

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

**Ю. Н. Чудинов**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕРАЗРЕЗНОГО РИГЕЛЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК «ЛИРА-САПР»**

Утверждено в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Комсомольск-на-Амуре  
2021

УДК 004.4:624.01(07)  
ББК 38.537я7+32.973.2-018.2я7  
Ч-842

*Рецензенты:*

Кафедра «Строительство» ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», зав. кафедрой канд. техн. наук, доцент *М. Б. Мершеева*;  
*А. И. Туров*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство и инженерные конструкции» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»

**Чудинов, Ю. Н.**

Ч-842 Проектирование неразрезного ригеля железобетонного каркасного здания с применением ПК «Лира-САПР»: учеб. пособие / Ю. Н. Чудинов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – 100 с.  
ISBN 978-5-7765-1470-8

В учебном пособии рассматривается расчет железобетонных конструкций с применением ПК «Лира-САПР». Подробно описаны алгоритмы статического и конструктивного расчетов неразрезного ригеля многоэтажного каркасного здания. Для контроля результатов численных расчетов выполняются параллельные расчеты в программе MathCAD.

Предназначено для студентов специальности 08.05.01 – «Строительство уникальных зданий и сооружений». Также материал может быть полезен студентам направлений 08.03.01, 08.04.01 – «Строительство» и специалистам, работающим в области проектирования зданий и сооружений.

УДК 004.4:624.01(07)  
ББК 38.537я7+32.973.2-018.2я7

ISBN 978-5-7765-1470-8

© ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет», 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ РАМЫ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ В ПК «ЛИРА-САПР». ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАСЧЕТЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	7
1.1. Задание на расчетно-графическую работу.....	7
1.1.1. Исходные данные.....	7
1.1.2. Состав и цель выполнения расчетно-графической работы.....	10
1.2. Статический расчет строительных конструкций.....	11
1.2.1. Статический расчет строительных конструкций аналитическими методами.....	11
1.2.2. Основные сведения о статическом расчете строительных конструкций в ПК «Ли́ра-САПР».....	12
1.3. Конструктивный расчет строительных конструкций.....	16
1.3.1. Метод расчета по предельным состояниям.....	16
1.3.2. Коэффициенты метода предельных состояний.....	18
1.3.3. Учет коэффициентов метода предельных состояний в ПК «Ли́ра-САПР».....	20
1.3.4. Аналитический конструктивный расчет железобетонных изгибаемых элементов.....	23
1.3.5. Конструктивный расчет железобетонных элементов в ПК «Ли́ра-САПР».....	28
1.3.6. Одиночное и двойное армирования.....	30
2. ПОДБОР СЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В НЕРАЗРЕЗНОМ РИГЕЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК «ЛИРА-САПР».....	34
2.1. Статический расчет неразрезного ригеля.....	35
2.1.1. Признаки схемы в ПК «Ли́ра-САПР».....	35
2.1.2. Основные настройки ПК «Ли́ра-САПР».....	38
2.1.3. Создание геометрической схемы.....	40
2.1.4. Задание граничных условий.....	42
2.1.5. Задание шарниров. Свойства стержневого конечного элемента.....	43
2.1.6. Задание и присваивание жесткостей элементам.....	48
2.1.7. Задание отдельных загрузжений.....	50
2.1.8. Статический расчет.....	51
2.1.9. Сравнение результатов численного и аналитического расчетов рамы.....	52

2.1.10. <i>Корректировка расчетной схемы рамы для вычисления усилий по граням колонн</i> .....	54
2.1.11. <i>Задание таблицы расчетных сочетаний нагрузок. Вычисление усилий по расчетным сочетаниям нагружений</i> .....	57
2.1.12. <i>Задание таблицы расчетных сочетаний усилий. Вычисление усилий по расчетным сочетаниям усилий</i> .....	59
2.1.13. <i>Вычисление усилий от расчетных сочетаний нагрузок в программе MathCAD</i> .....	63
2.2. <i>Конструктивный расчет неразрезного ригеля</i> .....	70
2.2.1. <i>Выбор варианта конструирования</i> .....	70
2.2.2. <i>Задание материалов</i> .....	71
2.2.3. <i>Подбор армирования. Просмотр результатов конструктивного расчета</i> .....	75
2.2.4. <i>Подбор армирования в программе MathCAD</i> .....	78
2.2.5. <i>Автоматизация расчета армирования в программе MathCAD</i> .....	81
3. <b>ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО ЗАДАННОМУ АРМИРОВАНИЮ</b> .....	85
3.1. <i>Принятое армирование ригеля. Определение несущей способности сечений в программе MathCAD</i> .....	85
3.2. <i>Создание типов заданного армирования</i> .....	89
3.3. <i>Назначение (удаление) типа заданного армирования элементам расчетной схемы</i> .....	92
3.4. <i>Просмотр и анализ результатов конструктивного расчета</i> .....	94
3.5. <i>Подготовка отчета о выполнении расчетно-графической работы. «Книга отчетов» в ПК «Лира-САПР»</i> .....	96
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	99
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	100

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование железобетонных конструкций всегда было сложной задачей, требующей хорошей базовой подготовки в области сопротивления материалов, строительной механики, строительных конструкций. Современное производство еще больше ужесточило требования к квалификации специалиста-проектировщика железобетонных конструкций по многим причинам, из которых можно выделить следующие.

Все большее применение находит строительство зданий и сооружений из монолитного железобетона. Если объекты, выполненные из сборного железобетона, во многих случаях позволяют рассчитывать отдельно конструктивные элементы по простым расчетным схемам, то здания из монолитного железобетона могут быть эффективно, качественно и надежно запроектированы только при использовании пространственных расчетных моделей. Причина в необходимости выбора трехмерных моделей связана с тем, что в монолитных конструкциях сопряжение элементов практически всегда является жестким. Как следствие, вычленение из пространственной расчетной схемы отдельных конструктивных элементов часто ведет к потере точности результатов.

Практически все расчеты конструкций сейчас выполняются с применением САПР-систем. При экспертизе проектов стандартным стало требование об обязательном автоматизированном расчете конструкций. Поэтому современный квалифицированный инженер-конструктор должен в совершенстве не только знать теорию расчета строительных конструкций, но и уметь грамотно и надежно применять расчетные САПР-системы.

В новых нормативных документах по проектированию зданий и сооружений в сейсмоопасных районах ужесточились требования по проектированию конструкций, а точнее повысилась балльность для многих регионов. Как следствие, все больше строящихся и реконструируемых объектов попадают под требование расчета на сейсмические воздействия. И в этом случае стандартным требованием организаций, производящих экспертизу проектов, является не только применение САПР-систем, но и обязательный пространственный расчет зданий и сооружений.

Появление требования выполнения расчетов на прогрессирующее обрушение для широкого класса объектов предполагает использование дополнительных ресурсов конструкций за счет учета физической нелинейности работы материалов и учета геометрической нелинейности (расчет ведется по деформированной схеме). Вследствие того, что железобетон является композитным материалом, для него расчеты с учетом физической нелинейности представляют сложную задачу, решение которой требует глубоких знаний теории железобетона, численных методов и САПР-систем.

Все вышеизложенное предполагает долговременную подготовку молодых специалистов в области проектирования строительных конструкций, которая наиболее полно может быть реализована только в рамках специалитета. Поэтому материал пособия ориентирован в первую очередь на студентов, обучающихся по программе «Строительство уникальных зданий и сооружений», хотя частично может быть полезен и бакалаврам, обучающимся по направлению «Строительство».

В пособии рассматривается расчет железобетонных конструкций с применением ПК «Ли́ра-СА́ПР» на примере поперечной рамы многоэтажного каркасного здания. «Ручной» расчет конструкций многоэтажного каркасного здания студенты выполняют в рамках курсового проекта 1 по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции» [7].

С помощью материалов данного учебного пособия студенты должны выполнить автоматизированный расчет рамы типового этажа (Расчетно-графическая работа «Расчет неразрезного ригеля с применением ПК «Ли́ра-СА́ПР»). Алгоритм статического расчета поперечной рамы подробно описан в учебном пособии [8]. Поэтому при изложении материала предполагается, что студенты владеют начальными базовыми знаниями функционала ПК «Ли́ра-СА́ПР», и детально эта тема не раскрывается.

Основные цели рассматриваемой работы:

1. Получение знаний, навыков и умений по конструктивному расчету железобетонных изгибаемых элементов (подбор армирования элементов и проверка несущей способности элементов с заданным армированием).

2. Освоение технологии параллельных «ручных» и автоматизированных расчетов с целью контроля и анализа результатов расчета. Данная технология предполагает также применение программы MathCAD.

3. Получение знаний по вопросам, как в ПК «Ли́ра-СА́ПР» реализуется теория расчета железобетонных конструкций. Имеется достаточно большой объем литературы отдельно по теории расчета железобетонных конструкций и отдельно по алгоритмам (функционалу) расчета строительных конструкций в ПК «Ли́ра-СА́ПР» [4, 5, 6]. Но многие пользователи (не только студенты, но даже и некоторые проектировщики) имеют смутное представление, как работает этот «черный ящик» под названием ПК «Ли́ра-СА́ПР». Очень часто пользователи задают исходные данные, получают результаты, но не знают внутреннего алгоритма ПК «Ли́ра-СА́ПР» (или другого расчетного комплекса) и иногда даже не могут правильно интерпретировать результаты расчетов.

Хотя в пособии приводится много важной информации по проектированию железобетонных конструкций, работе с САПР-системами, **главной целью** пособия является изложение методики обучения студентов проектированию железобетонных изгибаемых элементов с комплексным применением САПР-систем и обязательным контролем, анализом получаемых

результатов. Есть достаточно много печатной литературы, видеоуроков и другое отдельно по проектированию конструкций и отдельно по функционалу ПК «Ли́ра-СА́ПР», но существует определенный дефицит работ, где рассматриваются практически важные задачи, привязанные в комплексе с решением их с помощью САПР-систем.

## 1. РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ РАМЫ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ В ПК «ЛИРА-САПР». ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАСЧЕТЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В данном разделе будут рассмотрены основные положения по тому, каким образом в ПК «Ли́ра-СА́ПР» реализуются статический и конструктивный расчеты железобетонных конструкций. Информация непосредственно по проектированию неразрезного ригеля будет изложена во втором и третьем разделах. Но так как в первом разделе для иллюстрации теоретических положений будет приведен ряд численных примеров, то для удобства и лучшего понимания материала приведем основные исходные данные по рассматриваемому примеру расчета.

### 1.1. Задание на расчетно-графическую работу

#### 1.1.1. Исходные данные

Расчетно-графическая работа «Расчет неразрезного ригеля с применением ПК «Ли́ра-СА́ПР» выполняется по исходным данным курсового проекта 1 по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции». Ниже на рис. 1.1 приведена расчетная схема типового этажа для двух конструктивных схем (полный и неполный каркасы).

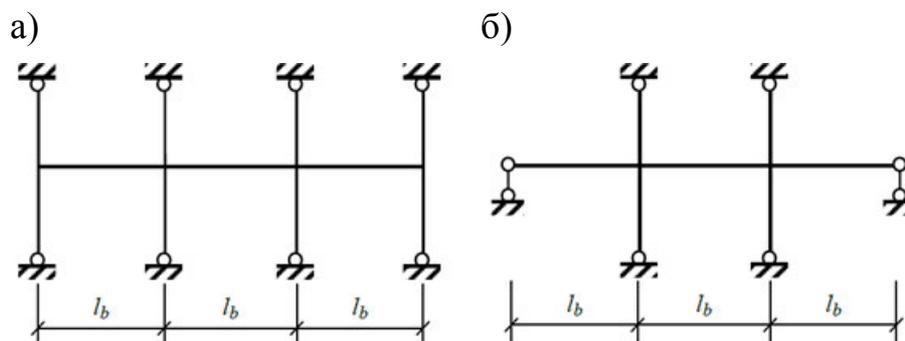


Рис. 1.1. Расчетная схема рамы с полным (а) и неполным (б) каркасами

Исходные данные для примера расчета возьмем из учебного пособия [7] (разд. 2): пролет рамы (длина ригеля)  $L_b = 7$  м; высота этажа (длина ко-

лонны)  $H_{\text{эт}} = 4,2$  м; сечение колонны  $h_c = b_c = 0,4$  м; сечение ригеля  $b_b = 0,25$  м,  $h_b = 0,6$  м; класс бетона ригеля и колонны В20; класс рабочей продольной арматуры ригеля А400; расстояние от грани ригеля до центра тяжести нижней арматуры 6 см, верхней арматуры – 4 см (ригель армируется плоскими каркасами с однорядным расположением верхней арматуры и двухрядным расположением нижней арматуры).

На раму действует постоянная равномерно распределенная нагрузка  $g = 28,39$  кН/м, приложенная во всех трех пролетах (рис. 1.2, а).

Равномерно распределенная временная нагрузка  $v = 35,34$  кН/м может действовать по трем различным схемам (рис. 1.2, б – г).

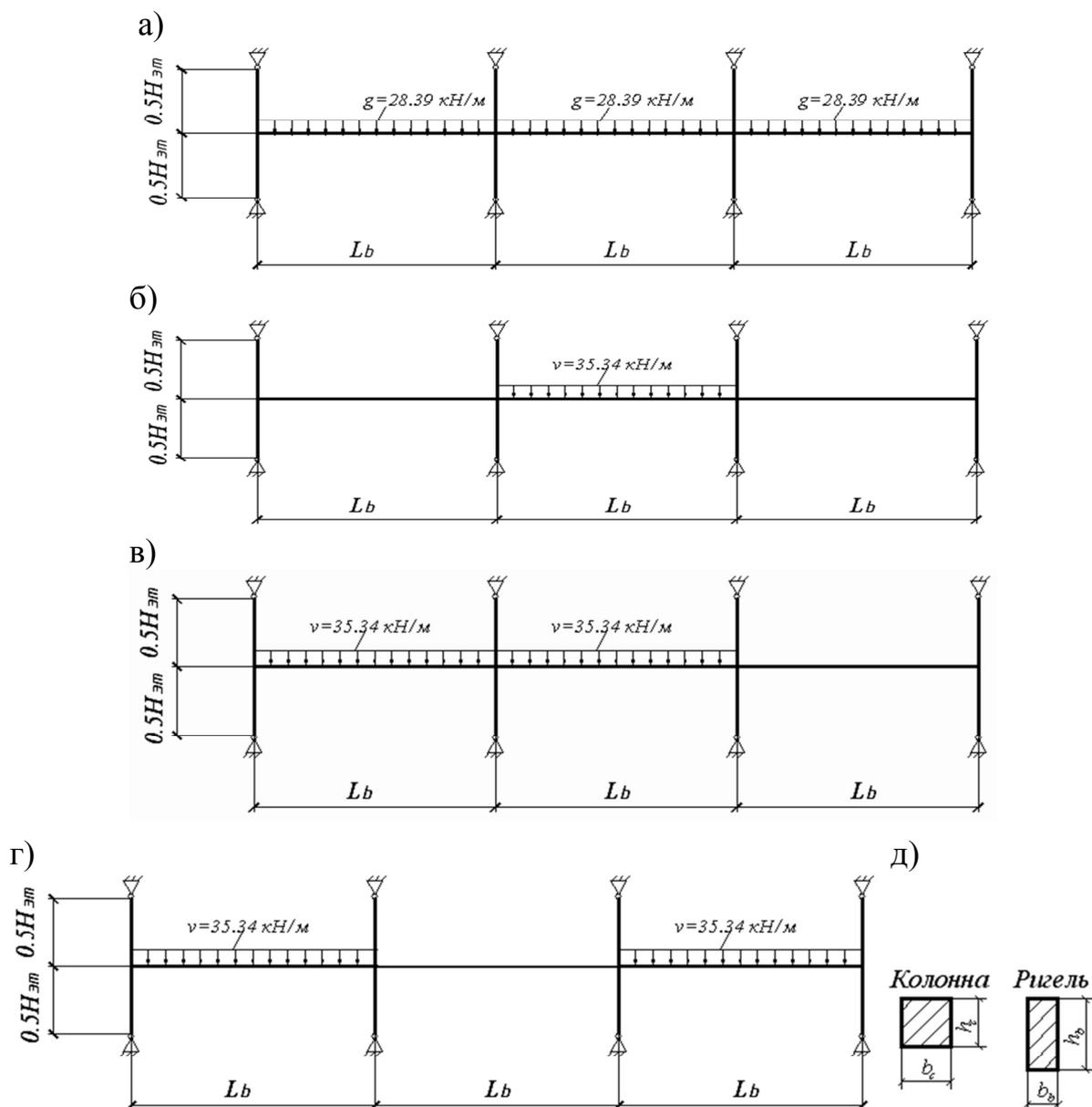


Рис. 1.2. Схемы рамы: а – первый вариант загрузки; б – второй вариант загрузки; в – третий вариант загрузки; г – четвертый вариант загрузки; д – сечения элементов

В данном разделе будет рассмотрен не сам расчет неразрезного ригеля в ПК «Лира-САПР», а основные положения этого расчета и принципиальные отличия машинного и ручного вычислений строительных конструкций.

В рамках курсового проекта 1 по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции» студенты выполняют статический расчет ригеля с помощью метода перемещений, а точнее с помощью справочных таблиц, составленных на основе расчетов рамы методом перемещений. Также студенты выполняют «ручной» конструктивный расчет неразрезного ригеля – подбирают продольную арматуру в расчетных сечениях и делают конструирование ригеля. В рамках конструирования студенты решают задачу определения несущей способности сечений ригеля с заданным армированием (арматурой, подобранной по результатам статического расчета).

Выполнение курсового проекта 1 по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции» закладывает хорошую начальную базу знаний, умений и навыков у студентов по проектированию железобетонных конструкций. Тот факт, что курсовой проект по расчету многоэтажного каркасного здания уже несколько десятков лет изучается в большинстве вузов, говорит о его важной роли в подготовке специалистов.

Но, как уже ранее говорилось, современное производство предъявляет более высокие требования к квалификации инженеров-проектировщиков. И это особенно касается железобетона с учетом повсеместного внедрения монолитного домостроения. Поэтому сегодня недостаточно владеть навыками «ручного» счета конструкций и просто знать алгоритмы выполнения расчетов с применением САПР-систем.

Для студентов-бакалавров такой базовой подготовки возможно и достаточно для расчета стандартных конструкций – фермы, балки, рамы. Но таких знаний однозначно недостаточно для студентов, обучающихся по программе «Строительство уникальных зданий и сооружений» (СУЗС). Выпускник СУЗС должен уметь рассчитывать нестандартные сложные конструкции, хорошо знать теорию расчета строительных конструкций, а главное применять САПР-системы с пониманием, как «работают» эти системы. Здесь главный вопрос не «Как выполнить расчет?», а «Почему алгоритм расчета именно такой?».

Материал, представленный в пособии, не дублирует широко известную информацию по функционалу ПК «Лира-САПР». Главная цель автора – помочь студенту понять, как «работает» ПК «Лира-САПР», почему именно таким образом задаются исходные данные, как это все коррелируется с теорией железобетона. И главное, материал пособия ставит своей целью донести до студента простую, но очень важную истину: что гораздо более важен не сам расчет, а последующий анализ результатов расчета с обязательным контролем вычислений.

Сейчас для большого класса зданий и сооружений стало обязательным требование «параллельных» независимых расчетов, проводимых разными организациями. В рассматриваемых примерах используется тот же принцип контроля результатов, сравниваются результаты статического расчета по справочным таблицам и с помощью ПК «Лира-САПР», конструктивного расчета с помощью программы MathCAD и ПК «Лира-САПР».

Но сходимость результатов «параллельных» расчетов еще не является критерием истины. Надо знать еще одну важную истину. Если математическая модель (расчетная схема), идеализирующая реальный объект, изначально выбрана неправильно (неверно отображает основные свойства объекта), то и полученные результаты будут неверными. Поэтому в учебный план специальности СУЗС введена дисциплина «Анализ расчетных схем», главной задачей которой и является получение студентами знаний по правильному моделированию реальных объектов.

### ***1.1.2. Состав и цель выполнения расчетно-графической работы***

В рамках выполнения расчетно-графической работы (РГР) «Расчет неразрезного ригеля с применением ПК «Лира-САПР» студенты должны решить следующие задачи:

- 1) статический расчет рамы (определение внутренних усилий в элементах рамы от отдельных усилий) с применением ПК «Лира-САПР»;
- 2) определение расчетных сочетаний усилий (с помощью таблиц расчетных сочетаний усилий (PCY) и расчетных сочетаний нагрузок (PCN)) с применением ПК «Лира-САПР»;
- 3) анализ результатов статического расчета рамы (сравнение с результатами расчетов методом перемещений [7]);
- 4) конструктивный расчет неразрезного ригеля (подбор сечения продольной рабочей арматуры) с применением ПК «Лира-САПР»;
- 5) конструктивный расчет неразрезного ригеля (подбор сечения продольной рабочей арматуры) с применением программы MathCAD;
- 6) анализ результатов подбора арматуры (сравнение с результатами расчетов в ПК «Лира-САПР», программе MathCAD, а также [7]);
- 7) конструктивный расчет неразрезного ригеля (проверка несущей способности принятого армирования ригеля) с применением ПК «Лира-САПР»;
- 8) конструктивный расчет неразрезного ригеля (проверка несущей способности принятого армирования ригеля) с применением программы MathCAD;
- 9) анализ результатов проверки несущей способности арматуры (сравнение с результатами расчетов в ПК «Лира-САПР», программе MathCAD, а также [7]).

Результаты расчетов в ПК «Лира-САПР» должны быть перенесены в программу MathCAD.

Главная цель расчета неразрезного ригеля – обеспечить заданные условия эксплуатации и необходимую прочность при минимальном расходе материалов.

Для этого необходимо решить две *основные задачи*:

1) выполнить статический расчет – определить внутренние усилия, возникающие в конструкции от действия внешних нагрузок;

2) выполнить конструктивный расчет – подобрать (или проверить) такие параметры конструкции, чтобы она соответствовала двум группам предельных состояний: а) по несущей способности; б) пригодности к эксплуатации.

Задачи статического и конструктивного расчетов могут быть решены с применением или аналитических методов, или численных. Хотя сейчас в практике проектирования еще нередко применяются аналитические решения (в основном для простых расчетных схем), но все-таки стандартом расчетов все больше становятся численные методы. При всем многообразии численных методов подавляющая часть расчетных САПР-систем использует метод конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений.

## **1.2. Статический расчет строительных конструкций**

### ***1.2.1. Статический расчет строительных конструкций аналитическими методами***

Расчетные схемы конструкций можно разделить на две группы:

- 1) статически определимые;
- 2) статически неопределимые.

Внутренние усилия в статически определимых конструкциях могут быть найдены аналитически только с использованием уравнений равновесия (зависимостей между внешними и внутренними усилиями).

Задача расчета статически неопределимых систем более сложная, так как одних уравнений статики недостаточно и приходится дополнительно привлекать соотношения между перемещениями (деформациями).

Самым наглядным примером статически определимой конструкции является однопролетная шарнирно опертая балка (рис. 1.3).

Реакции в такой балке легко определяются с помощью уравнений статического равновесия, а затем методом сечений находятся внутренние усилия, действующие в балке (изгибающие моменты и поперечные силы).

