133. Расторгуев Б. С. Методы динамического расчёта зданий на устойчивость против прогрессирующего разрушения / Б. С. Расторгуев // Вестник отделения строительных наук РААСН. – 2009. – Т. 1, № 13.
134. Расторгуев Б. С. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях / Б. С. Расторгуев, А. П. Плотников, Д. З. Хуснутдинов – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 152 с.
135. Расторгуев Б. С., Плотников А. И. Расчёт несущих конструкций монолитных железобетонных зданий на прогрессирующее разрушение с учётом динамических эффектов / Б. С. Расторгуев, А. И. Плотников // Сборник научных трудов института строительства и архитектуры. – М.: МГСУ, 2008. – С. 68 - 75.
136. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона: проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии / [А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Д. А. Городецкий и др.]. – Киев: Факт, 2004. – 106 с.
137. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям / [В. А. Балдин, И. И. Гольденблат, В. И. Коченов и др.]. – М.: Стройиздат, 1951. – 272 с.
138. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. Ю.М. Стругацкий, Г. И. Шапиро, Ю.А. Эйсман. Москомархитектуры. М., 1999.
139. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / Алексей Руфович Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

140. Ройтман А. Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий / Альфредо Герцевич Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 175 с.
141. Ройтман А. Г. Предупреждение аварий жилых зданий / Альфредо Герцевич Ройтман. – М.: Стройиздат, 1990. – 240 с.
142. Савицький М. В. Дослідження роботи конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону / М. В. Савицький, Г. Е. Гуслиста // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение* : сб. науч. тр. Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – № 37 – С. 418 - 425.
143. Система ГРУНТ для определения параметров жесткости грунтового и свайного оснований / Д. А. Городецкий, В. П. Максименко, Д. В. Медведенко, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. - Дн-вск., ПГАСА. – 2013. – № 66 – С.6. – Библиогр.:(Система ГРУНТ для определения параметров жесткости грунтового и свайного оснований).*
144. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85: СП 24.13330.2011. – [Введен в действие с 20-05-2011]. – М., 2011. – 85 с. – (Свод прави).
145. Семко О. В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталі залізобетонних конструкцій: монографія / О. В. Семко – Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2004. – 320 с.
146. Семко О. В. До аналізу ризиків помилкової діагностики при обстеженні несучих будівельних конструкцій / О. В. Семко, О. П. Воскобійник // *Сб. науч. труд.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Днепропетровск, ПГАСА, 2008. – № 47. – С. 573 - 578.*
147. Сендеров Б. В. Аварии жилых зданий / Борис Владимирович Сендеров – М.: Стройиздат, 1991. – 216 с:
148. Смирнов В. А. Строительная механика / В. А. Смирнов, А. С. Городецкий. – М.: Юрайт, 2013. – 423 с.
149. Современное высотное строительство. Монография / [А. Б. Айрапетов, А. М. Абрамов, Э. Л. Айрумян и др.]; гл. ред. М. Н. Щукин – М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. – 440 с.
150. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций. Курсовое и дипломное проектирование. Исследовательские задачи: [учебное пособие для студ. высших учеб. заведений] / [М. С. Барабаш, М. Л. Мартынова, М. В. Лазнюк, Н. И. Пресняков]; под ред.. проф. А. А. Нилова. – Москва: издательство АСВ, 2008. – 328 с.