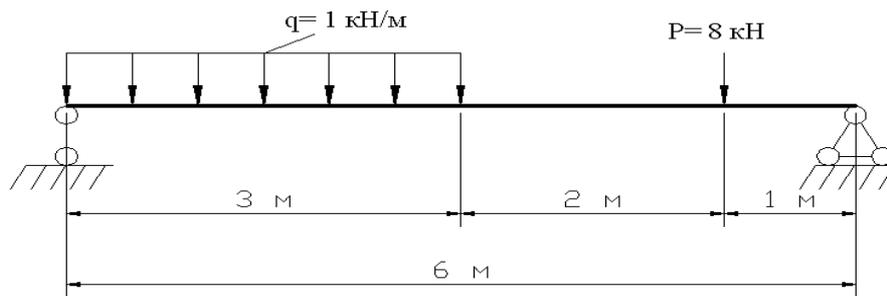


Рис. 1.3. Расчетная схема балки

Расчетная схема типового этажа поперечной рамы (см. рис. 1.1) является статически неопределимой системой. Поэтому аналитически такая система может быть рассчитана или методом сил, или методом перемещений (такие задачи студенты решают в рамках дисциплины «Строительная механика»).

### ***1.2.2. Основные сведения о статическом расчете строительных конструкций в ПК «Лира-САПР»***

Современные расчетные САПР-системы позволяют выполнять полный технологический цикл расчетов строительных конструкций. Лет двадцать назад с помощью расчетных комплексов выполнялся только статический расчет – определялись усилия в элементах, а задачи прочностного расчета решались отдельно. Сейчас пользователь может сразу задать исходные данные, необходимые как для выполнения статического расчета, так и конструктивного.

Стандартный алгоритм статического расчета конструкций в ПК «Лира-САПР» следующий:

1. Выбор признака схемы (типа расчетной схемы в зависимости от числа степеней свободы в узлах КЭ).
2. Создание геометрической схемы.
3. Задание граничных условий (исключение степеней свободы в отдельных узлах).
4. Задание шарниров (при необходимости).
5. Задание и присваивание жесткостей отдельным КЭ.
6. Задание отдельных нагрузений.
7. Задание таблицы РСУ или таблицы РСН.
8. Статический расчет.
9. Анализ полученных результатов.

В файлах документации, которые устанавливаются параллельно с установкой ПК «Лира-САПР», имеется большой ряд примеров расчетов с пошаговыми алгоритмами. Поэтому сама процедура выполнения статиче-

ского расчета даже у рядового пользователя не должна вызывать особых вопросов. Как и при «ручном» счете, «вычерчивается» геометрическая схема конструкции, задаются опоры, нагрузки, жесткости. Далее программа сама вычисляет параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции (усилия, перемещения, напряжения).

Но есть одно принципиальное отличие аналитического статического расчета от статического расчета с применением САПР-систем.

Для аналитического определения внутренних усилий в статически определимых системах задание жесткостей отдельных элементов не обязательно, так как при расчете используются только уравнения равновесия.

Для аналитического определения внутренних усилий в статически неопределимых системах задание жесткостей отдельных элементов обязательно, так как от соотношения жесткостей отдельных элементов зависит распределение усилий между ними.

Можно привести пример такого влияния жесткостей. Некоторым студентам при выполнении курсового проекта 1 приходилось после первоначального статического расчета ригеля менять высоту сечения ригеля для обеспечения пластического характера разрушения. А дальше, поменяв высоту сечения, многие сразу приступали к конструктивному расчету ригеля, тем самым совершая ошибку. Ведь изгибная жесткость ригеля увеличилась, и необходимо было повторить статический расчет уже с новым сечением ригеля. И только по новым полученным усилиям выполнять подбор армирования. Ниже на рис. 1.4 показаны эпюры изгибающих моментов в элементах рамы с высотами сечения ригеля, равными 60 и 70 см.

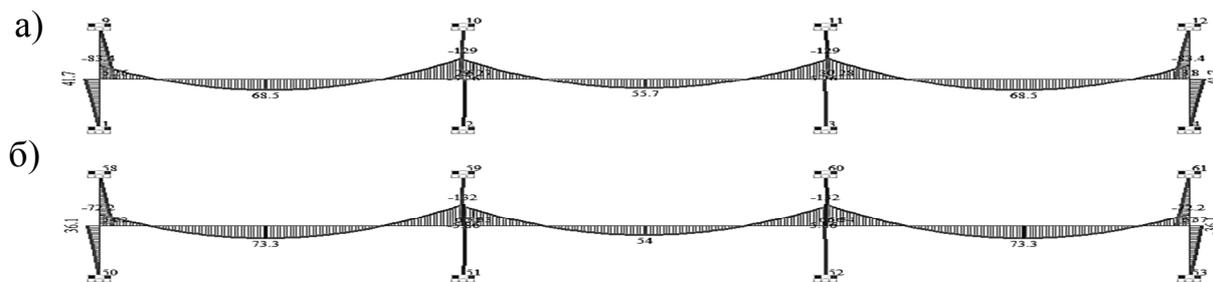


Рис. 1.4. Эпюры изгибающих моментов в элементах рамы:  
а – сечение ригеля 25×60 см; б – сечение ригеля 25×70 см

Как видно из рис. 1.4, значения моментов поменялись при изменении высоты сечения ригеля.

Но даже когда при аналитическом расчете задаются жесткости, то они задаются условно. То есть задаются не форма и размеры поперечного сечения элемента, а условные изгибная жесткость  $EJ$  или продольная жесткость  $EA$ . Жесткости задаются условно, так как распределение усилий

в элементах зависит не от абсолютных значений жесткостей, а от их соотношений.

Жесткости элементов в ПК «Лира-САПР» задаются с помощью диалогового окна «Жесткости и материалы» (рис. 1.5).

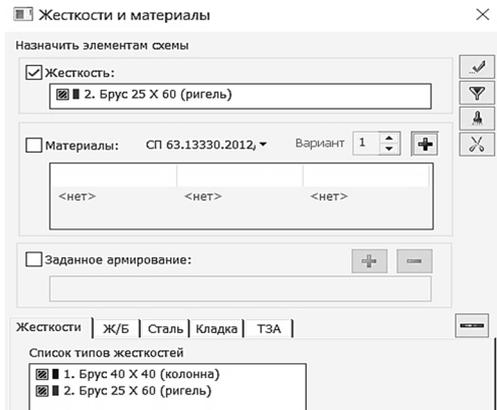


Рис. 1.5. Диалоговое окно «Жесткости и материалы»

Жесткости (сечения) элементов в ПК «Лира-САПР» могут быть следующих типов:

- стандартные;
- металлические;
- сталежелезобетонные;
- пластинчатые;
- объемные;
- численные.

Ниже на рис. 1.6 показаны четыре вкладки с различными типами сечений (пластинчатые, объемные и численные расположены на одной вкладке).

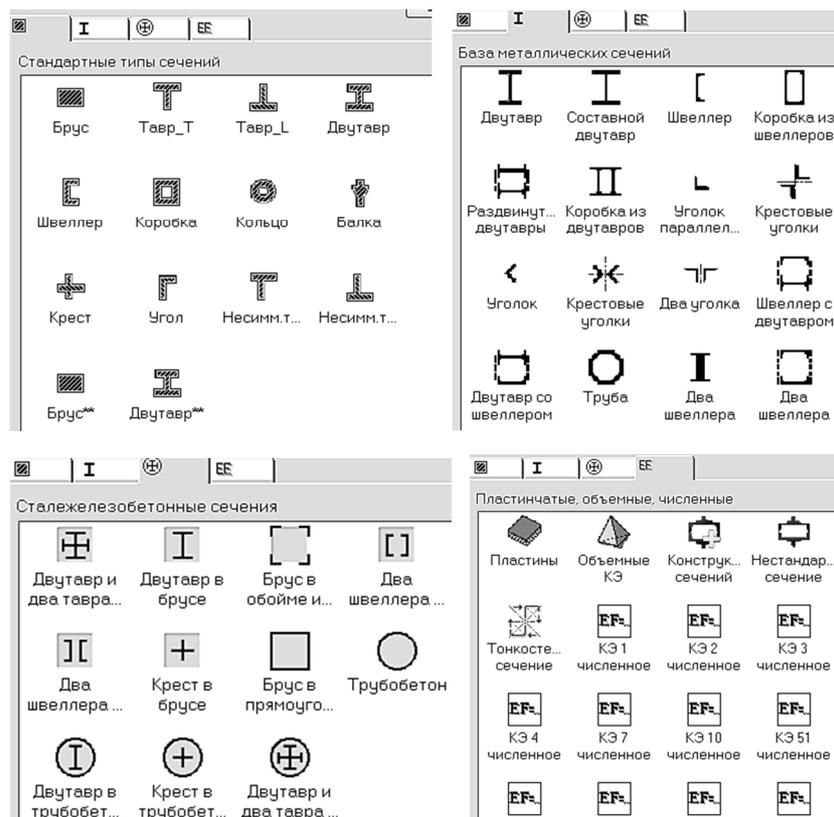


Рис. 1.6. Вкладки с различными типами сечений

Сечения стержневых железобетонных элементов задаются с помощью вкладки «Стандартные». Самые характерные сечения железобетонных элементов – это первые четыре: «брус», «тавр с верхней полкой», «тавр с нижней полкой», «двутавр».

Для стандартных сечений пользователь выбирает форму сечения и задает его размеры, а программа автоматически выполняет расчет основных геометрических характеристик сечения.

Ниже на рис. 1.7 показаны две вкладки диалогового окна «Задание стандартного сечения». На первой вкладке «Сечения» показаны параметры, заданные пользователем, – размеры сечения ригеля и модуль упругости бетона. Удельный вес бетона («Поле  $R_0$ ») не задается, так как нагрузка от ригеля в нашем примере собирается вручную. На второй вкладке показаны геометрические характеристики сечения, вычисленные программой по размерам сечения. Эта вкладка появилась, начиная с версии ПК «Лира-САПР 2019». Для изгибаемого в одной плоскости элемента в расчетах обычно используется только изгибная жесткость  $EJ_y$ . Если соотношение длины элемента к высоте его сечения меньше четырех, то в этом случае необходим учет сдвиговых деформаций и в расчете участвует и сдвиговая жесткость сечения  $GF_y$ .

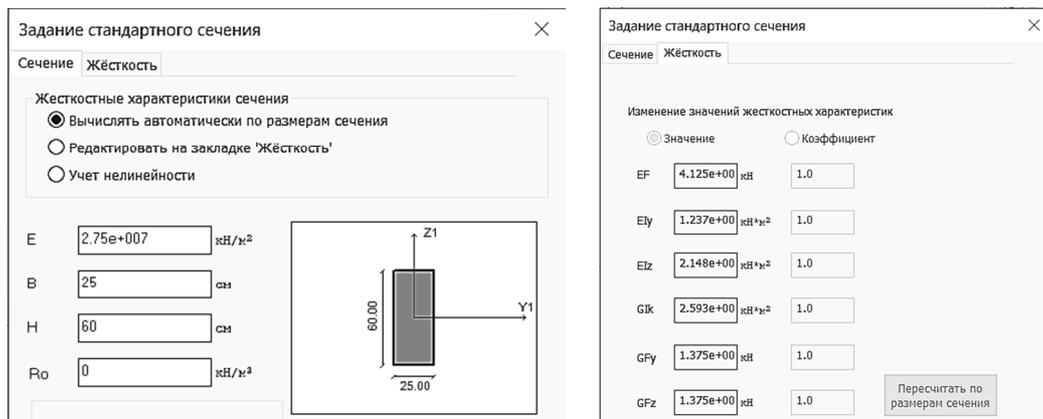


Рис. 1.7. Вкладки диалогового окна «Задание стандартного сечения»

При задании жесткостей в ПК «Лира-САПР» необходимо знать одну важную истину – при расчете конструкций МКЭ важны не только отношения жесткостей, но и их абсолютные значения. Если пользователь сделает ошибку в назначении размеров сечения, например вместо сечения 25×60 см задаст 25×60 м, то он получит неверное решение.

Сечения железобетонных плит задаются с помощью вкладки «пластинчатые, объемные и численные». Ниже на рис. 1.8 показано задание сечения железобетонной плиты толщиной 20 см, коэффициент Пуассона равен 0,2, удельный вес 25 кН/м<sup>3</sup>.

Жесткостные характеристики

Вычислять автоматически по размерам

Коэффициент жесткости

Учет нелинейности

Учет ортотропии

E 2.75e+007 кН/м<sup>2</sup> E2 0

V 0.2 V21 0

G 0

H 20 см Ro 25 кН/м<sup>3</sup>

Рис. 1.8. Задание сечения железобетонной плиты

Численное описание для КЭ 10

EF 0 кН

Ely 123700 кН\*м<sup>2</sup>

Elz 0 кН\*м<sup>2</sup>

Glx 0 кН\*м<sup>2</sup>

Рис. 1.9. Альтернативный вариант задания жесткостных характеристик с помощью численной жесткости КЭ 10

Задавать жесткостные характеристики сечений численно позволяет ПК «Лира-САПР». На рис. 1.9 показан альтернативный вариант задания жесткостных характеристик ригеля с помощью численной жесткости КЭ 10.

Результаты статического расчета ригеля с использованием разных вариантов задания жесткостей будут абсолютно идентичными. Но при численном задании жесткостей невозможен дальнейший конструктивный расчет, так как для него обязательна форма сечения. Численное задание жесткостей обычно применяется на практике, когда мы имеем нестандартное сечение, которое сложно напрямую задать в ПК «Лира-САПР», или для простых статических расчетов, когда проще численно задать жесткость, чем реальное сечение элемента.

Еще одно принципиальное отличие ручного статического расчета от расчета в САПР-системах заключается в методике определения расчетных усилий, по которым в дальнейшем должен выполняться конструктивный расчет элементов. На «руках» очень сложно, а зачастую просто невозможно подобрать наиболее опасные сочетания усилий. Особенно в тех случаях, когда на конструкцию действует много разнотипных нагрузок. Для определения наиболее опасных усилий в ПК «Лира-САПР» составляются таблицы РСУ или таблицы РСН. Об основных принципах составления таблиц РСУ (РСН) будет рассказано ниже (п. 2.1.11 – 2.1.12).

### 1.3. Конструктивный расчет строительных конструкций

#### 1.3.1. Метод расчета по предельным состояниям

Алгоритмы конструктивного расчета железобетонных конструкций как «ручного», так и автоматизированного реализуют требования метода расчета по предельным состояниям, поэтому вкратце приведем основные теоретические положения этого метода.

За всю историю строительства в России для расчета строительных конструкций применялись три метода.

**Метод расчета по допускаемым напряжениям** применялся в нашей стране до 1938 г. Однако на основании многочисленных опытов было установлено, что этот метод, не учитывающий пластические свойства железобетона, обладал рядом серьезных недостатков: не позволял определять действительные напряжения, находить разрушающую нагрузку и т.д. Таким образом, практика заставила исследователей искать теоретические основы, отражающие действительную работу железобетонных элементов.

**Метод расчета по разрушающим нагрузкам.** В результате обширных исследований, проведенных советскими учеными, в начале 30-х гг. был разработан метод, учитывающий упругопластические свойства железобетона, который был включен в нормы проектирования железобетонных конструкций в 1938 г. В основу метода расчета сечений по разрушающим нагрузкам была положена работа конструкции в III стадии НДС. При этом предполагалось, что напряжения в бетоне и арматуре достигают предельных значений.

Однако общим важным недостатком обоих методов являлось использование единого коэффициента запаса, лишь приближенно учитывающего многообразие факторов, влияющих на работу конструкции.

До определенного периода практика и не ставила перед исследователями такой задачи. Это объясняется тем, что применялись сталь и бетон относительно низкой прочности, конструкции имели развитые сечения, прогибы и трещины в бетоне от эксплуатационных нагрузок были невелики и не препятствовали нормальной работе конструкций. С появлением бетона и арматуры более высокой прочности сечения уменьшались, снижалась и их жесткость, в результате чего прогибы конструкций от фактических нагрузок оказывались значительными, создавая в ряде случаев препятствия нормальной эксплуатации. Кроме того, более существенную роль стал играть фактор раскрытия трещин, вызывающий коррозию стали, к которой высокопрочная арматура особенно чувствительна. Последние два обстоятельства наряду с отмеченными выше недостатками существовавших методов потребовали дальнейшего совершенствования методики расчета железобетонных конструкций.

С 1955 г. расчет железобетонных конструкций производится по **методу предельных состояний**.

При расчете по этому методу четко устанавливаются предельные состояния конструкций и используют систему расчетных коэффициентов, введение которых гарантирует, что такое состояние не наступит при самых неблагоприятных сочетаниях нагрузок и при наименьших значениях прочностных характеристик материалов.

Безопасность работы конструкции под нагрузкой оценивается не одним синтезирующим коэффициентом запаса, а системой расчетных коэффициентов. Конструкции, запроектированные и рассчитанные по методу предельного состояния, получаются несколько экономичнее.

Одна из основных задач студента (проектировщика), выполняющего расчеты железобетонных конструкций с применением ПК «Лира-САПР», – это правильно задать все расчетные коэффициенты. При этом надо понимать, что значения расчетных коэффициентов берутся не из требований (данных) программы, а согласно нормативным документам. Хотя в ПК «Лира-САПР» есть много подсказок для назначения коэффициентов, но главным документом, согласно которому должны приниматься коэффициенты, является СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [1]. Также важным нормативным документом, по которому принимаются коэффициенты для нагрузок и их сочетаний, является СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [2].

### ***1.3.2. Коэффициенты метода предельных состояний***

При расчете конструкцию рассматривают в предельном состоянии. Все факторы, определяющие работу конструкции (нагрузки, свойства материалов, условия работы и т.д.), учитывают отдельно. Для этого вводят систему дифференцированных коэффициентов надежности: по нагрузке; материалу; степени ответственности. Отдельно учитывают вероятность совместного действия нескольких временных нагрузок (коэффициентом сочетаний  $\psi$ ) и особенности работы конструкций (коэффициентом условий работы).

***Коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$***  [2] учитывает возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную сторону от их нормативных значений как в силу естественной изменчивости нагрузок, так и отступлений от условий нормальной эксплуатации

$$g = g_n \cdot \gamma_f$$

***Коэффициент сочетаний  $\psi$***  [2] учитывает уменьшения вероятности одновременного достижения несколькими нагрузками их расчетных значений. В зависимости от учитываемого состава нагрузок следует различать:

- основные сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных и кратковременных;
- особые сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных, кратковременных и одной из особых нагрузок.

***Коэффициент надежности по ответственности сооружений  $\gamma_n$***  [3] учитывает степень ответственности сооружения и обеспечивает задан-

ный уровень надежности. На этот коэффициент умножается величина действующих нагрузок.

Здания и сооружения по степени ответственности, которая определяется размером материального и социального ущербов при отказе, делят на три класса (уровня).

Класс I. Основные здания и сооружения объектов, имеющих особо важное народнохозяйственное и (или) социальное назначение: главные корпуса ТЭС, АЭС, центральные узлы доменных печей, дымовые трубы высотой более 200 м, телевизионные башни, резервуары для нефти и нефтепродуктов вместимостью свыше 10 тыс. м<sup>3</sup>, крытые спортивные сооружения с трибунами, здания театров, кинотеатров, цирков, крытых рынков, учебных заведений, детских дошкольных учреждений, больниц, родильных домов, музеев, государственных архивов и т.п.  $\gamma_n = 1,1$ .

Класс II. Здания и сооружения объектов, имеющих ограниченное народнохозяйственное и (или) социальное значение (объекты промышленного, сельскохозяйственного, жилищно-гражданского назначения и связи, не вошедшие в I и III классы).  $\gamma_n = 1$ .

Класс III. Здания и сооружения объектов, имеющих ограниченное народнохозяйственное и (или) социальное значение: склады без процессов сортировки и упаковки для хранения сельскохозяйственных продуктов, удобрений, химикатов, угля, торфа и другое, теплицы, парники, одноэтажные жилые дома, опоры проводной связи, опоры освещения населенных пунктов, временные здания и сооружения, ограды и т.п.  $\gamma_n = 0,9$ .

**Коэффициенты условий работы  $\gamma_{bi}$ ,  $\gamma_{si}$**  [1] позволяют оценить некоторые особенности материалов и конструкций в целом, которые не могут быть отражены в расчетах прямым путем.

В необходимых случаях расчетные значения прочностных характеристик бетона умножают на следующие **коэффициенты условий работы  $\gamma_{bi}$** , учитывающие особенности работы бетона в конструкции (характер нагрузки, условия окружающей среды и т.д.):

$\gamma_{b1}$  – для бетонных и железобетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивлений  $R_b$ ,  $R_{bt}$  и учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки:  $\gamma_{b1} = 1$  при действии всех нагрузок, включая кратковременные нагрузки;  $\gamma_{b1} = 0,9$  (для ячеистых и поризованных бетонов) при действии только постоянных и длительных нагрузок;

$\gamma_{b2}$  – для бетонных конструкций, вводимый к расчетным значениям сопротивления  $R_b$  и учитывающий характер разрушения таких конструкций;  $\gamma_{b2} = 0,9$ ;

$\gamma_{b3}$  – для бетонных и железобетонных конструкций, бетонируемых в вертикальном положении при высоте слоя бетонирования более 1,5 м, вводимый к расчетному значению сопротивления бетона  $R_b$ ;  $\gamma_{b3} = 0,85$ ;

$\gamma_{b4}$  – для ячеистых бетонов, вводимый к расчетному значению сопротивления бетона  $R_b$ :  $\gamma_{b4} = 1$  при влажности ячеистого бетона 10 % и менее;  $\gamma_{b4} = 0,85$  при влажности ячеистого бетона более 25 %; по интерполяции – при влажности ячеистого бетона более 10 % и менее 25 %.

Влияние попеременного замораживания и оттаивания, а также отрицательных температур учитывают коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_{b5} \leq 1$ . Для надземных конструкций, подвергаемых атмосферным воздействиям окружающей среды при расчетной температуре наружного воздуха в холодный период  $-40$  °С и выше, принимают коэффициент  $\gamma_{b5} = 1$ . В остальных случаях значения коэффициента принимают в зависимости от назначения конструкции и условий окружающей среды согласно специальным указаниям.

**Коэффициенты надежности по материалам  $\gamma_{bc}$ ,  $\gamma_{br}$ ,  $\gamma_s$  [1]** учитывают изменчивость их прочностных свойств.

### 1.3.3. Учет коэффициентов метода предельных состояний в ПК «Лира-САПР»

Рассмотрим, каким образом коэффициенты метода предельных состояний учитываются в ПК «Лира-САПР».

**Коэффициент ответственности по назначению  $\gamma_n$**  до версии ПК «Лира-САПР 2020» обычно учитывался пользователями предварительно при «ручном» сборе нагрузок. Хотя для расчета стальных элементов была возможность учета этого коэффициента в «материалах» («дополнительные характеристики») (рис. 1.10).

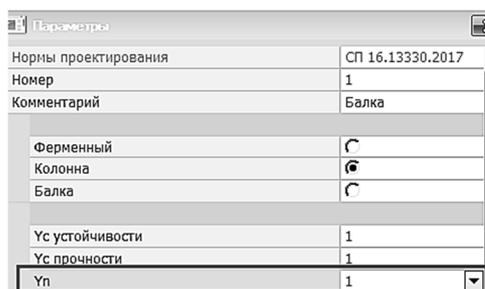


Рис. 1.10. Значение коэффициента  $\gamma_n$

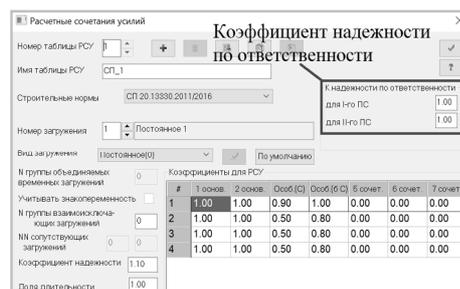


Рис. 1.11. Таблица РСУ

В версии ПК «Лира-САПР 2020» исходные данные таблиц РСУ(РСН) для норм СП 20.13330.2016 расширены коэффициентами надежности по ответственности зданий и сооружений. При этом коэффициент отдельно задается для первой и второй групп предельных состояний (рис. 1.11).

**Коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$**  учитывается в ПК «Ли́ра-САПР» при составлении таблицы РСУ (РСН), задании нагрузок от собственного веса конструкций.

Если при ручном счете мы сначала вычисляем нормативные нагрузки, а потом с помощью коэффициента надежности по нагрузке определяем расчетные, то в ПК «Ли́ра-САПР», в отличие от ручного расчета, сразу задаются расчетные нагрузки. А обратный переход к нормативным нагрузкам (усилиям) осуществляется делением полученных усилий, перемещений и другое на соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке (рис. 1.12).

Скриншот интерфейса программы «Ли́ра-САПР» для задания коэффициентов надежности и сочетаний в таблице РСУ. В центре экрана расположена таблица коэффициентов для РСУ, с выделенными ячейками «Коэффициент надежности» и «Коэффициенты сочетаний». В нижней части экрана видна сводная таблица для вычисления РСУ.

#	1 основ.	2 основ.	Особ. (С)	Особ. (Б С)	5 сочет.	6 сочет.	7 с
1	1.00	1.00	0.90	1.00	0.00	0.00	
2	1.00	1.00	0.50	0.80	0.00	0.00	
3	1.00	1.00	0.50	0.80	0.00	0.00	
4	1.00	1.00	0.50	0.80	0.00	0.00	

N#	Имя загруз...	Вид	Параметры РСУ	Коэффициенты РСУ
1	Постоянн...	Постоянн...	0 0 0 0 0 0 0 1.10 1.00	1.00 1.00 0.90 1.00
2	Временно...	Кратковр...	2 0 0 1 0 0 0 1.20 0.35	1.00 1.00 0.50 0.80
3	Временно...	Кратковр...	2 0 0 1 0 0 0 1.20 0.35	1.00 1.00 0.50 0.80
4	Временно...	Кратковр...	2 0 0 1 0 0 0 1.20 0.35	1.00 1.00 0.50 0.80

Рис. 1.12. Задание коэффициента надежности и коэффициента сочетаний в таблице РСУ

**Коэффициенты сочетаний  $\psi$**  учитываются в ПК «Ли́ра-САПР» при составлении РСУ, РСН.

Терминология для сочетаний нагрузок, используемая ПК «Ли́ра-САПР»:

*Первое основное сочетание (1ОС)* – это сочетание всех постоянных нагрузок и одной временной с коэффициентом сочетаний из первого столбца таблицы сочетаний. По умолчанию этот коэффициент равен 1.

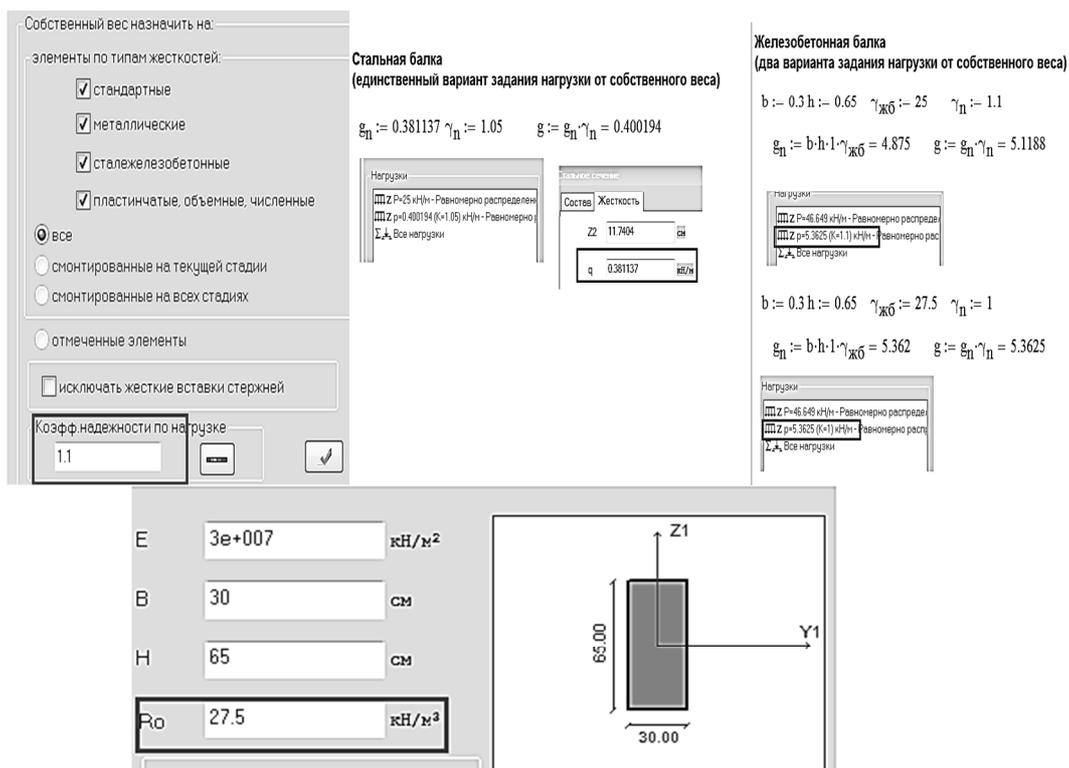
*Второе основное сочетание (2ОС)* – это сочетание всех постоянных нагрузок и нескольких временных с коэффициентом сочетаний из второго столбца сочетаний.

Для СП 20.13330.2018 все коэффициенты приняты по умолчанию равными 1, но фактически они имеют другие значения. Поэтому их «вручную» должен задать пользователь.

*Особое сочетание (C)* – это сочетание с сейсмической нагрузкой, где по любым нормам по умолчанию приняты следующие коэффициенты для статических загрузений: постоянные – 0,9, длительные – 0,8, кратковременные и прочие – 0,5.

*Особое без сейсмики (б C)* – это особое сочетание без сейсмической нагрузки, где по любым нормам по умолчанию приняты коэффициенты для статических загрузений: постоянные – 1, длительные, кратковременные и прочие – 0,8.

**Коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$  для собственного веса** определяется при назначении на элементы. Иногда этот коэффициент учитывают при задании параметров жесткостей, но логичнее его задавать именно при назначении нагрузки на элементы как, например, для стальных элементов. Для стальных элементов однозначно удельный вес задается нормативным из сортамента. Поэтому и для железобетона по аналогии коэффициент надежности предлагается задавать при назначении нагрузок от собственного веса на элементы (рис. 1.13).



Вес железобетона с учетом коэффициента надежности

Рис. 1.13. Задание коэффициента надежности по нагрузке для железобетона

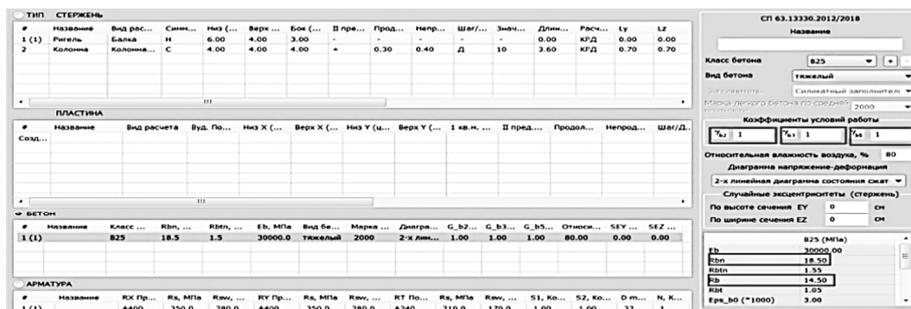


Рис. 1.14. Задание коэффициентов условий работы в таблице «Материалы»

*Коэффициенты условий работы  $\gamma_{bi}$ ,  $\gamma_{si}$*  учитываются в ПК «Лири-САПР» при задании характеристик материалов (рис. 1.14).

### 1.3.4. Аналитический конструктивный расчет железобетонных изгибаемых элементов

Для понимания того, как ПК «Лири-САПР» и другие расчетные комплексы выполняют подбор сечения продольной арматуры изгибаемых железобетонных элементов, рассмотрим вкратце основные теоретические положения расчета таких элементов и алгоритм ручного расчета.

Как известно, для железобетона выделяют три характерных стадии НДС сечений от начала нагружения до разрушения элемента.

Стадия I. При небольшой нагрузке 10...15 % от разрушающей бетон и арматура работают совместно по всей длине балки. Эпюра напряжений двузначная: в сжатой зоне близка к треугольной. Зона неупругих деформаций смещается вниз по отношению к центру тяжести бетонного сечения. Эта стадия положена в основу расчета конструкций по образованию трещин.

Стадия II. Переход сечения в эту стадию происходит после образования трещин, нормальных к продольной оси, в результате чего происходит выключение из работы растянутого бетона. Все растягивающее усилие воспринимает арматура, что вызывает увеличение деформаций растянутой зоны и смещение нейтральной оси вверх.

Эта стадия соответствует эксплуатационному состоянию и принята в основу расчета железобетонных конструкций по деформациям и ширине раскрытия трещин.

Стадия III. С увеличением нагрузки стадия II переходит в стадию разрушения III. С ростом нагрузки увеличиваются напряжения и деформации в растянутой арматуре, а высота сжатой зоны продолжает уменьшаться.

Дальнейшее разрушение железобетона может иметь два варианта, в зависимости от армирования элемента.

*Пластическое разрушение.* С дальнейшим увеличением нагрузки напряжения в стержневой арматуре достигают физического (условного) предела текучести; напряжения в бетоне сжатой зоны под влиянием нарастающего прогиба элемента и сокращения высоты сжатой зоны также достигают значений расчетного сопротивления бетона сжатию. Разрушение железобетонного элемента начинается с арматуры растянутой зоны и заканчивается раздроблением бетона сжатой зоны. Такое разрушение носит пластический характер, его называют случаем 1.

*Хрупкое разрушение.* В элементах с избыточным содержанием растянутой арматуры разрушение происходит по бетону сжатой зоны. Стадия II переходит в стадию III внезапно. Разрушение переармированных сечений всегда носит хрупкий характер при неполном использовании растянутой арматуры, его называют случаем 2.

Ниже на рис. 1.15 показаны распределения напряжений и усилий, возникающих в сечении элемента на разных стадиях работы. Сверху показана реальная форма распределения напряжений по высоте сечения. Ниже приведены более простые эпюры напряжений, принятые в практических расчетах. Для третьей стадии эпюра напряжений в сжатом бетоне принята прямоугольной, а бетон растянутой зоны в расчетах вообще не учитывается.

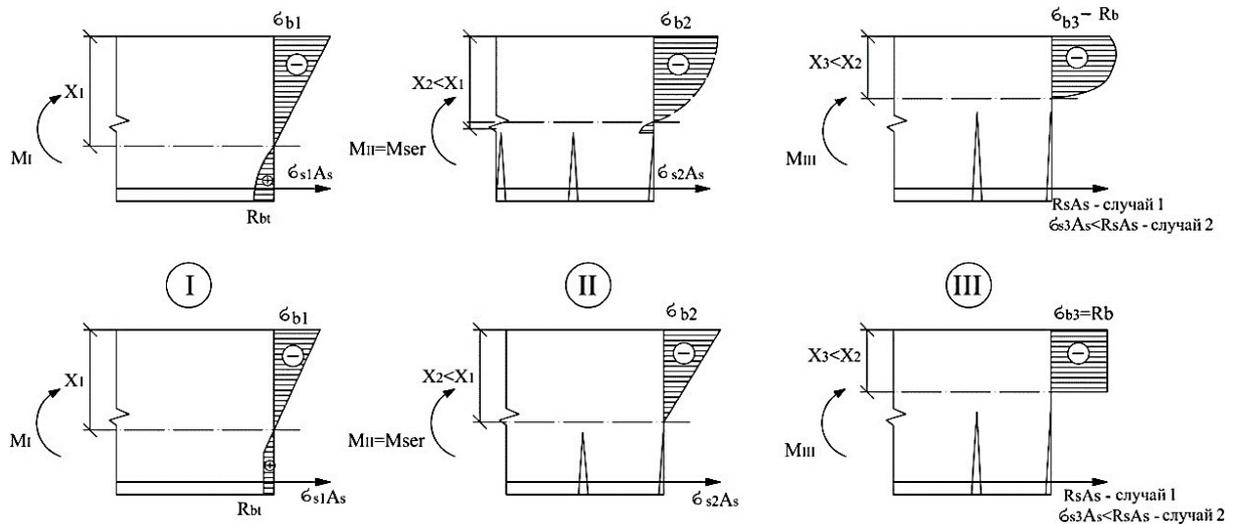
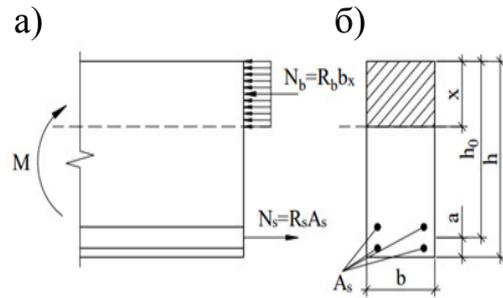


Рис. 1.15. Стадии НДС изгибаемых элементов

Рассмотрим схему усилий в изгибаемом элементе прямоугольного сечения шириной  $b$  и высотой  $h$  с одиночным армированием с площадью арматуры  $A_s$ , центр тяжести которой находится на расстоянии  $a$  от нижней грани (рис. 1.16).

Рис. 1.16. Схема усилий при расчете прочности элемента по нормальному сечению (а) и прямоугольное сечение с одиночной арматурой (б)



В расчетах используется рабочая высота сечения, т.е. расстояние от центра тяжести арматуры до сжатой грани сечения, равное  $h_0 = h - a$ . Высота сжатой зоны бетона обозначается  $x$ .

Рассмотрим условия равновесия внешних и внутренних усилий. Уравнение равновесия всех сил в сечении из условия равенства нулю суммы проекций всех усилий на продольную ось

$$\sum x = 0 : R_s \cdot A_s = R_b \cdot b \cdot x, \quad (1.1)$$

где  $R_s$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению, МПа;  $A_s$  – площадь поперечного сечения арматуры, см<sup>2</sup>;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию, МПа;  $b$  – ширина сечения изгибаемого элемента, см;  $x$  – высота сжатой зоны, см.

Предельный момент внутренних сил относительно центра тяжести растянутой арматуры будет равен

$$\begin{aligned} \sum M &= 0, \\ M - R_b \cdot b \cdot x \cdot \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) &= 0, \\ M &= R_b \cdot b \cdot x \cdot \left( h_0 - \frac{x}{2} \right), \\ x &= \xi \cdot h_0, \\ M &= R_b \cdot b \cdot \xi \cdot h_0 \cdot \left( h_0 - \frac{\xi \cdot h_0}{2} \right), \\ M &= R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \xi \cdot \left( 1 - \frac{\xi}{2} \right), \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $h_0$  – рабочая высота сечения, см;  $\xi$  – относительная высота сжатой зоны бетона, см.

Введем безразмерный параметр

$$\alpha_m = \xi \cdot \left( 1 - \frac{\xi}{2} \right). \quad (1.3)$$

Тогда из (1.2) – (1.3)  $\alpha_m$  равен

$$\alpha_m = \frac{M}{R_b \cdot b \cdot h_0^2}.$$

Решая квадратное уравнение из (1.3), получаем

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m}; x = \xi \cdot h_0.$$

Из первого условия равновесия (1.1) получим формулу для вычисления площади сечения продольной арматуры

$$A_s = \frac{R_b \cdot b \cdot \xi \cdot h_0}{R_s}. \quad (1.4)$$

Уравнение (1.4) будет справедливо, если

$$\xi \leq \xi_R,$$

где  $\xi_R$  – относительная высота сжатой зоны, при которой одновременно достигаются в арматуре предел текучести  $R_s$ , а в сжатом бетоне – предел прочности  $R_b$ .

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}}, \quad (1.5)$$

где  $\varepsilon_{s,el}$  – относительная деформация арматуры растянутой зоны, вызванная внешней нагрузкой при достижении в этой арматуре напряжения, равного  $R_s$ ;  $\varepsilon_{b2} = 0,0035$  – относительная деформация сжатого бетона при напряжениях, равных  $R_b$ .

Одним из главных допущений при расчете изгибаемых железобетонных элементов является замена криволинейной эпюры напряжений в сжатом бетоне прямолинейной эпюрой. При этом в расчет, по сути, вводится условная высота сжатой зоны бетона. В формуле (1.5) коэффициент 0,8 как раз показывает долю этой условной зоны от фактической высоты сжатого бетона.

При расчетах  $R_b$  принимается с соответствующим коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_{bi}$ .

Ниже на рис. 1.17 приведен пример подбора сечения верхней продольной арматуры неразрезного ригеля на крайней

### 1 Исходные данные

Ширина сечения  $b := 25$  см Высота сечения  $h := 60$  см

Материалы: - бетон тяжелый класса В20; арматура класса А400

- призматическая прочность бетона класса В20  $R_b := 11.5$  МПа

- начальный модуль упругости бетона класса В20  $E_b := 2.75 \cdot 10^4$  МПа

- расчетное сопротивление арматуры класса А400  $R_s := 350$  МПа

- модуль упругости арматуры класса А400  $E_s := 2 \cdot 10^5$  МПа

- расчетный максимальный момент  $M := 159.4$  кН·м

- коэффициент, учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки  $\gamma_{b1} := 1$

2 Определяем рабочую высоту сечения, приняв защитный слой  $a := 4$  см

$$h_0 := h - a = 56 \text{ см}$$

3 Определяем коэффициент  $\alpha_m$

$$\alpha_m := \frac{M \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.177$$

4 Вычисляем коэффициент, определяющий характер разрушения железобетонного элемента

$$\epsilon_{b2} := 0.0035 \quad \epsilon_{s\_el} := \frac{R_s}{E_s} = 0.00175$$

$$\xi_R := \frac{0.8}{1 + \frac{\epsilon_{s\_el}}{\epsilon_{b2}}} = 0.533$$

$$\alpha_R := \xi_R \cdot \left(1 - \frac{\xi_R}{2}\right) = 0.391$$

5 Определяем характер разрушения

$$\text{Разрушение} := \begin{cases} \text{"пластическое"} & \text{if } \alpha_m \leq \alpha_R \\ \text{"хрупкое"} & \text{if } \alpha_m > \alpha_R \end{cases}$$

Разрушение = "пластическое"

6 Определяем расчетную площадь рабочей арматуры

$$A_s := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0 \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_m})}{R_s \cdot 100} = 9.016 \text{ см}^2$$

Рис. 1.17. Подбор сечения продольной арматуры в программе MathCAD

### 1.3.5. Конструктивный расчет железобетонных элементов в ПК «Лира-САПР»

Для конструктивного расчета железобетона ПК «Лира-САПР» использует нелинейную деформационную модель (НДМ) как для линейного расчета, так и для расчета физически нелинейных задач.

В отличие от аналитического расчета НДМ использует фактическую криволинейную эпюру напряжений в сжатом бетоне. Замена криволинейной эпюры напряжений прямоугольной в аналитическом расчете позволяет легко находить суммарное усилие в сжатой зоне бетона. При использовании же НДМ для нахождения сжимающих усилий в бетоне для большинства типов задач приходится дробить сечение элемента на отдельные полосы (признак расчетной схемы – 2, 3) или прямоугольники (признак расчетной схемы – 4, 5, 6).

И только для задач с первым признаком расчетной схемы (центрально-растянутые и центрально-сжатые элементы) сечение дробить не надо, так как напряжения постоянны по всей площади сечения.

На рис. 1.18 показаны способы дробления сечения в зависимости от признака расчетной схемы.

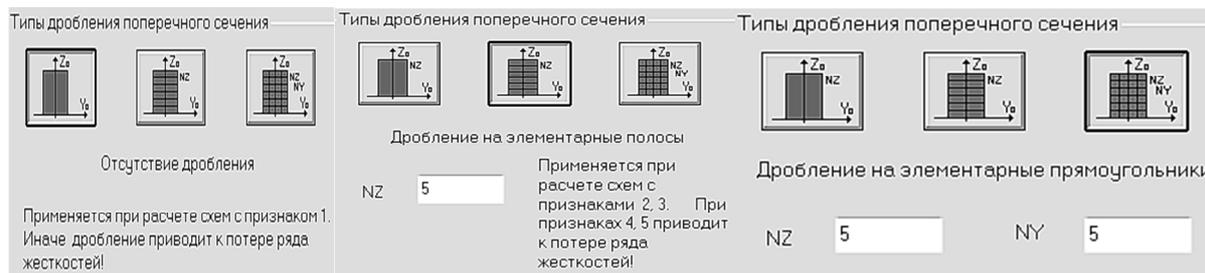


Рис. 1.18. Способы дробления сечения

Суммарное усилие в сжатом бетоне находится путем численного интегрирования – суммирования элементарных напряжений, действующих по элементарным площадкам, выделенных в расчетном сечении.

Для наглядного представления о нелинейном характере работы железобетона приведем ниже результаты нелинейного расчета рамы типового этажа (рис. 1.19).

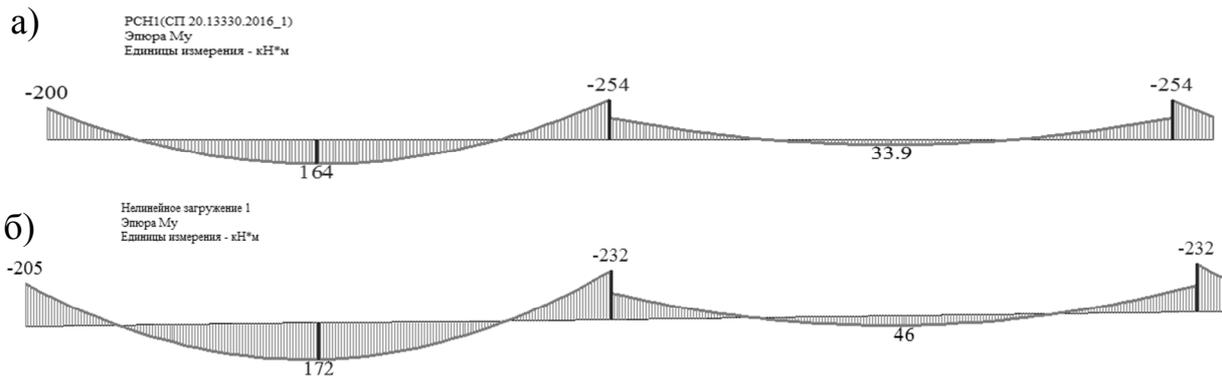


Рис. 1.19. Эпюры изгибающих моментов в ригеле от сочетания нагрузок 1 + 2: а – линейный расчет; б – нелинейный расчет

При учете нелинейной работы материала произошло перераспределение усилий. Опорные моменты уменьшились, а пролетные увеличились. Приведем ниже характер распределения напряжений по высоте сечения для различных участков ригеля (рис. 1.20).