151. Сооружения транспорта. Мосты и трубы. Нормы проектирования: ДБН В.2.3-14:2006. – [Введен в действие с 01-02-2007]. – К.: Министерство строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Украины, 2006. – 217 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
152. Сосис П. М. Опыт механизации инженерных расчетов на машинносчетной станции / П. М. Сосис // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: Издательство литературы по строительству, 1960, – № 3.
153. Сосис П. М. Статически неопределимые системы / П. М. Сосис. – К.: Будівельник, 1968. – 311 с.
154. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический / [под ред. А. А. Уманского] – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Стройиздат, 1972. – 600 с.
155. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*: СП 16.13330 2011. – [Введен в действие с 05-20-2011]. – М., 2011. – 173 с. – (Свод правил).
156. Стальные конструкции. СНиП II-23-81\*. – [Введен в действие с 01-01-1982]. – М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 90 с. – (Свод правил).
157. Стекольников Ю. И. Живучесть систем / Юрий Иванович Стекольников – СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
158. Стругацкий Ю. М. Обеспечение прочности панельных зданий при локальных разрушениях их несущих конструкций / Стругацкий Ю. М. // Сб.: Исследования несущих бетонных и железобетонных конструкций сборных многоэтажных зданий. – М.: МНИИТЭП, 1980. – С. 3 - 19.
159. Стрелецкий Н. С. Основы статистического учета коэффициентов запаса прочности сооружений / Николай Станиславович Стрелецкий. – М.: Стройиздат, 1947. – 92 с.
160. Строительная механика в СССР. 1917-1957; сб.ст. / [под редакцией И.М. Рабиновича]. – М.: Госстройиздат, 1957.
161. Строительство в сейсмических районах Украины: ДБН В.1.1-12:2006. – [Введен в действие с 01-02-2007]. – К.: Министерство строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Украины, 2006. – 50 с. – (Государственные строительные нормы Украины).
162. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. СП 14.13330 2011. – [Введен в действие с 20-05-2011]. – М., 2011. . – 83 с. – (Свод правил).
163. Строительство в сейсмических районах. СНиП II-7-81. – [Введен в действие с 01-01-1982]. – М.: ФГУП ЦПП, 2007. – 44 с. – (Строительные нормы и правила).
164. Строительство в сейсмических районах. Раздел I. Жилые, общественные, производственные здания и сооружения: СНТ 2.01.08-99\*. –

- Ашхабад: НК АСК, 2000. – 83 с. – (Строительные нормы Туркменистана). – не нашла когда вступил в силу
165. Стругацкий Ю. М. Безопасность московских жилых зданий массовых серий при чрезвычайных ситуациях / Ю. М. Стругацкий, Г. И. Шапиро // ПГС. - 1998 - № 8. – С. 37 - 41.
166. Тамразян А. Г. Расчет надежности строительных конструкций, основанный на моделировании функции безопасности / Ашот Георгиевич Тамразян // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – № 4. – С. 48 - 50.
167. Тахтамышев А. Г. Примеры расчета стальных конструкций / Андрей Георгиевич Тахтамышев – 2-е изд, перераб. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
168. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции / Анатолий Григорьевич Трущев – М.: Стройиздат, 1983. – 216 с.
169. Ферронская А. В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона / Анна Викторовна Ферронская. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 336 с.
170. Хенли Э. Дж. Надёжность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
171. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство / Хокс Барри. – М.: Мир, 1991. – 296 с.
172. Хоциалов Н. Ф. Запасы прочности / Н. Ф. Хоциалов // Строительная промышленность. – М.: 1929. – № 10. – С. 9 - 10
173. Цытович Н. А. Механика грунтов / Николай Александрович Цытович. – М.: Госстройиздат, 1963. – 636 с.
174. Чайка В. П. Значение концепции конструкционной прочности бетона для развития теории сопротивления железобетона силовым воздействиям / В. П. Чайка // Бетон на рубеже третьего тысячелетия. Материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. – М.: 2001. – С.813 - 817.
175. Чайка В. П. Проблема нормирования конструкционной диаграммы сжатия бетона. / В. П. Чайка // Исследование прочности и деформаций бетона и железобетонных конструкций для транспортного строительства. – М.: ЦНИИС, 1990. – С.57 - 78.
176. Шимановский А. В. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений / [А. В. Шимановский, В. Н. Гордеев, В. П. Королев и др.]; под общ. ред. А. В. Шимановского. – К.: «Сталь», 2008. – 463 с.
177. Шубин Р. А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / Роман Александрович Шубин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с.
178. ЭСПРИ. Руководство пользователя. Учебное пособие [Электронный ресурс] / [В. П. Максименко, Е. Б. Стрелецкий, Ю. Б. Филоненко]; под. ред.