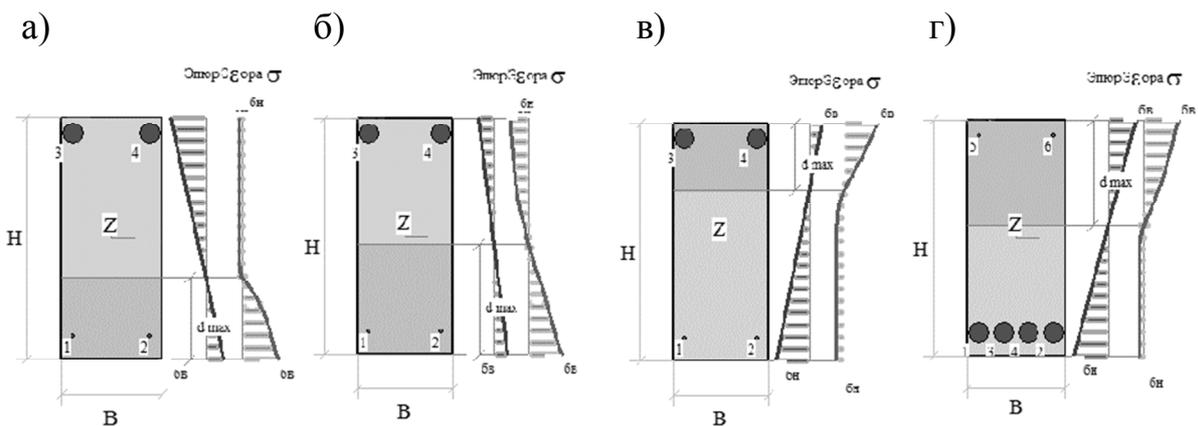


Рис. 1.20. Распределение напряжений по высоте сечения: а – сечение  $x = 0$ ; б – сечение  $x = L / 8$ ; в – сечение  $x = L / 4$ ; г – сечение  $x = L / 2$

Как мы видим, распределение напряжений по высоте сечения имеет нелинейный характер. На левой опоре максимальные сжимающие напряжения возникают в нижней зоне. В следующем сечении ( $x = L / 8$ ) эпюра сжатого бетона имеет уже треугольный характер за счет понижения расчетного изгибающего момента. Далее меняются знаки отдельных участков эпюр: сжата уже верхняя зона, но эпюра имеет треугольный вид. А в центре пролета, где возникает максимальный изгибающий момент, растягивающий нижние волокна, эпюра напряжений в сжатом бетоне нелинейная.

Вышеприведенные результаты нелинейного расчета в ПК «Лира-САПР» определяют фактическое НДС в каждом расчетном сечении. При этом, как видим, сечения работают на разных стадиях НДС.

При линейном расчете основная задача другая. Для сечений, в которых возникают основные расчетные усилия, необходимо найти сечение продольной рабочей арматуры в предположении наступления в нем III стадии НДС. Первоначально решается задача подбора сечения с одиночным армированием и рассматривается только пластический вариант разрушения железобетона. При этом максимальное напряжение в сжатом бетоне и напряжение в растянутой арматуре равны расчетным сопротивлениям материалов. Если же в результате расчета получается хрупкий вариант разрушения (напряжение в растянутой зоне не достигает предела текучести), то ПК «Лира-САПР» выполняет расчет сечения с двойным армированием.

### 1.3.6. Одиночное и двойное армирования

Железобетонные изгибаемые элементы должны быть заармированы таким образом, чтобы их вероятное разрушение носило пластический характер. Главный недостаток элементов с избыточным содержанием растянутой арматуры в том, что несущая способность арматуры используется не полностью.

В практике проектирования изгибаемых железобетонных элементов принято обычно выполнять расчет таких элементов, как элементы с одиночным армированием, когда рабочая арматура располагается только в растянутой зоне. Хотя на самом деле большинство изгибаемых элементов имеют арматуру и в сжатой зоне, обычно такие элементы армируются каркасами, а не отдельными стержнями (рис. 1.21).

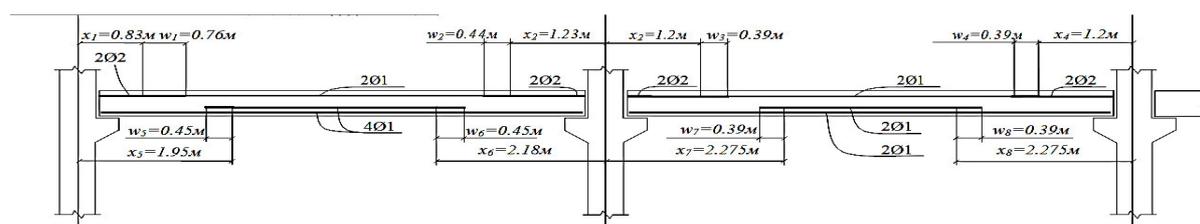


Рис. 1.21. Армирование неразрезного ригеля

Как мы видим из рис. 1.21, помимо рабочей арматуры, расположенной в верхних зонах на приопорных участках и нижней арматуре в пролете, ригель в рассматриваемом примере также конструктивно армируется в верхней пролетной части (2Ø12 А400) и нижних приопорных участках (2Ø18 А400).

В данном случае сжатая арматура создает определенный запас прочности, так ее работа уменьшает высоту сжатой зоны и, как следствие, увеличивает плечо пары внутренних сил – суммарного усилия  $N_b$  в сжатом бетоне и усилия в растянутой арматуре  $N_s$ .

Сам факт того, что многие студенты (и даже некоторые проектировщики) не знают о работе арматуры в сжатой зоне, сам по себе не страшен. Плохо то, что студентов учат выполнять «ручной» расчет изгибаемых железобетонных элементов с одиночным армированием и, как следствие, при применении САПР-систем, многие по аналогии в результатах конструктивного расчета смотрят только на арматуру в растянутой зоне. Но может оказаться так, что при машинном расчете программа подберет арматуру и в сжатой зоне, если одиночное армирование дает хрупкий вариант разрушения железобетона. И тогда сечение арматуры в сжатой зоне принимается по расчету, а не конструктивно.

Рассмотрим пример расчета сечения ригеля из подразд. 2.7 пособия [7]. В результате статического расчета максимальный расчетный момент, возникающий в ригеле, получился равным  $M_{23} = 207,7$  кН·м.

В данном случае принятая ранее по конструктивным требованиям рабочая высота сечения  $h_0$  оказалась достаточной для того, чтобы разрушение элемента носило пластический характер. Для данного примера дальнейший «ручной» подбор сечения растянутой арматуры и такой же расчет в ПК «Лири-САПР» будут идентичными. А что будет, если рабочая высота сечения окажется недостаточной для пластического разрушения?

В случае «ручного» счета обычно увеличивают или высоту ригеля, или класс бетона. Но программа не может поменять эти исходные данные!!! ПК «Лири-САПР» в этом случае просто поставит в сжатую зону бетона рабочую сжатую арматуру!!!

Ниже на рис. 1.22 показаны результаты расчета сечения размером 25×60 см (бетон класса В20, арматура А400) на действие изгибающего момента 400 кН·м. В этом случае для одиночного армирования мы получаем хрупкий вариант разрушения. Поэтому необходимо менять или размеры сечения, или класс бетона, или усиливать сжатую зону бетона арматурой, сечение которой определяется расчетом.

1 Исходные данные

Ширина сечения  $b := 25$  см Высота сечения  $h := 60$  см

Материалы: - бетон тяжелый класса В20; арматура класса А400

- призмная прочность бетона класса В20  $R_b := 11.5$  МПа

- начальный модуль упругости бетона класса В20  $E_b := 2.75 \cdot 10^4$  МПа

- расчетное сопротивление арматуры класса А400  $R_s := 350$  МПа

- модуль упругости арматуры класса А400  $E_s := 2 \cdot 10^5$  МПа

- расчетный максимальный момент  $M := 400$  кН·м

- коэффициент, учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки  $\gamma_{b1} := 1$

2 Определяем рабочую высоту сечения, приняв защитный слой  $a := 4$  см

$$h_0 := h - a = 56 \text{ см}$$

3 Определяем коэффициент  $\alpha_m$

$$\alpha_m := \frac{M \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.444$$

4 Вычисляем коэффициент, определяющий характер разрушения железобетонного элемента

$$\epsilon_{b2} := 0.0035$$

$$\epsilon_{s\_el} := \frac{R_s}{E_s} = 0.00175$$

$$\xi_R := \frac{0.8}{1 + \frac{\epsilon_{s\_el}}{\epsilon_{b2}}} = 0.533$$

$$\alpha_R := \xi_R \cdot \left(1 - \frac{\xi_R}{2}\right) = 0.391$$

5 Определяем характер разрушения

$$\text{Разрушение} := \begin{cases} \text{"пластическое"} & \text{if } \alpha_m \leq \alpha_R \\ \text{"хрупкое"} & \text{if } \alpha_m > \alpha_R \end{cases}$$

Разрушение = "хрупкое"

6 Определяем расчетную площадь рабочей арматуры

$$A_s := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0 \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_m})}{R_s \cdot 100} = 30.56 \text{ см}^2$$

Рис. 1.22. Неверный подбор сечения продольной арматуры в программе MathCAD как для одиночного армирования

Из приведенного расчета в программе MathCAD видно, что мы имеем случай хрупкого разрушения.

Алгоритм расчета элементов с одиночным армированием здесь уже не проходит.

ПК «Лира-САПР» в этом случае подберет арматуру как в растянутую, так и в сжатую зоны (рис. 1.23).

Для сравнения приведем результаты расчета этого же сечения в программе MathCAD (рис. 1.24).



Рис. 1.23. Результаты подбора двойного армирования в ПК «Лира-САПР»

1 Исходные данные

Ширина сечения  $b := 25$  см Высота сечения  $h := 60$  см

Материалы: - бетон тяжелый класса В20; арматура класса А400

- расчетное сопротивление бетона класса В20  $R_b := 11.5$  МПа

- начальный модуль упругости бетона класса В20  $E_b := 2.75 \cdot 10^4$  МПа

- расчетное сопротивление арматуры класса А400  $R_s := 350$  МПа

- расчетное сопротивление арматуры сжатию класса А400  $R_{sc} := 340$  МПа

- модуль упругости арматуры класса А400  $E_s := 2 \cdot 10^5$  МПа

- расчетный максимальный момент  $M := 400$  кН·м

- коэффициент, учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки  $\gamma_{b1} := 1$

2 Определяем рабочую высоту сечения, приняв защитный слой  $a := 4$  см

$$h_0 := h - a = 56 \text{ см}$$

3 Определяем коэффициент  $\alpha_m$

$$\alpha_m := \frac{M \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.444$$

4 Вычисляем коэффициент, определяющий характер разрушения железобетонного элемента

$$\epsilon_{b2} := 0.0035$$

$$\epsilon_{s\_el} := \frac{R_s}{E_s} = 0.00175$$

$$\xi_R := \frac{0.8}{1 + \frac{\epsilon_{s\_el}}{\epsilon_{b2}}} = 0.533$$

$$\alpha_R := \xi_R \cdot \left(1 - \frac{\xi_R}{2}\right) = 0.391$$

5 Определяем характер разрушения

$$\text{Разрушение} := \begin{cases} \text{"пластическое"} & \text{if } \alpha_m \leq \alpha_R \\ \text{"хрупкое"} & \text{if } \alpha_m > \alpha_R \end{cases}$$

Разрушение = "хрупкое"

Рис. 1.24. Подбор сечения продольной арматуры (начало)

$\xi > \xi_R$ , следовательно необходима установка рабочей арматуры в сжатой зоне, размеры сечения и класс бетона даны в условии задачи

$a'_s := 3$  см - расстояние от центра тяжести сжатой арматуры до внешнего сжатого края сечения.

При расчете принимаем, что высота сжатой зоны равна граничной

$$x = x_R = \xi_R \cdot h_0$$

6 Определяем площадь сечения сжатой рабочей арматуры  $A'_s$

$$A'_s := \frac{M \cdot 10^5 - R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R}{R_{sc} \cdot 100 \cdot (h_0 - a'_s)} = 2.629 \text{ см}^2$$

7 Определяем расчетную площадь растянутой рабочей арматуры

$$A_s := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b \cdot \xi_R \cdot h_0}{R_s} + A'_s = 27.162 \text{ см}^2$$

Рис. 1.24. Подбор сечения продольной арматуры (окончание)

Результаты аналитического расчета несколько отличаются от численных расчетов, но точного совпадения не стоит ожидать.

## 2. ПОДБОР СЕЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ АРМАТУРЫ В НЕРАЗРЕЗНОМ РИГЕЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК «ЛИРА-САПР»

Пошаговый алгоритм статического расчета поперечной рамы типового этажа многоэтажного каркасного здания с применением ПК «Лира-САПР» подробно рассмотрен в [8]. Поэтому в данном пособии пошаговые алгоритмы приводятся только для конструктивного расчета. А при описании статического расчета основной акцент делается на новые возможности ПК «Лира-САПР 2019», которых не было в версии 2011, настройки программы, наиболее типичные возможные ошибки пользователей и т.п.

В рамках курсового проекта 1 по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции» студенты выполняют «ручной» конструктивный расчет неразрезного ригеля – подбирают продольную арматуру в расчетных сечениях и выполняют конструирование ригеля. При конструировании студенты решают задачу определения несущей способности сечений ригеля с заданным армированием (арматурой, подобранной по результатам статического расчета). Далее в пособии будет изложен материал, каким образом аналогичные задачи решаются с применением ПК «Лира-САПР».

## 2.1. Статический расчет неразрезного ригеля

### 2.1.1. Признаки схемы в ПК «Лира-САПР»

Рассмотрим основную информацию по статическому расчету неразрезного ригеля согласно стандартному алгоритму статического расчета конструкций в ПК «Лира-САПР 2019» (см. п. 1.2.2).

После запуска ПК «Лира-САПР» появится диалоговое окно, в котором необходимо выбрать признак схемы (тип расчетной задачи), задать имя задачи (файла) и при необходимости дать краткое описание задачи (рис. 2.1).

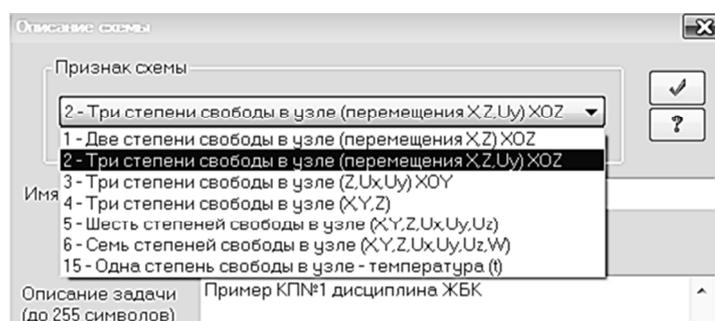


Рис. 2.1. Диалоговое окно «Описание схемы»

*Расчетная схема 7* («Признак схемы 15») применяется для решений задач теплопроводности.

Самая общая *расчетная схема 6* («Признак схемы 6») предполагает семь степеней свободы в узле конечного элемента (КЭ). С помощью этой схемы может быть рассчитана любая конструкция: от простой фермы до сложной комбинированной системы с использованием плоских и объемных КЭ. Помимо общеизвестных трех линейных и трех угловых степеней свободы, для такой расчетной схемы введена обобщенная седьмая степень свободы, которая характеризует степень деформации сечения. Такая расчетная модель применяется на практике в первую очередь для стальных тонкостенных конструкций, испытывающих деформации кручения.

*Расчетная схема 5* идентична шестой схеме, но в ней нельзя учесть деформацию сечений. По пятой расчетной схеме выполняются большинство расчетов монолитных железобетонных конструкций. В отличие от сборного железобетона, монолитные здания и сооружения наиболее точно и эффективно могут быть только в пространственной постановке. А если необходим расчет на сейсмические воздействия, то согласно нормативным документам расчет любого объекта должен выполняться по пространственным схемам.

*Расчетная схема 4* (три степени свободы в каждом узле – линейные перемещения по осям  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ ) позволяет рассчитывать пространственные шарнирно-стержневые системы (ферменные конструкции) и объемные тела.

С помощью *расчетной схемы 3* могут быть выполнены расчеты плоских плит перекрытий и покрытий, фундаментных плит и т.д. В данной схеме КЭ считаются абсолютно жесткими в своей плоскости (здесь рабочая плоскость  $xOy$ ), поэтому в этой модели учитываются только нормальные перемещения по оси  $Oz$  и два угла поворота вокруг осей  $Ox$  и  $Oy$ .

*Расчетная схема 2* самая популярная, так как с ее помощью выполняется расчет плоских балок и рам, обладающих тремя степенями свободы в каждом узле – линейные перемещения по осям  $Ox$ ,  $Oz$  и угол поворота вокруг оси  $Oy$ .

*Расчетная схема 1* (две степени свободы в каждом узле – линейные перемещения по осям  $Ox$ ,  $Oz$ ) позволяет рассчитывать плоские ферменные конструкции (стержневые конструкции, шарнирно соединенные).

Для первых двух расчетных схем в ПК «Ли́ра-САПР» основной рабочей плоскостью является плоскость  $xOz$  в отличие от NanoCAD или AutoCAD, где основная рабочая плоскость  $xOy$ . Это несоответствие приводит к частым ошибкам у начинающих пользователей, когда они задают координаты узлов или направление нагрузок по оси  $Oy$ .

Для расчета плоской рамы выбираем признак схемы 2. Также рекомендуется приводить краткое описание задачи, чтобы в дальнейшем было проще понять, какую именно задачу решает данный файл (рис. 2.2).

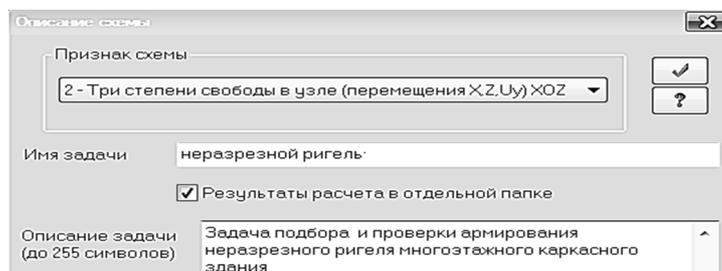


Рис. 2.2. Задание признака схемы

Если признак схемы изначально задан неправильно или необходимо перейти к другой расчетной схеме, то его можно поменять с помощью пиктограммы , находящейся на панели «Создание и редактирование» (рис. 2.3).

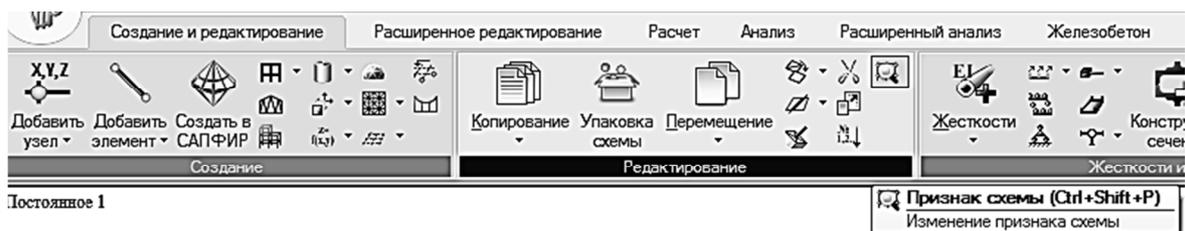


Рис. 2.3. Изменение признака схемы

Задание неверного признака схемы является одной из самых типичных ошибок начинающих пользователей. Кроме того, надо знать еще об одной вероятной ошибке, связанной с неверным заданием граничных условий. В последних версиях ПК «Лира-САПР» разработчики ввели новшество, которое позволяет рассчитывать даже геометрически изменяемые системы. Программа сама в этом варианте случайным образом добавляет связи, необходимые для обеспечения геометрической неизменяемости системы.

Приведем конкретный пример. Если для рамы ошибочно задать закрепления не по осям  $X$  и  $Z$ , а  $X$  и  $Y$  и запустить задачу на счет, то программа выдаст ошибку, что во время МКЭ возникли проблемы, но при этом все же выдаст результаты расчета.

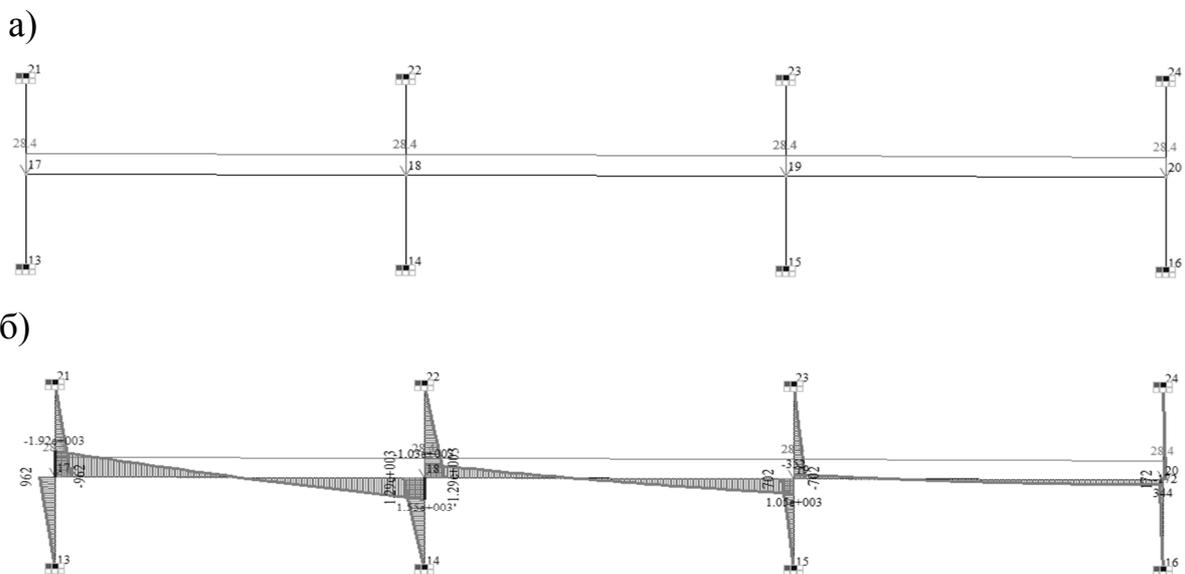


Рис. 2.4. Рама с ошибочными закреплениями:  
а – расчетная схема; б – ошибочная эпюра моментов

На рис. 2.4 показана расчетная схема с ошибочными закреплениями и, как следствие, неверными результатами расчетов.

### 2.1.2. Основные настройки ПК «Лира-САПР»

Первоначальные стандартные настройки ПК «Лира-САПР» в ряде случаев целесообразно изменить. Рассмотрим изменение основных настроек.

Войти в редактирование настроек можно с помощью большой кнопки  и далее пункта выпадающего меню «Настройки» (рис. 2.5).

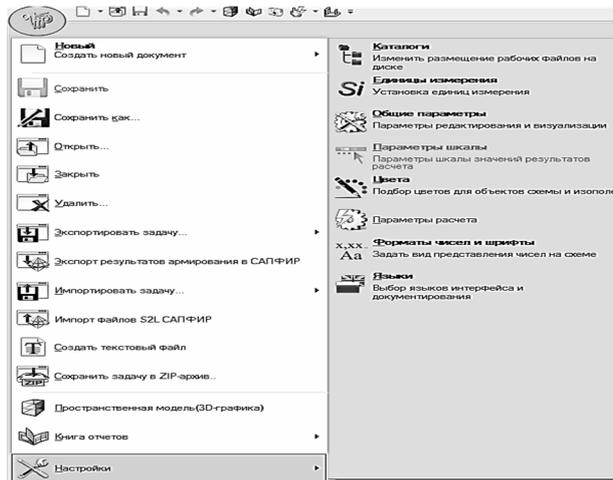


Рис. 2.5. Меню редактирования настроек

Диалоговое окно «Единицы измерения» имеет три вкладки: «Схема», «Результаты», «Армирование». Рекомендуется на первых двух вкладках поменять размерности, как показано на рис. 2.6. Изначально заданные размерности  $t$ ,  $t_c$  меняем на кН и МПа.

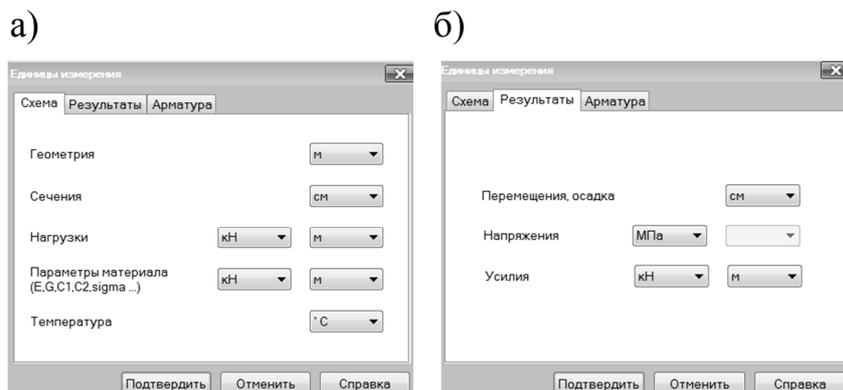


Рис. 2.6. Рекомендуемые размерности на вкладках:  
а – «Схема»; б – «Результаты»

Много времени пользователь может сэкономить себе, если заранее поменяет параметры конструирования. По умолчанию в параметрах конструирования задано применение старых нормативных документов при

расчете. Это касается как норм проектирования конструкций из разных материалов, так и норм по нагрузкам и воздействиям.

Ниже на рис. 2.7 показаны окна со старыми и актуальными нормами расчетов.

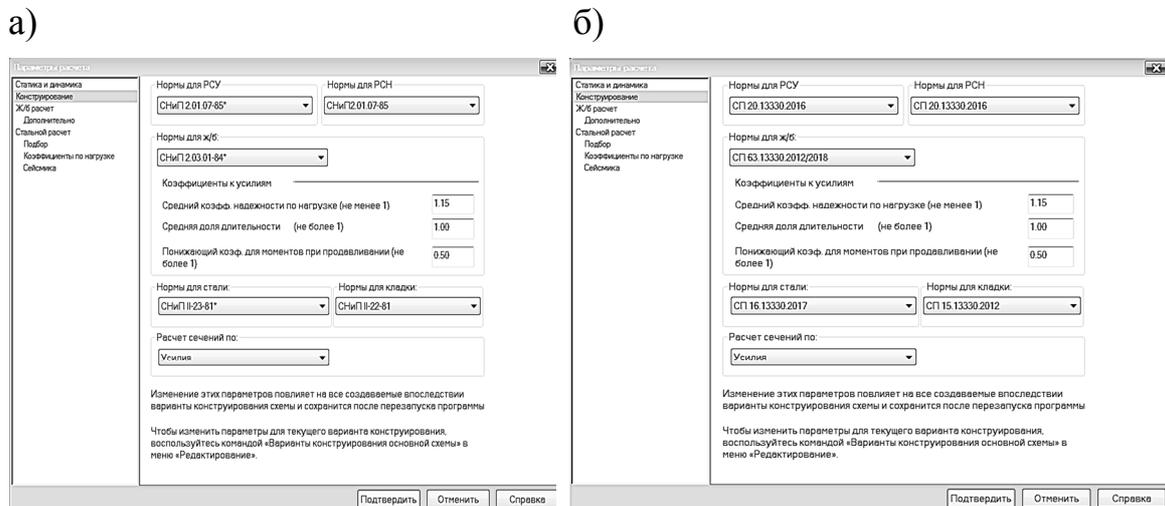


Рис. 2.7. Окна «Параметры расчета»: а – с устаревшими нормами проектирования; б – с актуальными нормами проектирования

Если пользователь один раз выставит актуальные нормы проектирования, то в дальнейшем ему не нужно будет для каждого нового файла менять их в вариантах конструирования.

Также при необходимости пользователь может поменять в настройках формат чисел шрифтов. По умолчанию в ПК «Лира-САПР» установлен размер шрифта «9» для всех окон с исходными данными и результатов расчета. Но при оформлении работ иногда такой размер шрифта может оказаться плохо читаемым (рис. 2.8).

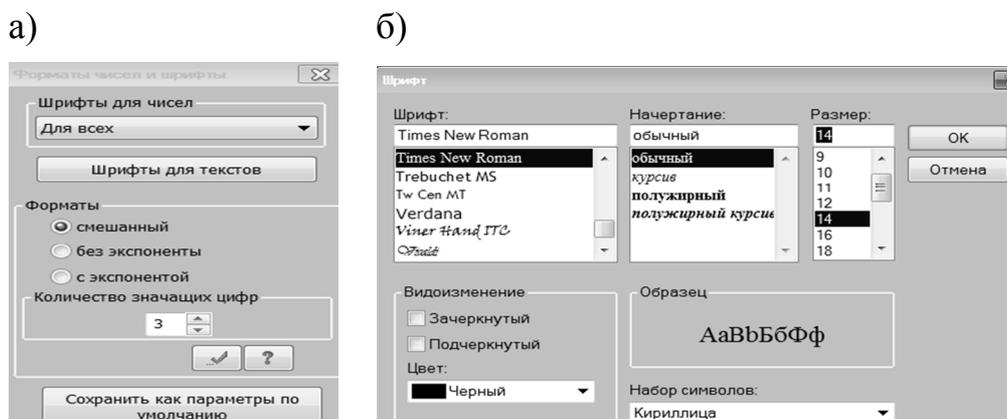


Рис. 2.8. Окна: а – «Форматы чисел и шрифты»; б – «Шрифт»

### 2.1.3. Создание геометрической схемы

Можно условно выделить три способа создания геометрической схемы конструкций:

- 1) из отдельных узлов и КЭ;
- 2) по шаблонам;
- 3) комбинированный.

Если рассчитываемый объект имеет сложную нерегулярную геометрическую схему, то в этом случае придется пошагово задавать отдельные узлы и КЭ (рис. 2.9).

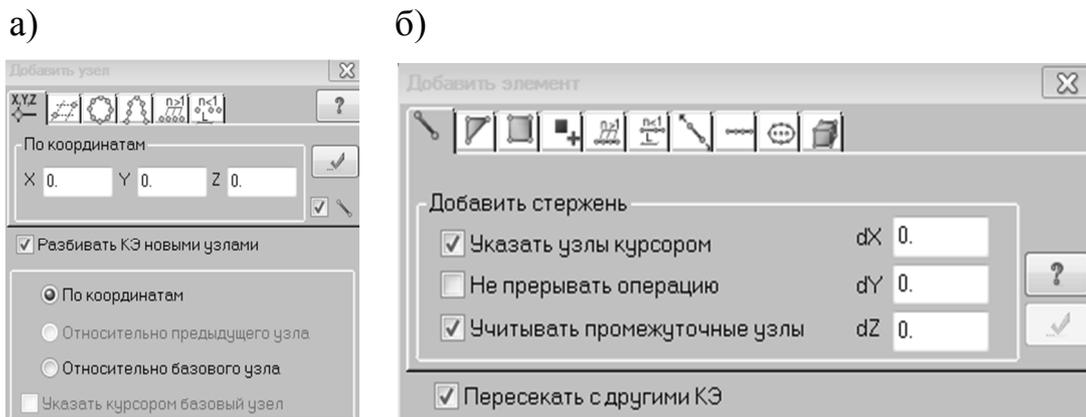


Рис. 2.9. Окна: а – «Задание узлов»; б – «Задание элементов»

Для целого ряда конструкций (ферм, плит и др.) геометрические схемы легко и быстро создаются с помощью шаблонов, показанных на рис. 2.10.

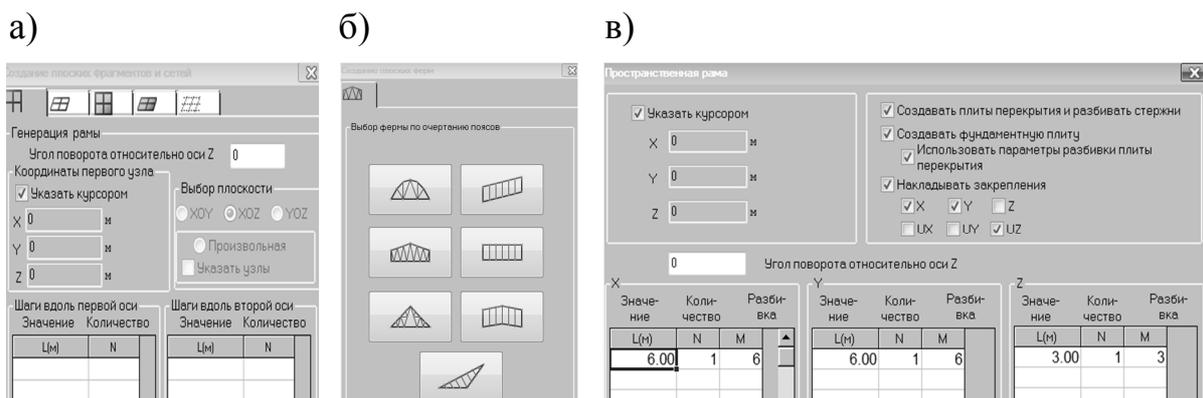


Рис. 2.10. Окна: а – «Создание плоских фрагментов и сетей»; б – «Создание плоских ферм»; в – «Пространственная рама»

Но чаще всего на практике встречаются случаи, когда первоначально применяется шаблон, а потом идет его «доработка» вручную для получения заданной геометрической схемы.

Так и в нашем случае, сначала мы создаем с помощью окна «Создание плоских фрагментов и сетей» трехпролетную раму, а затем удаляем вручную лишние горизонтальные элементы (рис. 2.11).

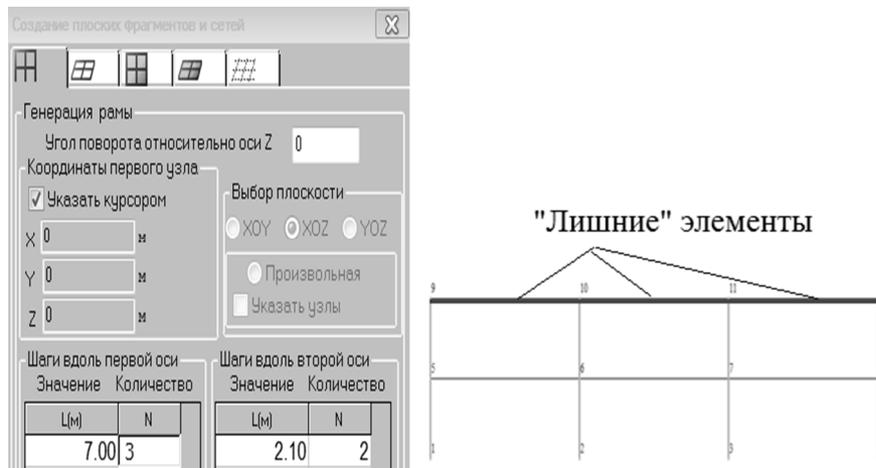


Рис. 2.11. Создание геометрической схемы рамы

Часто при создании геометрических схем эффективным является применение операций копирования и перемещения (рис. 2.12).

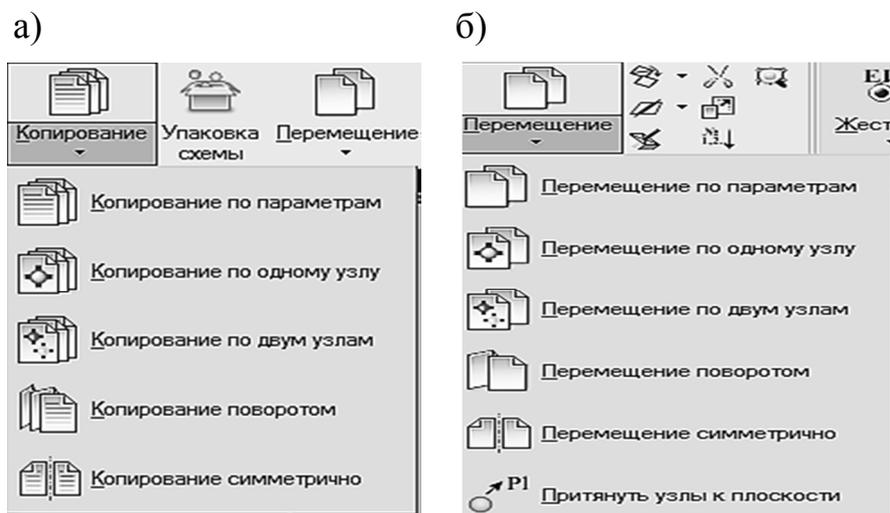


Рис. 2.12. Меню: а – «Копирование»; б – «Перемещение»

### 2.1.4. Задание граничных условий

При расчете плоских стержневых конструкций (табл. 2.1) наиболее часто на практике встречаются три типа граничных условий (типа опор).

Таблица 2.1

Основные варианты закрепления узлов для плоских систем

Наименование закрепления	Графическое изображение	Исключенные степени свободы	Визуализация на расчетной схеме
1. Шарнирно-подвижная опора		Линейное вертикальное перемещение по оси $Oz$ <input type="checkbox"/> $x$ <input type="checkbox"/> $ux$ <input type="checkbox"/> $y$ <input type="checkbox"/> $uy$ <input checked="" type="checkbox"/> $z$ <input checked="" type="checkbox"/> $uz$	
2. Шарнирно-неподвижная опора		Два линейных перемещения: по осям $Ox$ и $Oz$ <input checked="" type="checkbox"/> $x$ <input type="checkbox"/> $ux$ <input type="checkbox"/> $y$ <input type="checkbox"/> $uy$ <input checked="" type="checkbox"/> $z$ <input checked="" type="checkbox"/> $uz$	
3. Жесткая заделка		Два линейных перемещения: по осям $Ox$ и $Oz$ и поворот вокруг оси $Oy$ <input checked="" type="checkbox"/> $x$ <input type="checkbox"/> $ux$ <input type="checkbox"/> $y$ <input checked="" type="checkbox"/> $uy$ <input checked="" type="checkbox"/> $z$ <input type="checkbox"/> $uz$	

Для рассматриваемой задачи нам необходимо задать шарнирно-неподвижные опоры в верхних и нижних узлах рамы (см. рис. 1.1).

Технически эта задача решается в два этапа. Сначала выделяются узлы, где необходимо задать опоры, затем отмечаются степени свободы, которые необходимо исключить, и выполняется подтверждение операции (рис. 2.13).

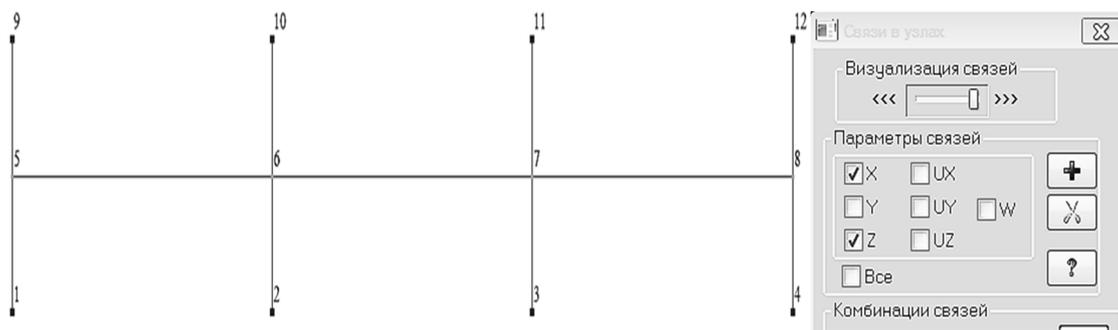


Рис. 2.13. Задание граничных условий

Иногда и даже часто приходится менять условия граничных закреплений. Как это можно быстро сделать, покажем с помощью инструмента «фонарик» . Пусть в узле номер 11 ошибочно задана шарнирно-

подвижная опора (забыли закрепить узел по оси  $OX$ ). Проще всего при активном инструменте «фонарик» щелкнуть левой кнопкой мыши на узел 11, далее в появившемся окне «Узел 11» исправить условия закрепления и применить эти изменения (рис. 2.14).

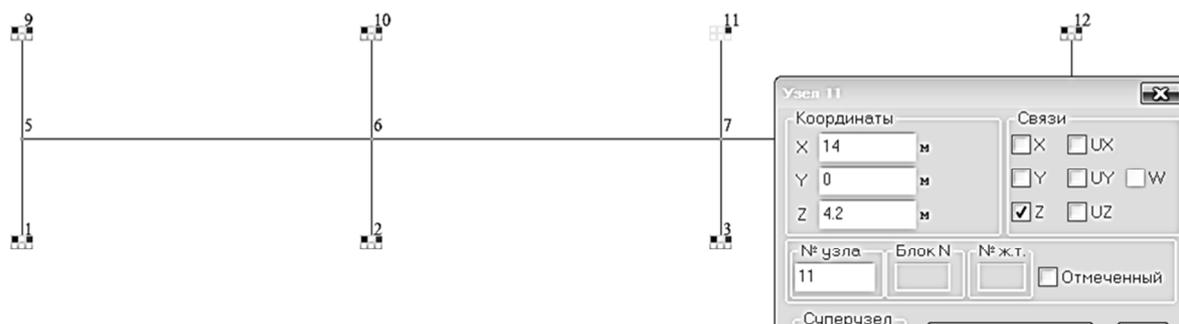


Рис. 2.14. Редактирование граничных условий в узле 11

Инструмент «фонарик»  является аналогом инструмента «свойства», используемого во многих других программах. Этот инструмент позволяет не только просматривать свойства узлов и КЭ, но и редактировать эти свойства!!! Особенно важна эта возможность при корректировке свойств элементов, которых в разы больше, чем для узлов.

Также необходимо напомнить, откуда посередине колонн появились шарнирно-неподвижные опоры. Подробно о выборе расчетной схемы типового этажа можно ознакомиться в подразд. 2.1 [8].

Для упрощения расчета из поперечной рамы многоэтажного каркасного здания вычленяется рама типового этажа, используя то обстоятельство, что из-за симметрии геометрической схемы в сечениях посередине колонн изгибающие моменты очень малы. И по правилам строительной механики мы рассекаем колонны в этих сечениях, заменяя влияние отсеченных частей многоэтажной рамы «виртуальными» шарнирно-подвижными опорами.

Таким же классическим методом выделения отдельных конструкций из общей расчетной модели здания получают расчетные схемы плит перекрытия, шарнирно опертых на ригели, фермы и т.п.

### **2.1.5. Задание шарниров. Свойства стержневого конечного элемента**

Многоэтажные каркасные здания могут иметь две основные конструктивные схемы: 1) полный каркас (рис. 2.15, а), 2) неполный каркас (рис. 2.15, б). В здании с полным каркасом основные вертикальные несущие элементы – железобетонные колонны – расположены как внутри здания, так и по всему его периметру. В неполном каркасе элементы перекры-

тия опираются на внутренние колонны и наружные кирпичные стены. Если в полном каркасе все элементы поперечной рамы жестко сопрягаются между собой, то в неполном сопряжение ригелей со стенами является шарнирным.

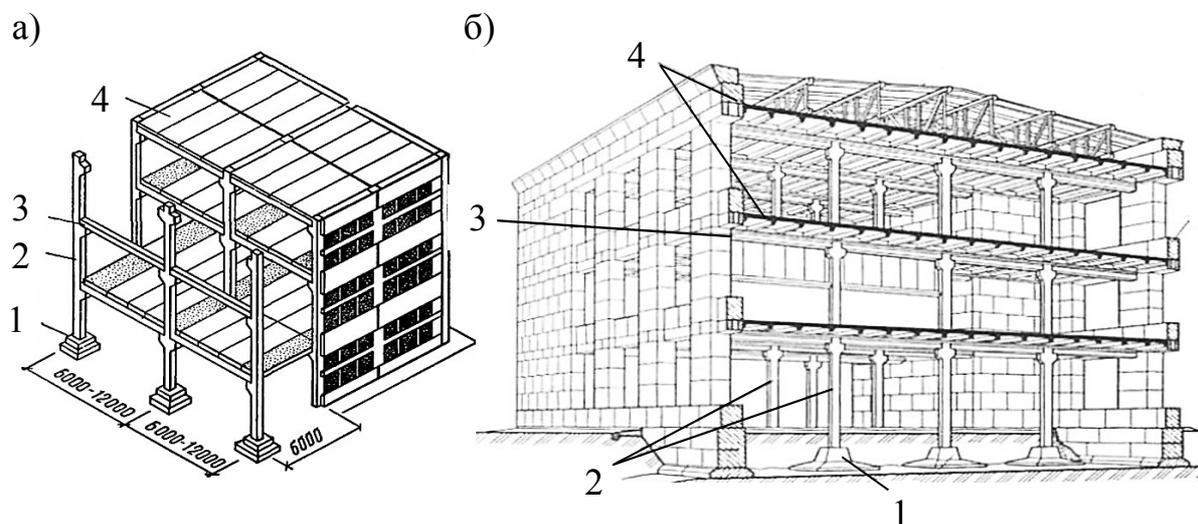


Рис. 2.15. Здания с полным (а) и неполным (б) каркасами:  
1 – фундамент; 2 – колонна; 3 – ригель; 4 – балка

При учете такого типа сопряжения в расчетной схеме для неполного каркаса необходимо «врезать» шарниры в крайние узлы ригелей (5 и 8) (рис. 2.16).