- А. С. Городецкого. – Киев, 2013 – 210с. – Режим доступа до журн.: <http://www.liraland.ru/files/#espri>
179. Яценко Е. А. Влияние длительных нагрузок и ползучести бетона на предельные состояния железобетонных конструкций / Е. А. Яценко // Бетон и железобетон. – 1990. – № 8. – С. 21 - 22.
180. Barabash M. Stress strain state estimation of underground parking by numerical modeling / M. Barabash, A. Roman, M. Stankiewicz // Future of Lithuania”. Transport engineering and management // Proceeding of the 16th Conference for Junior Researches “Science. – Vilnius, Lithuania, 8 May 2013. – С. 199 - 204. (нет номера и издательства)
181. Courant R. Variable methods for the solution of problems of equilibrium and vibration / R. Courant // Bull. Amer Math. Soc. – 1943. – Vol. 49. – N1.
182. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (p.30)
183. Eurocode 2: Design of concrete structures. Annex B (p.202)
184. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1.General requirements. International standard ISO 2631/1. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1985.
185. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2.Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). International standard ISO 2631/2. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1989.
186. Ganju T. H. Non-linear finite element computer model for structural claybrickwork / T. H. Ganju // Struct.Eng. – 1981. – Vol. 59 B, № 3 - P. 4.
187. Marchand K. A. Blastand Progressive Collapse / Kirk A. Marchand, Farid Alfawakhive – AISC, 2005.
188. Page A. W. A non-linear analysis of the composite action of masonry walls on beams / A. W. Page // Proc. Inst. Civ. Eng. – 1979. –Vol. 67. – P. 93-110.
189. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Roman Point // Caning Town; MSO, 1968.
190. Remington P.J., et al., Wheel Rail Noise and Vibration. U.S. Department of Transportation Report UMTA-MA-06-0025-75-10 and 11, in two volumes, 1975.
191. Transportation Noise Reference Book. Ed. by P.M.Nelson. London, Butterworths, 1987,427 p.
192. Ficken F.A. The continuation method for functional equation. – Commun. Pure Appl. Math.,1951, v.4, p.435 – 456.

Научное издание

**Барабаш Мария**

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА  
ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Подписано в печать 15.04. 2014 р.  
Формат издания 70x100/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л.24,63.  
Тираж 500. Заказ № 0160

Отпечатано ООО «Издательство «Сталь»  
Свидетельство ДК № 1212 от 28.01.2003 г.  
02660 г. Киев, ул. Виталия Шимановского 2/1  
тел./факс 516-45-02, тел. 543-95-56  
[www. izdat.com.ua](http://www.izdat.com.ua)



www.liraland.ru

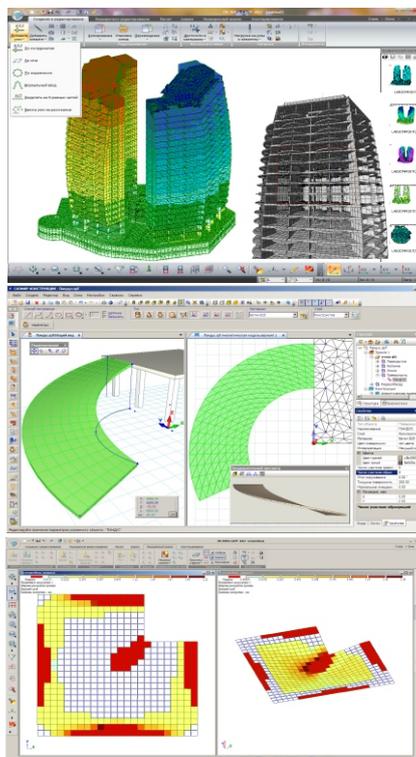
# ЛИРА-САПР

На территории Украины поставляется украинско-язычная версия под торговой маркой «МІРАЖ»

Программный комплекс для расчета и проектирования строительных и машиностроительных конструкций различного назначения

- **Интерфейс пользователя нового поколения САПФИР-КОНСТРУКЦИИ.**  
Система предназначена для синтеза расчетной схемы здания или сооружения на основе управляемой процедуры преобразования 3D и 2D архитектурных моделей, созданных в различных графических программах: САПФИР-3D, Allplan, Revit, AutoCAD и др. Реализована последовательность преобразования: архитектурная модель - аналитическая модель-расчетная схема. Реализована библиотека автоматических генераторов конечно-элементных сеток, автоматическое создание абсолютно жестких тел при произвольном пересечении стержней и пластин. Удобные режимы задания капителей, утолщений плит, пандусов, последовательности монтажа с последующей визуализацией процесса возведения.  
САПФИР-КОНСТРУКЦИИ позволяет создание и редактирование нагрузок в виде сосредоточенных и распределенных по линии и площади. Нагрузки задаются на произвольных поверхностях без привязки к конечно-элементной модели. Для задания ветровой нагрузки необходима только информация о районе строительства и направление ветра.  
Имеется процедура синтеза нагрузок, позволяющих автоматически сформировать эксплуатационные нагрузки в зависимости от целевого предназначения помещений. Реализована диагностика созданной аналитической модели.

- Развитая интуитивная графическая среда **ВИЗОР-САПР** пользователя с возможностью 3D-визуализации расчетной схемы на всех этапах синтеза и анализа.
- Мощный многофункциональный процессор, реализующий быстродействующие алгоритмы составления и решения систем уравнений с порядком до нескольких миллионов неизвестных.
- Развитая библиотека конечных элементов, позволяющую создавать компьютерные модели практически любых конструкций.
- Специализированный документатор, позволяющий формировать отчет, состоящий из текстовой, табличной и графической информации с формированием файлов для MS Office.
- Связь с другими расчетными, графическими и документирующими системами САПФИР-3D, (Revit Structure 2008/2009/2010, AutoCAD, ArchiCAD, Advance Steel, BoCAD, Allplan, STARK ES, Gmsh, MS Word, MS Excel, GLAZER и др.) на основе DXF, MDB, STP, SLI, MSH, STL, OBJ, IFC и др. файлов.



ООО «ЛИРА САПР» Украина, 04053, г. Киев, Кияновский переулок, 7-а  
т/ф +(38 044) 5905886, 5905885 e-mail: info@liraland.com.ua www.liraland.ru

## ЛИРА-САПР СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**АРМ-САПР - конструирующая система армирования** Реализует подбор площадей сечения арматуры колонн, балок, плит и оболочек по первому и второму предельным состояниям в соответствии с различными нормативами. По результатам расчета формируются чертежи балок и колонн, а также создаются dxf-файлы чертежей. Реализованы ДБН В.2.6-98:2009, СП 52-101-2003, СНиП 2.03.01-84, Еврокод, ТСН 102-00, ДСТУ 3760-98.

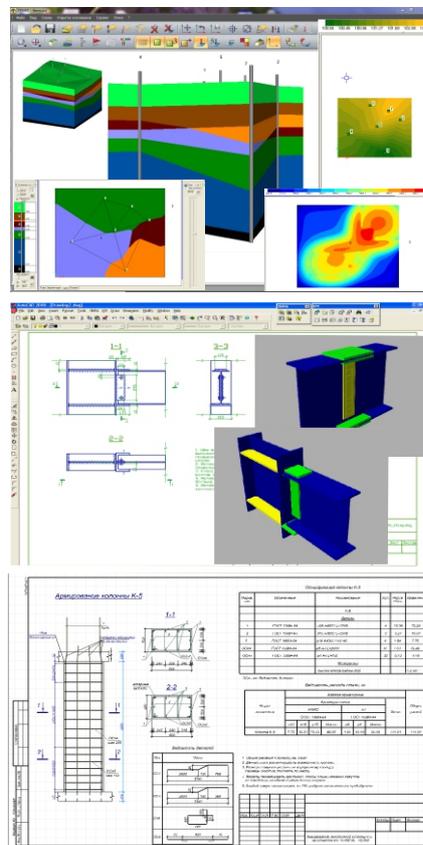
**СТК-САПР - стальные конструкции** Реализует конструирование элементов стальных конструкций и позволяет выполнять подбор и проверку сечений, а также рассчитывать и проектировать узлы стальных конструкций. Система может функционировать в локальном режиме, что позволяет проверить множество вариантов конструирования элементов. Реализованы СП16.1333.2011, СНиП II-23-82, Еврокод.

**МОНТАЖ плюс** позволяет проводить компьютерное моделирование процесса возведения конструкций высотных зданий из монолитного железобетона с учетом многократного изменения расчетной схемы, демонтажа стоек опалубки, приложении и снятия монтажной нагрузки, различной жесткости и прочности бетона, вызванной временным замораживанием уложенной смеси и другими факторами.

**ГРУНТ** позволяет по данным инженерно-геологических изысканий (расположения и характеристики скважин) построить трехмерную модель грунтового массива, определить переменные по области проектируемой фундаментной плиты коэффициенты постели с автоматическим определением их величин для каждого конечного элемента плиты. Учитывается влияние близлежащих зданий. Реализованы различные методы определения коэффициентов постели.