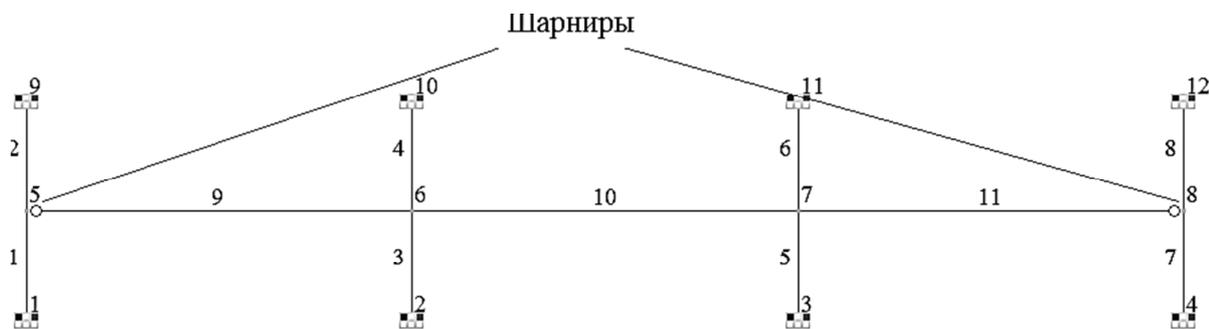


Рис. 2.16. Шарниры, учитывающие сопряжение ригелей с кирпичными стенами

Шарнир в ПК «Лири-САПР» является свойством КЭ, а не узла. Поэтому когда устанавливается левый шарнир на расчетной схеме, он задается не в узле 5, а в левом узле КЭ 9!!!

Стержневые КЭ имеют два узла, и обычно первый узел – это левый или нижний узел, но не всегда это правило работает. Оно справедливо для

расчетных схем, созданных с помощью шаблонов, как в нашем случае. Если же расчетная схема создается из отдельных узлов, то перед «врезкой» шарнира надо сначала узнать, какой узел для элемента будет первый, а какой – второй. Проще всего это можно узнать с помощью пиктограммы «фонарик» (свойства) . Активировав эту команду и щелкнув левой кнопкой мыши на КЭ 9, откроем окно «Стержень 9», в котором можно не только просмотреть, но и отредактировать свойства этого элемента (рис. 2.17).

Перечислим и ниже поясним основные свойства КЭ:

- номера узлов – 5 и 6;
- тип жесткости;
- тип КЭ – 10;
- количество расчетных сечений;
- жесткие вставки;
- шарниры;
- угол вращения местных осей;
- коэффициенты постели;
- материалы.

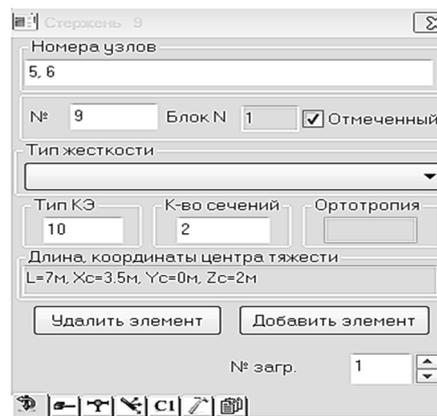


Рис. 2.17. Свойства КЭ 9

**Номера узлов.** Конечному элементу 9 принадлежат два узла – 5 и 6, и по тому, в какой последовательности они отображены в окне, можно сделать вывод, что узел 5 – это первый узел КЭ, а узел 6 – второй. Значит, нам необходимо «врезать» шарнир в первый узел КЭ 9. Для изменения внутренней нумерации узлов КЭ 9 необходимо вручную в поле «Номера узлов» поменять номера узлов местами и тогда узел 6 станет первым по порядку, а узел 5 станет вторым.

**Тип жесткости** определяет геометрические характеристики сечения и физические свойства материала, необходимые для выполнения статического расчета материала. С помощью инструмента перекрутки поля «Тип жесткости» можно редактировать (выбирать или изменять) жесткость сечения. Сейчас это поле пустое, так как мы еще не задавали жесткости сечений.

**Тип КЭ.** При расчете стержневых конструкций, независимо от признака расчетной схемы, программа по умолчанию назначает всем элементам тип КЭ – 10. Это универсальный тип стержневого КЭ, обладающий в общем случае всеми возможными степенями свободы в каждом узле. Но в зависимости от признака расчетной схемы программа «оставляет» в матрице жесткости и векторе внешних узловых только те степени свободы, которые характерны для конкретного расчетного случая. В нашем случае для признака схемы 2 останутся два линейных перемещения ( $X$  и  $Z$ ) и угол поворота  $UY$ .

**Количество расчетных сечений.** По умолчанию стержневой КЭ в ПК «Лира-САПР» имеет всего два расчетных сечения (в каждом узле), в которых программа вычисляет усилия и для которых далее выполняет конструктивный расчет.

Но конструктивный расчет, выполненный только по двум расчетным сечениям, скорее всего, даст ошибочные результаты, так как максимальные усилия (прогибы) могут быть в других сечениях. Если в учебной версии ПК «Лира-САПР 2019» при задании материалов программа сама предлагает задать дополнительные расчетные сечения, то в свободно распространяемой некоммерческой версии «Лира-САПР 2016» контроль над введением дополнительных расчетных сечений возложен на пользователя.

Для «ручного» задания дополнительных расчетных сечений необходимо предварительно выделить элементы, а затем на вкладке «Стержни»

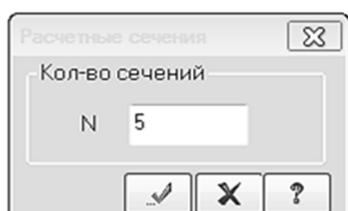


Рис. 2.18. Окно «Расчетные сечения»

открыть окно «Расчетные сечения» и применить действие (рис. 2.18).

Введение дополнительных расчетных сечений не увеличивает число неизвестных МКЭ, оно также зависит только от числа неизвестных узловых перемещений. Помимо обеспечения точности и надежности выполнения конструктивного расчета, дополнительные расчетные сечения иногда задают для удобства просмотра результатов в конкретных сечениях.

**Жесткие вставки.** Инструмент «Жесткие вставки» позволяет моделировать несоосность отдельных элементов расчетной схемы, автоматически учитывать эксцентриситет приложения нагрузок и т.д.

Хотя этот инструмент часто позволяет более эффективно выполнять расчеты, но надо очень аккуратно использовать такие возможности программы, особенно если сама программа задает параметры инструмента.

Надо помнить простую истину – чем более усложнена расчетная схема, тем больше вероятность возможной ошибки!!! Без особой необходимости не имеет смысла нагромождать расчетную схему использованием инструментов, контроль за которыми не всегда просто сделать. И тем более, если пользователь до конца не понимает весь механизм применения такого инструмента.

**Шарниры.** Теоретически шарниры могут быть заданы в узлах КЭ по всем степеням свободы. Но на практике при расчете балок, рам, пространственных стержневых конструкций наиболее часто применяется шарнир, моделирующий отсутствие сопротивления элемента при повороте его в местной системе координат относительно оси  $Oy$ .

Для задания шарниров необходимо первоначально выделить требуемый КЭ, и в открывшемся диалоговом окне «Шарниры» отметить номер узла КЭ (1, 2 или 1 и 2) и применить это действие (рис. 2.19).

Также поясним, для чего в окне «Шарниры» напротив каждой степени свободы, помимо поля отметки, есть поле, где можно ввести конечное числовое значение.

В природе не существует абсолютно жестких или абсолютно шарнирных сопряжений элементов. Любое соединение всегда обладает конечной податливостью или жесткостью. Но в практических расчетах обычно ими пренебрегают и принимают или шарнирное, или жесткое соединение.

Чтобы понять, что такое соединение с конечной угловой жесткостью, приведем наглядный пример. Если шарниры двери хорошо смазаны, то она поворачивается практически без сопротивления (идеальный шарнир). Если же дверные шарниры заржавели (скорее всего, такая дверь эксплуатируется на открытом воздухе), то повернуть ее не так и просто, и она даже немного изгибается из своей плоскости.

На рис. 2.20 приведены результаты расчетов при различных условиях сопряжения крайних ригелей с колоннами (стенами). На рис. 2.20, б показан расчет ригеля, для которого назначены конечные угловые жесткости в узлах 5 и 9 –  UY 10000 кН\*М.

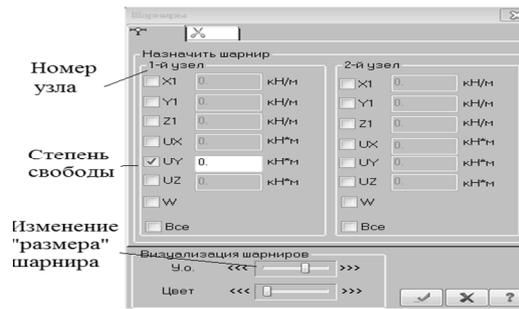


Рис. 2.19. Диалоговое окно «Шарниры»

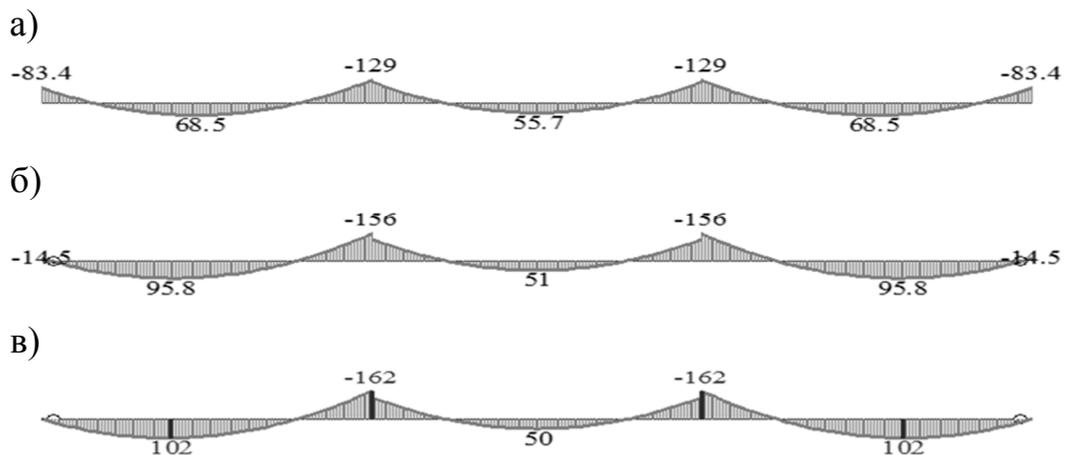


Рис. 2.20. Эпюры изгибающих моментов в неразрезном ригеле:  
а – жесткое соединение; б – податливое соединение;  
в – шарнирное соединение

Как мы видим из результатов расчета, для схемы с конечной жесткостью в крайних сечениях возникли изгибающие моменты 14,5 кН·м. Этот пример не совсем характерный для рассматриваемых конструктивных систем. Но встречаются расчетные случаи, когда наиболее точный и надежный расчет может быть выполнен только с учетом податливости соединений. Например, этот учет особенно важен при расчете панельных зданий.

**Угол вращения местных осей.** Угол чистого вращения определяет положение главных осей сечения стержня относительно глобальной системы координат.

**Коэффициенты постели** обычно используются при совместном расчете конструкций с грунтовым основанием. По сути, эти коэффициенты определяют свойства виртуальных пружинных связей, моделирующих основание. Число коэффициентов постели, учитываемых в расчете, и их значения определяются принятой моделью грунта. Коэффициенты могут рассчитываться вручную и просто задаваться пользователем. Но наиболее точный расчет предполагает создание трехмерного массива грунта и автоматизированное вычисление коэффициентов.

**Материалы.** Обобщенное понятие «Материалы» используется при конструктивном расчете и будет подробно рассмотрено ниже. Для железобетонных конструкций термин «Материалы» включает в себя три параметра – «Тип элемента», «Бетон», «Арматура», а для стальных конструкций – «Материал», «Дополнительные характеристики», «Ограничения подбора».

### 2.1.6. Задание и присваивание жесткостей элементам

Задание жесткостей в ПК «Лира-САПР» выполняется с помощью диалогового окна «Жесткости и материалы» – закладка «Жесткости» (рис. 2.21).

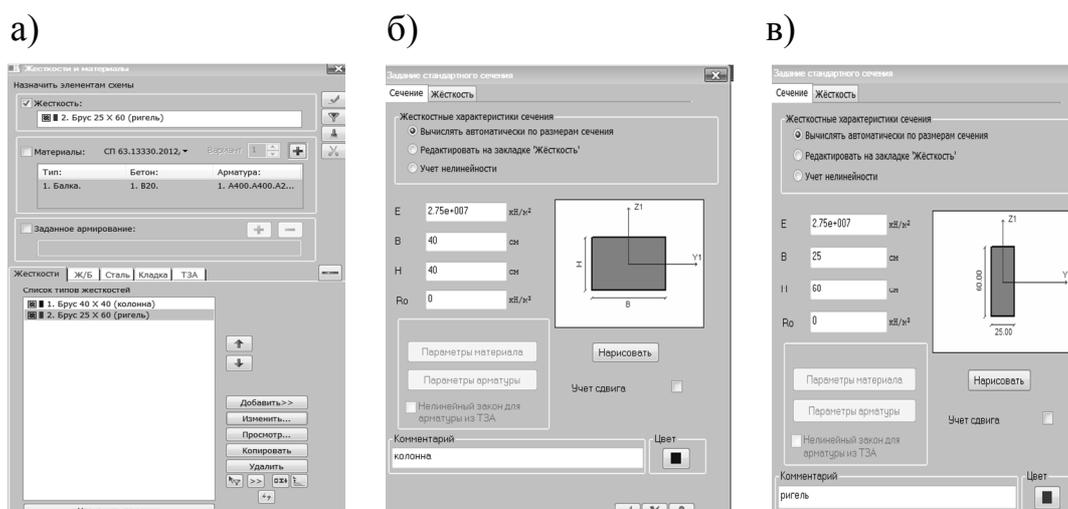


Рис. 2.21. Окна: а – «Жесткости и материалы»; б – «Жесткости колонны»; в – «Жесткости ригеля»

В рассматриваемом примере задаются два типа жесткостей: для колонны (см. рис. 2.21, б) и ригеля (см. рис. 2.21, в). Пользователь задает размеры сечений для колонны и ригеля, а также модуль упругости бетона, который зависит от класса материала. После задания жесткостей необходимо последовательно выделить сначала все элементы, моделирующие колонны, и при текущей жесткости «Колонны» применить действие. Аналогичную операцию необходимо провести для ригелей.

Далее желательно провести контроль операции присваивания жесткостей, который может быть выполнен различными способами.

**Визуальный контроль.** Просмотреть пространственную модель поперечной рамы можно с помощью большой кнопки  и далее пиктограммы  «Пространственная модель(3D-графика)». В открывшемся окне «3D-вид» активировать режим  «Показать сечения элементов» (рис. 2.22).

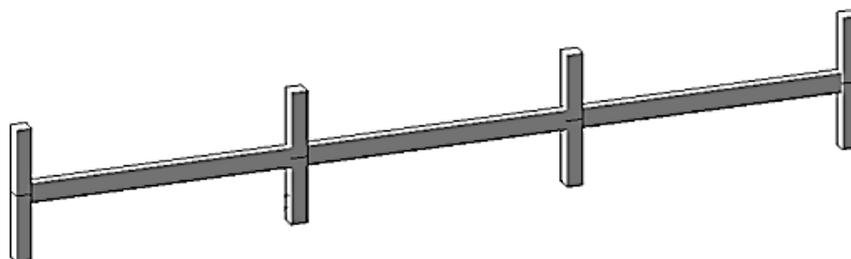


Рис. 2.22. Пространственная модель поперечной рамы

Если программа не отображает реальные сечения элементов, то, скорее всего, хотя бы одному из элементов жесткость не присвоена.

**Вывод на экран номеров жесткостей элементов.** Номера жесткостей элементов выводятся на экран с помощью пиктограммы «Типы жесткостей»  на панели «Элементы» окна «Показать» (флаги рисования ) (рис. 2.23).

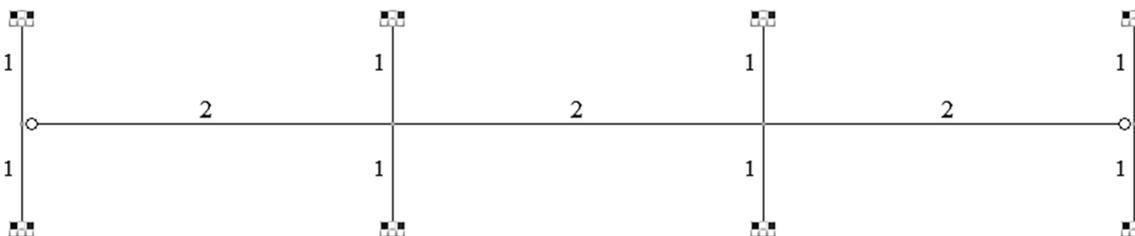


Рис. 2.23. Расчетная схема рамы с выведенными на экран номерами жесткостей

**Вывод на экран цвета жесткостей.** Жесткости элементов в цвете выводятся на экран с помощью пиктограммы «Жесткости в цвете»  на панели «Элементы» окна «Показать» (флаги рисования ) (рис. 2.24).



Рис. 2.24. Расчетная схема рамы с выведенными на экран жесткостями элементов

Для сложных трехмерных расчетных схем способ контроля жесткостей в цвете наиболее оптимален, так как проследить номера жесткостей сотен КЭ или их сечения на экране ПК очень сложно.

Также полезно при расчете конструкций с большим числом различных жесткостей знать о возможности копирования жесткостей из одного файла в другой. Пиктограммы копирования  и вставки  жесткостей находятся в нижней части закладки «Жесткости» окна «Жесткости и материалы».

### 2.1.7. Задание отдельных загрузений

Отдельные загрузки задаются в окне «Редактор загрузений», которое вызывается путем нажатия на пиктограмму , расположенную по умолчанию в правой нижней части рабочего окна ПК «Ли́ра-САПР» (рис. 2.25).

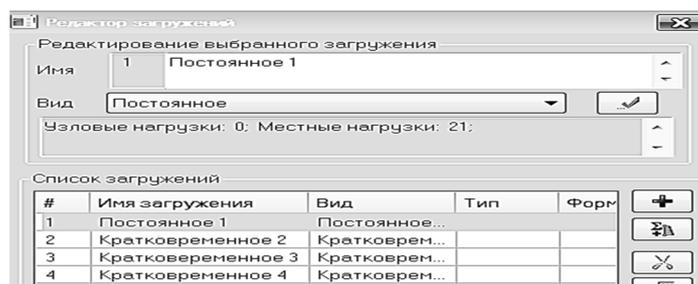


Рис. 2.25. Окно с заданными загрузениями на раму

В окне «Редактор загружений» для каждой нагрузки необходимо задать:  
1) имя нагрузки (рекомендуется задавать имя нагрузки, которое определяет ее реальный характер);

2) вид загрузки:

- постоянное;
- временное длительное;
- кратковременное;
- крановое;
- тормозное;
- сейсмическое;
- особое (эпизодическое);
- мгновенное;
- неактивное (статическое при учете пульсации ветра).

В нашем примере на раму действуют постоянная нагрузка и кратковременная, приложенная по трем различным схемам нагружения. Доля длительности кратковременной нагрузки будет далее задана при формировании таблицы РСУ. Также далее в таблице РСУ будет указано, что варианты нагружения рамы кратковременной нагрузкой являются взаимоисключающими, то есть при составлении РСУ должна быть учтена только одна из них.

Подробная информация о формировании таблиц РСУ и РСН будет изложена ниже, так как этот вопрос тесно связан с конструктивным расчетом элементов, хотя формально он больше относится к статическому расчету.

### 2.1.8. Статический расчет

Есть два основных варианты запуска файла на расчет (рис. 2.26):

- 1) на вкладке «Расчет» запустить команду «Полный расчет»;
- 2) на вкладке «Расчет» запустить команду «Расчет с контролем параметров».

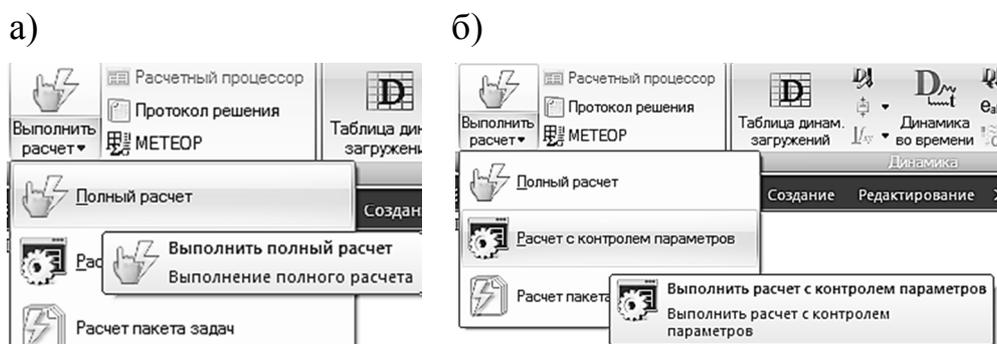


Рис. 2.26. Варианты расчета: а – полный; б – с контролем параметров

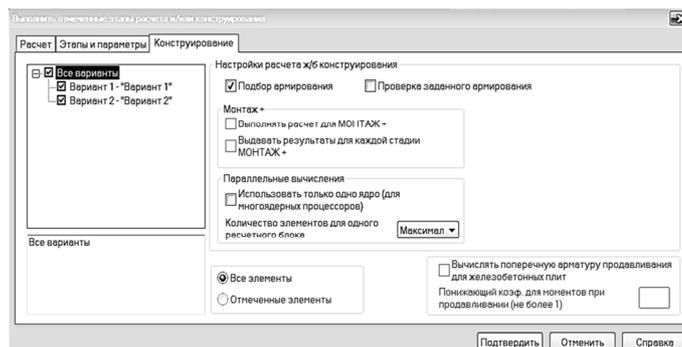


Рис. 2.27. Окно задания параметров расчета

В первом случае сразу запустится алгоритм расчета, а во втором случае программа предложит задать опции расчета, этапы и параметры статического расчета, параметры конструктивного расчета (рис. 2.27).

### 2.1.9. Сравнение результатов численного и аналитического расчетов рамы

Главная цель выполнения РГР – подбор и проверка сечения продольной рабочей арматуры в неразрезном ригеле. Рама трехпролетная, но вследствие симметрии аналитические расчеты выполняются только для ригелей в первом и втором пролетах. Сравним результаты численного и аналитического расчетов рамы для постоянного нагружения.

Изгибающие моменты, вычисленные с помощью таблиц, составленных на основе метода перемещений, в опорных сечениях равны:  $M_{12} = 84,846$  кН·м,  $M_{21} = 127,96$  кН·м,  $M_{23} = 119,61$  кН·м (рис. 2.28).

k	a <sub>12</sub>	a <sub>21</sub>	a <sub>23</sub>	a <sub>32</sub>
0,5	-0,072	-0,09	-0,083	-0,083
1	-0,063	-0,091	-0,085	-0,085
2	-0,054	-0,093	-0,087	-0,087
3	-0,046	-0,095	-0,089	-0,089
4	-0,039	-0,097	-0,089	-0,089
5	-0,033	-0,099	-0,09	-0,09
6	-0,027	-0,1	-0,091	-0,091

Первая схема загружения ригеля рамы на крайних опорах, жестко соединенного с...