**КМ-САПР** позволяет по данным расчета стальных конструкций (подбор или проверка сечений унифицированных элементов, расчет и унификация узлов) в среде ЛИРА-САПР получить монтажные схемы с маркировкой элементов и узлов, ведомости элементов, чертежи узлов с возможной трехмерной визуализацией и спецификации, т.е. полный комплект чертежей КМ в среде AutoCAD.

**САФИР-ЖБК** позволяет по величинам армирования, полученным в системе АРМ-САПР и на основе опалубочного чертежа, созданного в САФИР-КОНСТРУКЦИИ, получить рабочие чертежи армирования плит перекрытий с раскладкой арматуры, спецификациями, ведомостями материалов и деталей





www.liraland.ru

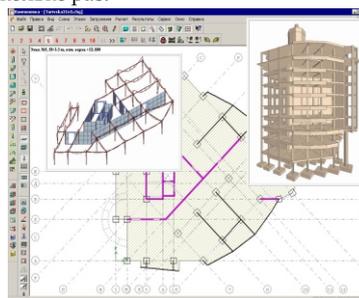
# МОНОМАХ-САПР

Программный комплекс для автоматизированного проектирования железобетонных и армокаменных конструкций многоэтажных каркасных зданий

Программный комплекс МОНОМАХ-САПР предназначен для автоматизированного расчета и проектирования конструкций многоэтажных зданий и состоит из набора информационно связанных проблемно ориентированных программ. Работая в среде ПК МОНОМАХ-САПР пользователь оперирует общепринятыми терминами: колонна, балка, плита, отверстие, форма штампа приложенной нагрузки и др. В автоматическом режиме выполняются рабочие чертежи или эскизы рабочих чертежей, которые затем могут быть отредактированы в AutoCAD (реализован экспорт dxf-файлов).

На основе ПК МОНОМАХ-САПР в короткие сроки можно провести многовариантное проектирование с выбором рационального варианта и получением документации на стадии "ПРОЕКТ". Трудоемкость получения чертежей на стадии "РАБОЧИЙ ПРОЕКТ" при использовании ПК МОНОМАХ-САПР сокращается в несколько раз.

- **КОМПОНОВКА** - программа проектирования многоэтажных каркасных зданий из монолитного железобетона и зданий с кирпичными стенами
- **БАЛКА** - программа проектирования монолитных железобетонных балок
- **КОЛОННА** - программа проектирования монолитных железобетонных колонн
- **ПЛИТА** - программа проектирования монолитных железобетонных плит перекрытий и фундаментных плит
- **РАЗРЕЗ (СТЕНА)** - программа проектирования монолитных железобетонных стен
- **КИРПИЧ** - программа проектирования стен кирпичных зданий
- **ГРУНТ** - программа определения коэффициентов постели



## ЭСПРИ

Электронный  
СПравочник Инженера

Электронный СПравочник Инженера содержит серию справочных и расчетных программ повседневного применения. ЭСПРИ позволяет находить адекватную расчетную модель конструкции; проводить многосторонний анализ разнообразных результатов расчета модели; выполнять экспертную оценку проектов.

1. Раздел **Математика для инженера** (6 программ)
2. Раздел **Сечения:** (4 программы) 3. Раздел **СтаДиУс** (14 программ)
4. Раздел **Стальные конструкции** (8 программ)
5. Раздел **Железобетонные конструкции** (10 программ)
6. Раздел **Каменные и армокаменные конструкции** (4 программы)
7. Раздел **Деревянные конструкции** (3 программы)
8. Раздел **Основания и фундаменты** (7 программ)
9. Раздел **Нагрузки и воздействия** (7 программ)
10. Программа **Прогибы** 11. Программа **Эллипсоид** 12. Программа **Шпунт**
13. Программа **Диафрагма** 14. Раздел **Продавливание** (2 программы)
15. Программа **Тостер** 16. Программа **Преднапряжение** 17. Программа **Грунт**

ООО «ЛИРА САПР» Украина, 04053, г. Киев, Кияновский переулок, 7-а  
т/ф +(38 044) 5905886, 5905885 e-mail: info@liraland.com.ua www.liraland.ru