Коэффициент жесткости k =  $\frac{E_2 \cdot I_2 \cdot I_3^2 + I_2^2}{E_1 \cdot I_1 \cdot I_3^2 + I_3^2} = \frac{(20000 \cdot 0,25^4 \cdot 0,6^3 \cdot 3^4 \cdot 2) / (20000 \cdot 0,4^4 \cdot 3^4 \cdot 7)}{1} = 1,266$

Коэффициенты для вычисления опорных моментов

$a_{12} = a'_{12} + (k - k_1) \frac{a''_{12} - a'_{12}}{k_2 - k_1} = -0,063 + 0,266 \cdot (-0,054 - (-0,063)) = -0,081$

$a_{21} = a'_{21} + (k - k_1) \frac{a''_{21} - a'_{21}}{k_2 - k_1} = 0,091 + 0,266 \cdot (-0,093 - 0,091) = 0,092$

$a_{23} = a'_{23} + (k - k_1) \frac{a''_{23} - a'_{23}}{k_2 - k_1} = -0,085 + 0,266 \cdot (-0,087 - (-0,085)) = -0,086$

$a_{32} = a'_{32} + (k - k_1) \frac{a''_{32} - a'_{32}}{k_2 - k_1} = -0,085 + 0,266 \cdot (-0,087 - (-0,085)) = -0,086$

Опорные моменты

$M_{12} = a_{12} \cdot q \cdot l_2^2 = -0,081 \cdot 28,386 \cdot 7^2 = -84,846$

$M_{21} = a_{21} \cdot q \cdot l_2^2 = 0,092 \cdot 28,386 \cdot 7^2 = 127,964$

$M_{23} = a_{23} \cdot q \cdot l_2^2 = -0,086 \cdot 28,386 \cdot 7^2 = -119,619$

$M_{32} = a_{32} \cdot q \cdot l_2^2 = -0,086 \cdot 28,386 \cdot 7^2 = -119,619$

Рис. 2.28. Вычисление изгибающих моментов от постоянной нагрузки в программе «Ригель»

Аналогичные моменты, вычисленные с помощью ПК «Ли́ра-САПР», равны:  $M_{12} = 83,4$  кН·м,  $M_{21} = 129$  кН·м,  $M_{23} = 118$  кН·м (рис. 2.29).

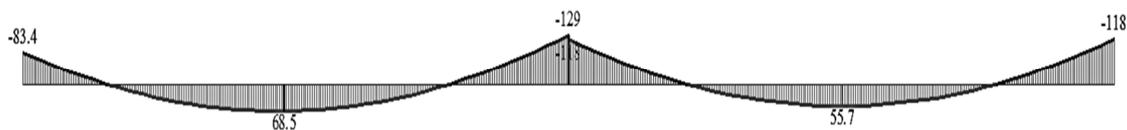


Рис. 2.29. Эпюры изгибающих моментов от постоянной нагрузки

Небольшое расхождение численного и аналитического расчетов объясняется погрешностями, связанными с использованием приближенных значений табличных коэффициентов. Но надо учитывать ограниченность применения расчета с помощью таблиц, которые составлены для конкретной расчетной схемы и конкретных загрузок. Если меняется геометрия схемы или схемы приложения нагрузок, то расчет придется выполнять с применением САПР-систем.

Кроме того, даже для такой регулярной расчетной схемы определенная погрешность заложена тем фактом, что мы из многоэтажной рамы вырезаем типовой этаж.

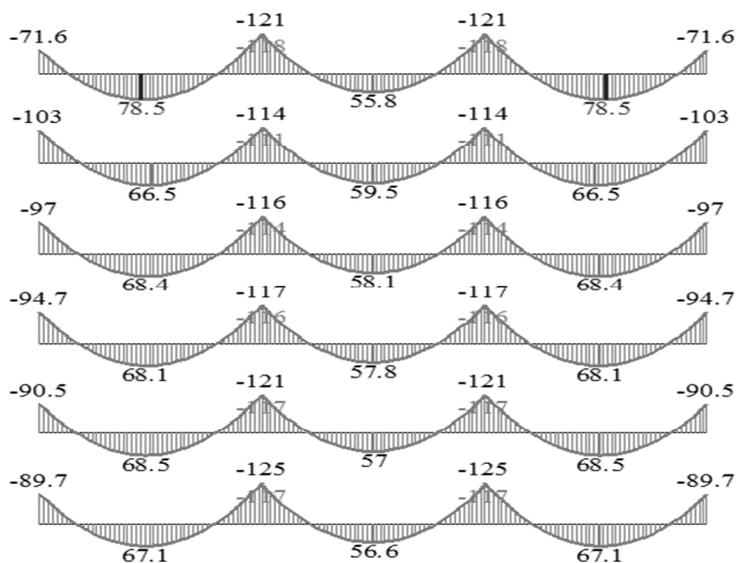


Рис. 2.30. Эпюры изгибающих моментов от постоянной нагрузки в ригелях многоэтажной рамы

Из сравнения результатов расчетов многоэтажной рамы (рис. 2.30) и рамы типового этажа видим, что даже для типовых этажей есть определенные расхождения. А рамы верхнего и нижнего этажей должны рассчитываться по другим расчетным схемам (соответственно, использоваться другие таблицы).

### 2.1.10. *Корректировка расчетной схемы рамы для вычисления усилий по граням колонн*

В принятой расчетной схеме ПК «Лира-САПР» вычислила изгибающие моменты по осям колонн, тогда как для подбора арматуры на пропорных участках необходимо знать изгибающие моменты, действующие по граням колонн, где фактически находится сечение ригеля. Можно предложить два варианта вычисления моментов по грани колонн: 1) с помощью абсолютно жестких вставок; 2) путем создания дополнительных узлов. Мы выберем второй вариант.

Скорректируем схему, создав дополнительные узлы на расстоянии 0,2 м от оси колонн (рис. 2.31).

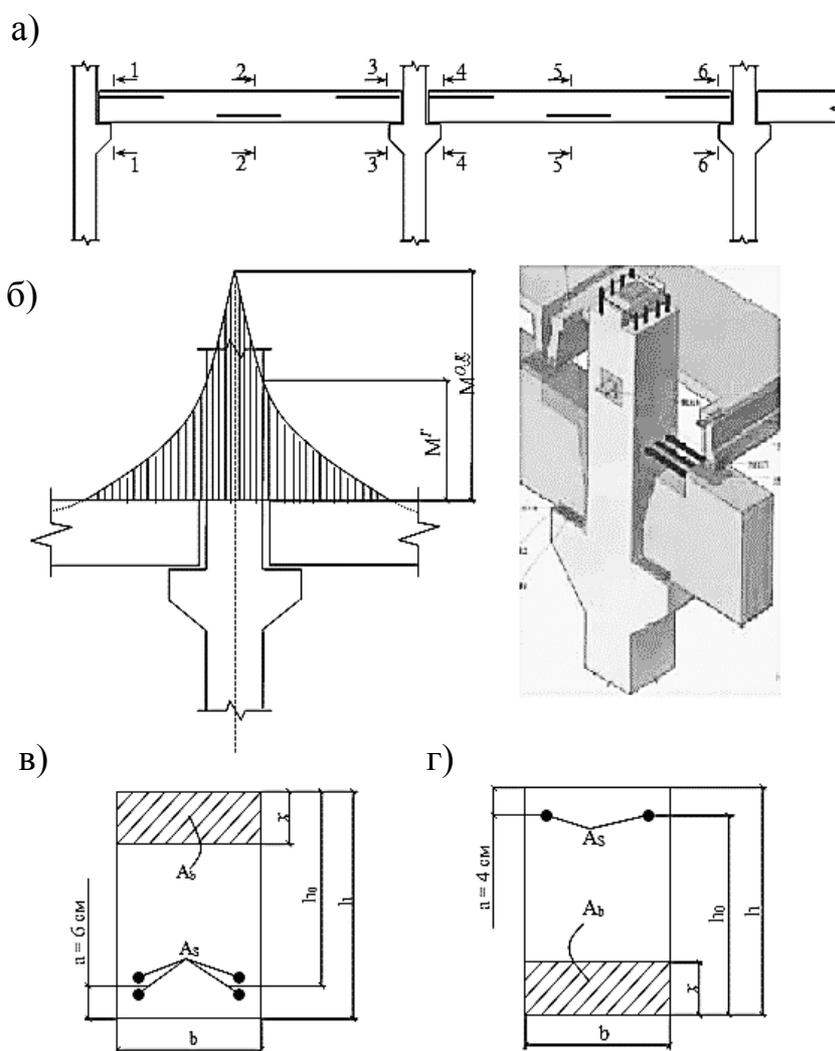


Рис. 2.31. К расчету прочности нормальных сечений ригеля:  
а – расчетные сечения ригеля; б – моменты по грани колонны;  
в – расположение продольной рабочей арматуры в пролете;  
г – расположение продольной рабочей арматуры на опоре

Выполнить операцию создания новых узлов проще всего копированием. Выделим сначала узлы 5, 6, 7 и, раскрыв на вкладке «Создание и редактирование» меню пиктограммы «Копирование», щелкнем по опции «Копирование по параметрам» (рис. 2.32, а). В открывшемся окне «Копирование объектов» зададим смещение по оси X, равное 0,2 м, и применим команду. На расчетной схеме отобразятся узлы 13, 14, 15, находящиеся справа от оси колонн.

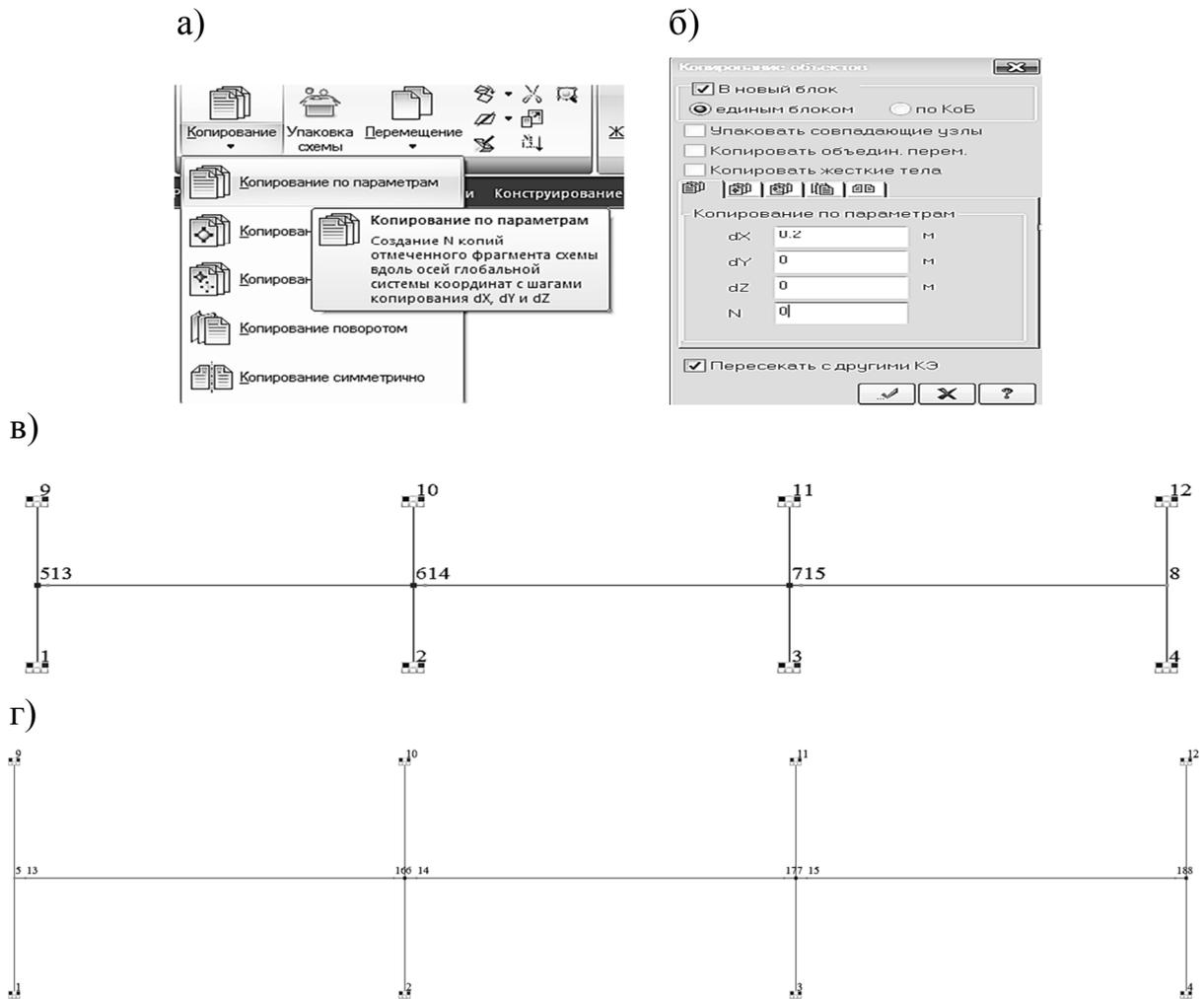


Рис. 2.32. Создание дополнительных узлов 13, 14, 15: а – копирование по параметрам; б – окно задания смещения; в – измененная расчетная схема после создания узлов слева от оси колонн; г – откорректированная расчетная схема

Для создания узлов, находящихся слева от оси колонн, повторим ранее выполненную операцию. Выделим узел 8, снимем выделение с узла 5 (выделение узлов 6 и 7 должно остаться после предыдущего копирования) и выполним те же действия, что и ранее, только заменив значение смещения на -0,2 м.

Запустим повторно файл на расчет и сравним значения момента, действующего по грани крайней левой колонны от комбинации загружений 1 + 2, с теми же усилиями, вычисленными аналитически. Для просмотра результатов расчета воспользуемся инструментом «фонарик».

Выведем на экран значения изгибающего момента, действующего по грани левой колонны. Щелкнем левой кнопкой мыши по КЭ 15 (элемент длиной 0,2 м, расположенный рядом с левой колонной) на расчетной схеме, в открывшемся окне «Элемент 15» выведем значение изгибающего момента сначала для первого варианта загрузки, а затем для второго. Для этого поменяем в окне номер сечения КЭ с 1 (ось колонны) на 2 (грань колонны).

Для первого нагружения  $M_{12гр1} = -65,4$  кН·м (рис. 2.33, а), для второго нагружения  $M_{12гр2} = -93,1$  кН·м (рис. 2.33, б).

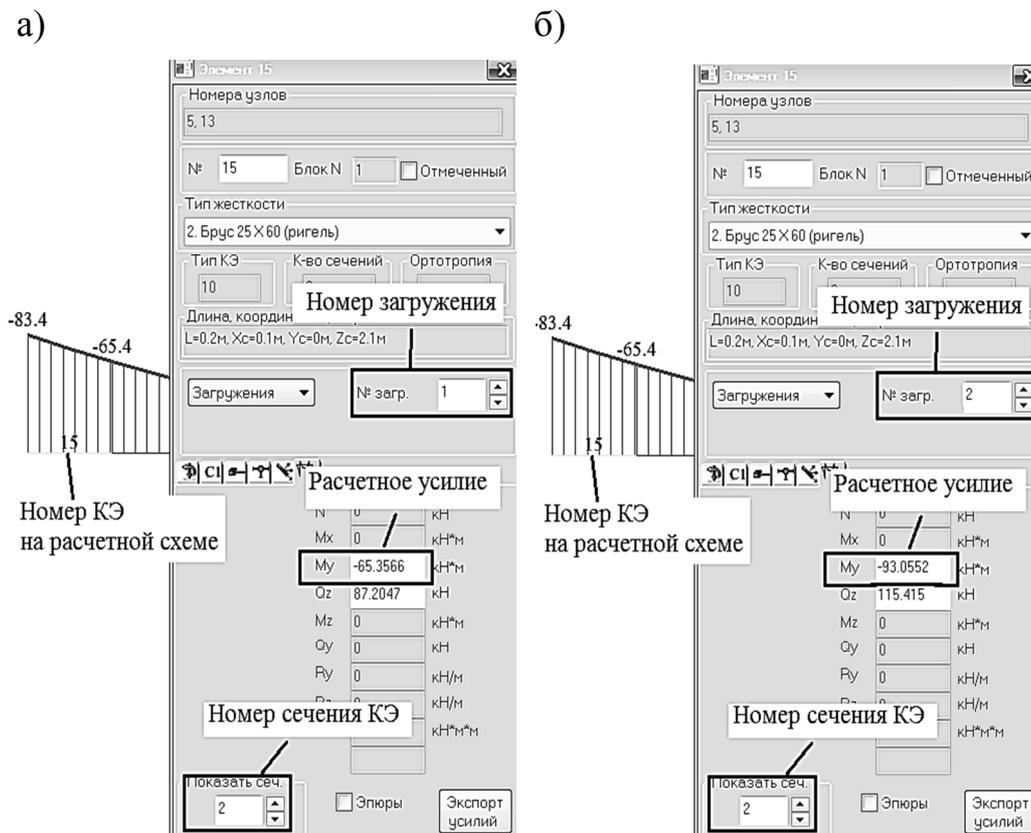


Рис. 2.33. Расчетные моменты по грани колонны:  
а – нагружение 1; б – нагружение 2

Суммарный изгибающий момент по грани колонны от комбинации загружений 1 + 2 будет равен

$$M_{12гр} = M_{12гр1} + M_{12гр2} = -65,4 - 93,1 = -158,4 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Момент, рассчитанный аналитически, равен 159,4 кН·м.

### 2.1.11. Задание таблицы расчетных сочетаний нагрузок. Вычисление усилий по расчетным сочетаниям нагружений

Для решения задач простого статического расчета конструкций (в рамках дисциплин «Соппротивление материалов», «Строительная механика» и т.п.) обычно задаются отдельные загрузки. И конечными результатами расчета являются параметры НДС состояния конструкций (внутренние усилия, перемещения) от отдельных нагрузок. Необходимости вычисления усилий от комбинации нагрузок в таких задачах нет.

Когда же решаются практические задачи проектирования железобетонных и стальных конструкций с применением САПР-систем, необходимо выполнять РСН или рассчитывать на отдельные загрузки, а далее составлять РСУ.

В курсовом проекте расчетные усилия находились с помощью РСН. Вычислялись усилия по комбинациям загружений 1 + 2, 1 + 3, 1 + 4 и из них выбирались максимальные значения. Выполним те же операции в ПК «Лира-САПР». Для создания таблицы РСН необходимо на закладке «Расчет» щелкнуть левой кнопкой мыши на пиктограмму «Таблица РСН» (рис. 2.34).

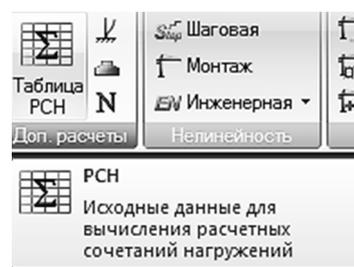


Рис. 2.34. Пиктограмма открытия диалогового окна «Таблица РСН»

В открывшемся диалоговом окне «Расчетные сочетания нагрузок» необходимо объявить 2, 3 и 4 загрузки взаимоисключающими, поставив в соответствующий столбец число 1 напротив этих нагрузок. Выбор числа 1 для обозначения признака взаимоисключаемости произвольный. То есть можно было поставить любое число, но нумерация объектов обычно начинается с единицы.

Вид отдельных загружений (постоянное или кратковременное) будет выбран в соответствии с ранее заданной таблицей отдельных загружений.

Далее сформируем комбинации загружений для первого основного сочетания (см. п. 1.3.3), выделив в левом нижнем углу окно «Основное сочетание» и щелкнув мышью на опцию «Добавить». В таблицу добавятся три столбца «РСН1», «РСН2», «РСН3», соответствующие комбинациям загружений 1 + 2, 1 + 3, 1 + 4. Но если сразу закрыть таблицу РСН, то она не сохранится. Поэтому далее надо нажать на пиктограмму «Сохранить данные»  и только после этого закрыть диалоговое окно. Проверкой того, что таблица сохранилась, будет служить тот факт, что пиктограмма  будет подсвечена (рис. 2.35).



Рис. 2.35. Диалоговое окно «Расчетные сочетания нагрузок»

Просматривать результаты статического расчета ПК «Лира-САПР»

позволяет по отдельным загрузениям, РСН, РСУ, определяющим РСН (рис. 2.36).

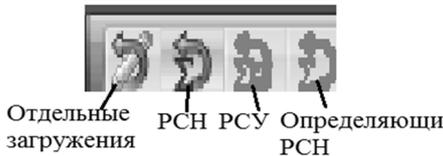


Рис. 2.36. Окно выбора варианта просмотра результатов статического расчета

Запустим снова файл на расчет и сравним результаты расчета усилий, полученных по РСН в ПК «Лира-САПР» с аналитическим решением. Для этого активируем режим просмотра результата расчетов по РСН (см. рис. 2.36).

Для удобства просмотра результатов оставим на экране только КЭ 12 и 14 (элементы ригелей длиной 6,6 м первого и второго пролетов), выделив их и выполнив команду фрагментации (рис. 2.37).

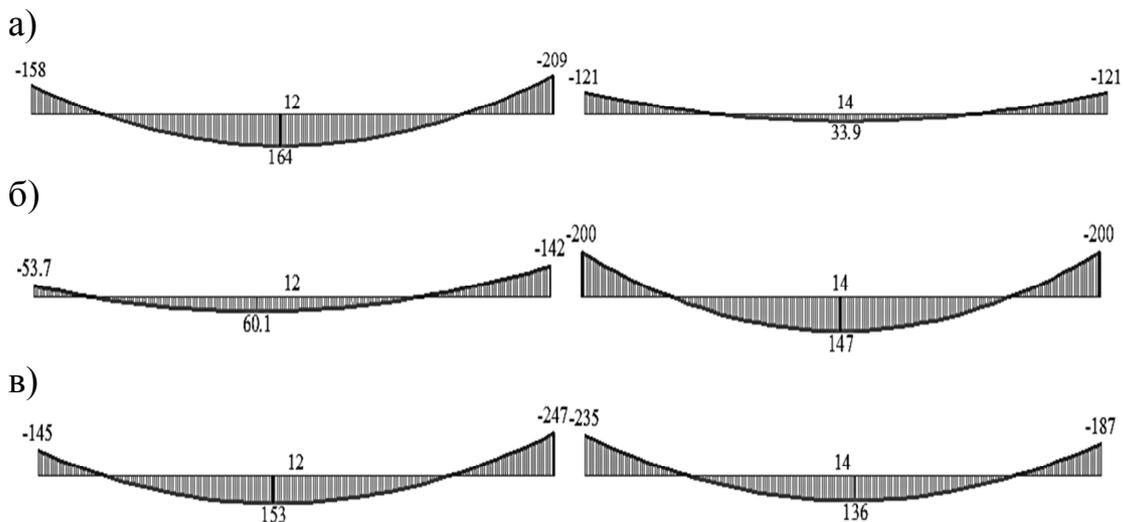


Рис. 2.37. Эпюры изгибающих моментов от комбинаций загрузений: а – РСН1 (1 + 2); б – РСН2 (1 + 3); в – РСН3 (1 + 4)

Проанализировав результаты расчетов по РСН, можно записать расчетные усилия для шести сечений ригеля, в которых необходимо подобрать сечение продольной арматуры:  $M_1 = 158$  кН·м,  $M_2 = 164$  кН·м,  $M_3 = 247$  кН·м,  $M_4 = 235$  кН·м,  $M_5 = 147$  кН·м,  $M_6 = 200$  кН·м.

Те же усилия, вычисленные аналитически [7, с. 69-70]:  $M_1 = 159,4$  кН·м,  $M_2 = 163,7$  кН·м,  $M_3 = 206,6$  кН·м,  $M_4 = 207,7$  кН·м,  $M_5 = 146$  кН·м,  $M_6 = 199,7$  кН·м.

Как мы видим, для всех сечений результаты численного и аналитического расчетов практически совпали, за исключением сечений на второй опоре. Значительное расхождение в этих сечениях связано с тем, что для учета нелинейной работы железобетона эти опорные моменты для РСНЗ (1 + 4) при «ручном» счете уменьшаются на 30 %. Ординаты выравненной эпюры моментов определяются путем добавления к эпюре 1 + 4 треугольной эпюры с величиной  $dM_{21} < 0,3 M_{21}$ .

Но в реальном проектировании обычно нелинейный характер работы железобетона (перераспределение усилий) учитывается только при расчете по второй группе предельных состояний.

**Важное замечание по нумерации КЭ!!!** Нумерация элементов, приведенная в примерах, по разным причинам может отличаться от той нумерации, которая будет у студентов при выполнении РГР. Одна из главных причин – номера сохраняются за удаленными элементами.

Ниже мы часто будем обращаться к информации по КЭ 12 и 14 – основным элементам ригелей первого и второго пролетов. В других расчетных файлах эти элементы могут иметь другие номера.

### 2.1.12. Задание таблицы расчетных сочетаний усилий.

#### *Вычисление усилий по расчетным сочетаниям усилий*

Получение расчетных усилий с помощью задания таблицы РСН удобно тогда, когда имеется небольшое количество нагружений и можно легко определить состав РСН. Если же на конструкцию приложены много разнотипных нагружений, то в этом случае логичнее формировать таблицу РСУ.

Для создания таблицы РСУ необходимо на закладке «Расчет» щелкнуть левой кнопкой мыши на пиктограмму «Таблица РСУ» (рис. 2.38).

В отличие от формирования таблицы РСН при задании таблицы РСУ пользователю не надо вручную составлять комбинации нагружений.



Рис. 2.38. Пиктограмма открытия диалогового окна «Таблица РСУ»

Необходимо только так же, как и при РСН задать логические связи между загрузками (взаимоисключение, знакопеременность, сопутствие). В нашем случае надо для загрузок 2, 3 и 4 в поле «№ группы взаимоисключающих загрузок» проставить число 1 (рис. 2.39) и также, помимо подтверждения изменения параметров нагрузок, в конце подтвердить сохранение таблицы РСУ (пиктограмма в левом верхнем углу окна).

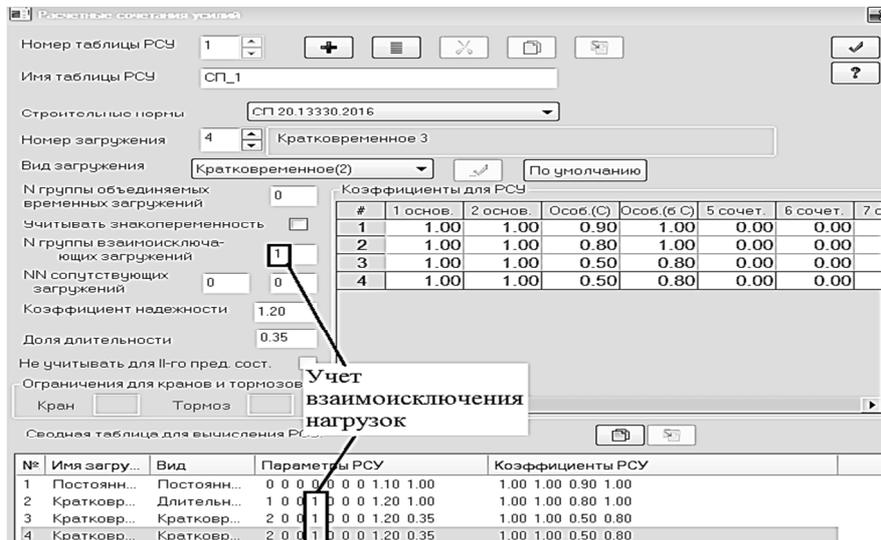


Рис. 2.39. Диалоговое окно «Расчетные сочетания усилий»

Программа далее сама по результатам расчетов на отдельные загрузки определит РСУ – сочетания отдельных загрузок, которые могут быть решающими (наиболее опасными) для каждого проверяемого элемента либо каждого сечения элемента.

Необходимо также сделать важное замечание по принятым расчетным схемам загрузки рамы временными нагрузками (см. рис. 1.2, б – з). Если будет стоять задача расчета рамы с большим количеством пролетов, то наиболее рациональным вариантом по схемам приложения временных нагрузок будет следующее решение: приложить временную нагрузку к каждому отдельному ригелю в отдельных загрузках (количество таких загрузок будет равно числу пролётов). Затем в таблице РСУ никаких взаимоисключений не задавать, за счёт чего программа сама определит невыгодное сочетание.

Такой вариант приложения временных нагрузок можно было бы использовать и для трехпролетной рамы, но в этой работе одна из основных целей – это сравнение численных результатов расчетов с ранее выполненными расчетами в курсовом проекте. Поэтому и были приняты такие варианты загрузки.

Запустим снова файл на расчет и выведем на экран результаты расчета усилий в КЭ 12 и 14, полученных по РСУ в ПК «Ли́ра-САПР». Для этого активизируем режим просмотра результата расчетов по РСУ.

Ниже на рис. 2.40 мы увидим, что программа нашла РСУ для опорных сечений (и они совпали с расчетами по РСН), но «потеряла» расчетные сечения в пролете ригеля!

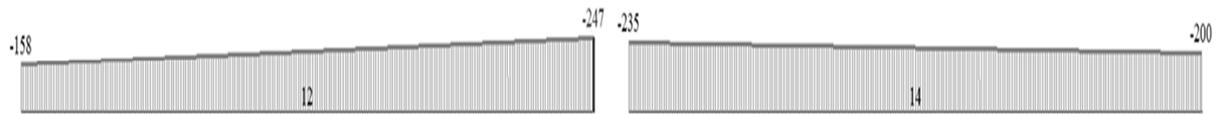


Рис. 2.40. Эпюры изгибающих моментов (РСУ расчетные максимальные только в узлах КЭ)

Эта ошибка связана с тем, что мы не задали дополнительные расчетные сечения по длине КЭ, а программа проверяла сечения только в узлах КЭ. Исправим эту ошибку. Вернемся в режим «Создание и редактирование» и, выделив КЭ 12 и 14, перейдем на закладку «Стержни». Вызовем окно задания числа сечений КЭ, щелкнув на соответствующую пиктограмму, и подтвердим задание пяти сечений по длине КЭ (рис. 2.41).



Рис. 2.41. Задание дополнительных расчетных сечений КЭ:  
а – пиктограмма вызова окна «Расчетные сечения»;  
б – задание числа сечений

Выполним повторный расчет файла и выведем на экран результаты расчета усилий в КЭ 12 и 14, полученных по РСУ в ПК «Ли́ра-САПР» (рис. 2.42).

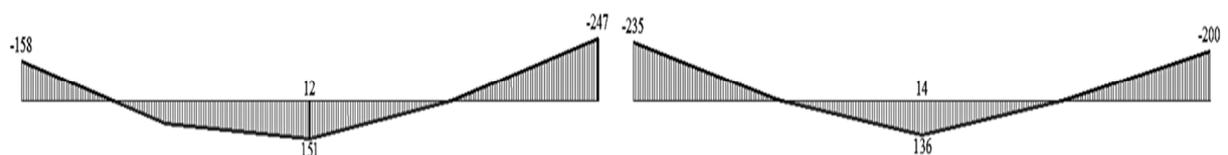


Рис. 2.42. Эпюры изгибающих моментов (РСУ расчетные максимальные только в сечениях КЭ)

Как мы видим на рис. 2.42, программа нашла все расчетные усилия для ригеля, и в отличие от РСН мы можем видеть их на одной эпюре.

Покажем, как еще можно просмотреть РСУ для выбранных КЭ 12 и 14 с помощью интерактивных таблиц. Нажав правую кнопку мыши, вызовем контекстное меню (рис. 2.43, а), в котором щелкнем левой кнопкой мыши на «Интерактивные таблицы». В открывшемся окне «Редактор форм» (рис. 2.43, б) выделим «РСУ Стержни» и подтвердим выбор. В новом окне «Создание таблицы РСУ» отметим опции «Для выбранных элементов» и «РСУ Расчетные» и подтвердим выбор.

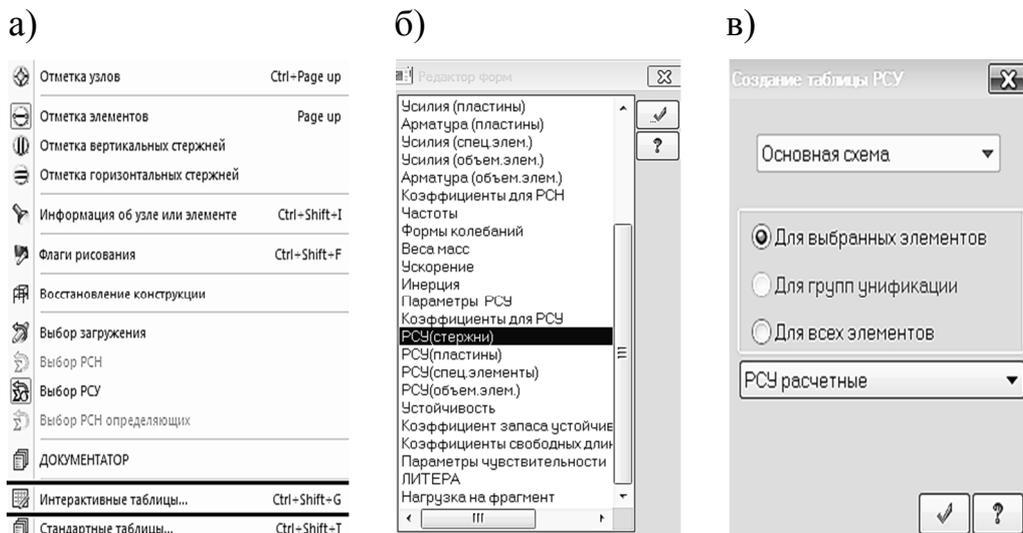


Рис. 2.43. Окна вызова интерактивной таблицы РСУ для КЭ 12 и 14: а – контекстное меню; б – выбор вида таблицы; в – вид вызываемой таблицы

На экране отобразится таблица РСУ для КЭ 12 и 14. На рис. 2.44 выделены шесть расчетных моментов, по которым в дальнейшем будет осуществляться подбор продольной арматуры в сечениях.

№ элем	№ сечен	№ столбца	Кран/сейсм	Группа РСУ	Критерий	Усилия					№ нагрузж		
						N (кН)	Mx (кН*м)	My (кН*м)	Qx (кН)	Qy (кН)			
12	1	1	-	A1	2	0.000	0.000	158.412	M1	10	0.000	0.000	1 2
12	2	1	-	A1	1	0.000	0.000	59.807	0	0	0.000	0.000	1 4
12	2	1	-	A1	13	0.000	0.000	89.164	72	72	0.000	0.000	1 2
12	3	1	-	A1	1	0.000	0.000	163.246	M2	76	0.000	0.000	1 2
12	3	1	-	A1	14	0.000	0.000	151.062	328	328	0.000	0.000	1 4
12	4	1	-	A1	1	0.000	0.000	69.893	112.824	0.000	0.000	0.000	1 2
12	4	1	-	A1	2	0.000	0.000	- 3.664	- 60.153	0.000	0.000	0.000	1 3
12	4	1	-	A1	14	0.000	0.000	38.024	M3	76	0.000	0.000	1 4
12	5	1	-	A1	2	0.000	0.000	- 246.509	24	24	0.000	0.000	1 4
14	1	1	-	A1	2	0.000	0.000	- 235.043	M4	197	0.000	0.000	1 4
14	2	1	-	A1	1	0.000	0.000	60.203	148	148	0.000	0.000	1 3
14	2	1	-	A1	2	0.000	0.000	- 4.730	46.837	0.000	0.000	0.000	1 2
14	2	1	-	A1	13	0.000	0.000	37.244	199	199	0.000	0.000	1 4
14	3	1	-	A1	1	0.000	0.000	146.950	M5	00	0.000	0.000	1 3
14	3	1	-	A1	13	0.000	0.000	136.038	7.301	0.000	0.000	0.000	1 4
14	4	1	-	A1	1	0.000	0.000	61.337	- 97.847	0.000	0.000	0.000	1 4
14	4	1	-	A1	2	0.000	0.000	- 4.730	- 46.837	0.000	0.000	0.000	1 2
14	4	1	-	A1	14	0.000	0.000	60.203	148	148	0.000	0.000	1 3
14	5	1	-	A1	2	0.000	0.000	200.038	M6	196	0.000	0.000	1 3

Рис. 2.44. Таблицы РСУ расчетные для КЭ 12 и 14

В заключение можно привести рекомендации по применению различных вариантов конструктивного расчета сечений:

- по *отдельным усилиям (загружениям)*. В случае, когда на конструкцию действует одна или максимум две нагрузки или для предварительных поверочных расчетов. Возможен расчет стальных конструкций по второй группе предельных состояний. Точный расчет железобетонных конструкций по второй группе предельных состояний возможен только с использованием РСН;

- *PCY*. Такой вариант предпочтителен для расчета конструкций, на которые действует много разнотипных нагрузок, и есть вероятность упустить какие-то определяющие сочетания при таблице РСН;

- *PCN* – единственный вариант для решения нелинейных задач, так как расчет по PCY предполагает принцип суперпозиции, который несправедлив при учете нелинейности. Удобен для расчета по второй группе предельных состояний, так как позволяет в явном виде получить перемещения узлов элементов.

### ***2.1.13. Вычисление усилий от расчетных сочетаний нагрузок в программе MathCAD***

Для контроля численных вычислений усилий в сечениях ригеля выполним аналогичный расчет в программе MathCAD.

Ниже на рис. 2.45 приведены алгоритм расчета усилий для первого пролета ригеля в программе MathCAD и скриншоты результатов статического расчета поперечной рамы в ПК «Лира-САПР».

Результаты численных расчетов на рис. 2.45 приведены как с целью сравнения с аналитическими расчетами, так и в качестве исходных данных для построения эпюр изгибающих моментов в программе MathCAD.

Приведенный алгоритм также позволяет студентам на конкретном практическом примере освежить в памяти базовые знания по дисциплине «Строительная механика» и получить наглядное графическое представление по построению эпюр изгибающих моментов от расчетных сочетаний нагрузжений.

## Построение эпюр изгибающих моментов от расчетных сочетаний нагрузок

Исходные данные

Пролет ригеля  $L_{\text{рр}} := 7 \text{ м}$

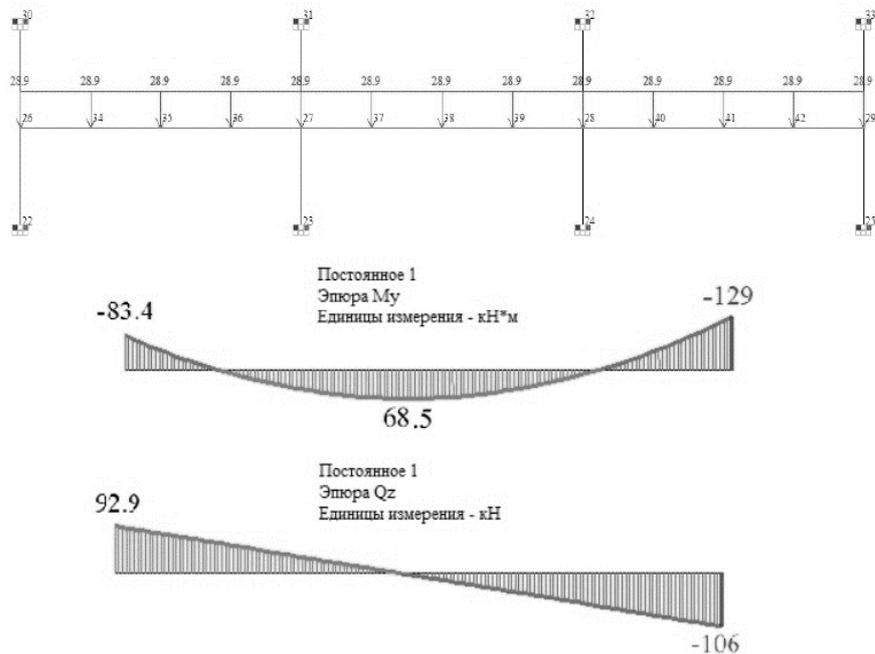
Постоянная погонная нагрузка  $g := 28.386 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$

Временная погонная нагрузка  $v := 35.34 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$

Ширина сечения колонны  $b_c := 0.4 \text{ м}$

Для построения эпюр изгибающих моментов значения усилий на опорах берем из результатов расчета в ПК "Лира-САПР"

### 1 Постоянное загрузеение



$$M_{12} := -83.4 \text{ кН}\cdot\text{м} \quad M_{21} := -129 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$Q_{12} := 92.88 \text{ кН} \quad Q_{21} := -106 \text{ кН}$$

$$M_1(x) := Q_{12} \cdot x - g \cdot \frac{x^2}{2} + M_{12}$$

*Нахождение ординаты максимального момента*

$$\frac{d}{dx} M_1(x) = 0 \quad Q_{12} - g \cdot x_{\text{max}} = 0 \quad x_{\text{max}} := \frac{Q_{12}}{g} = 3.272 \text{ м}$$

Рис. 2.45. Расчет усилий для первого пролета ригеля (начало)

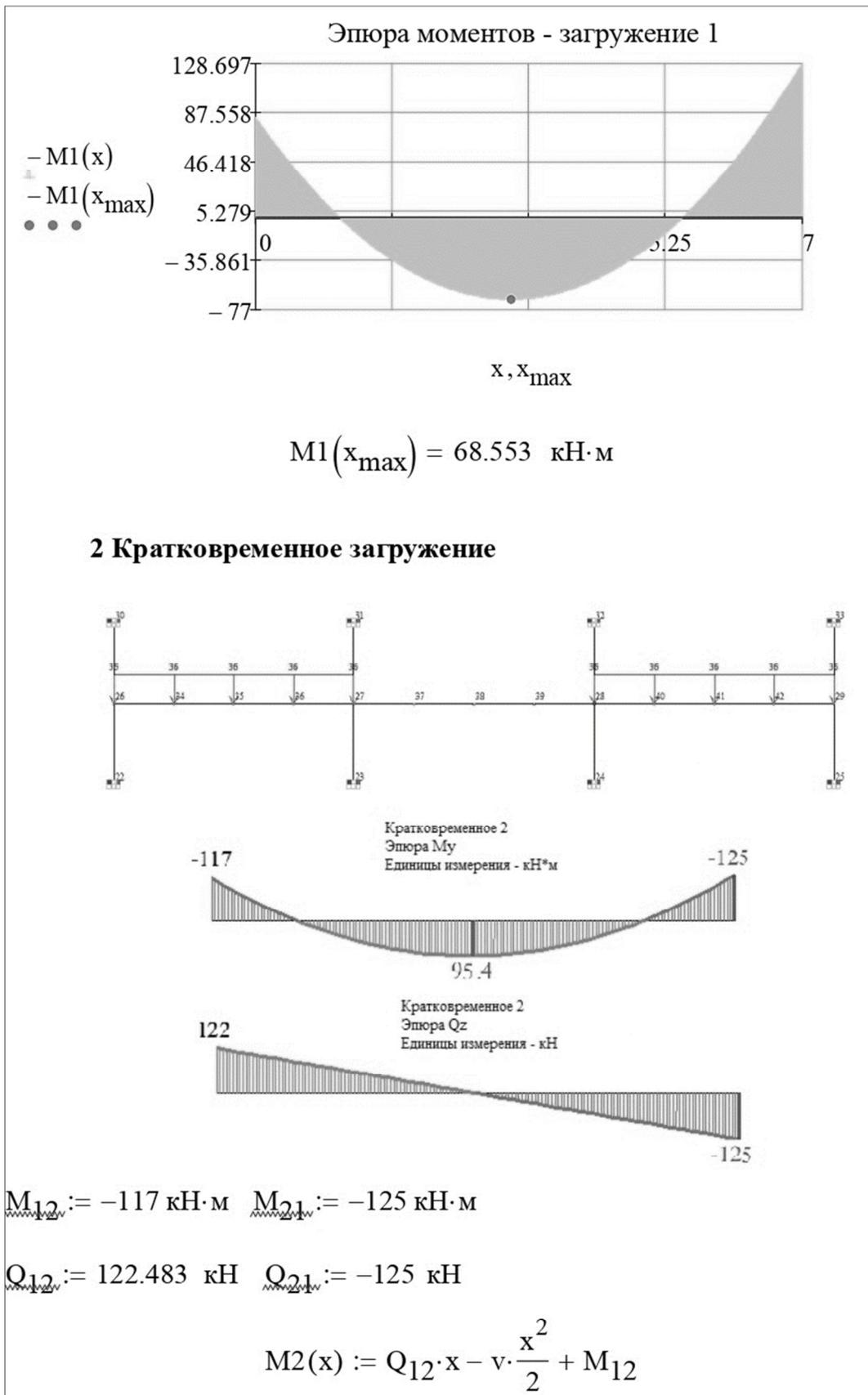
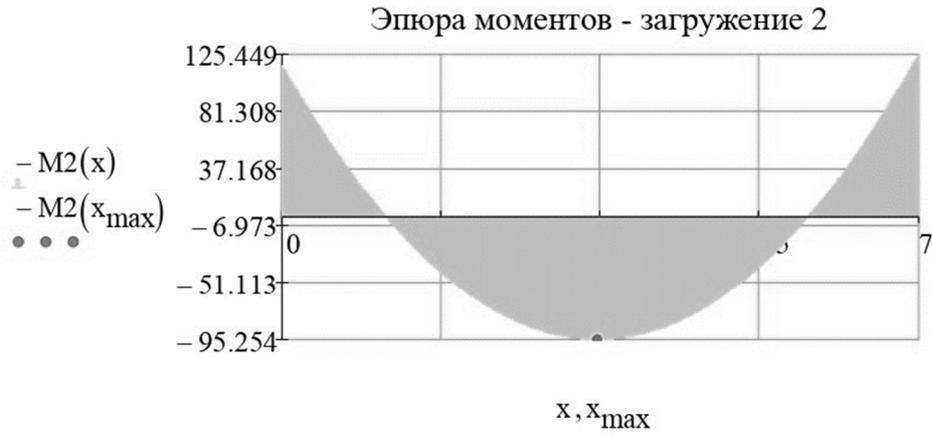


Рис. 2.45. Расчет усилий для первого пролета ригеля (продолжение)

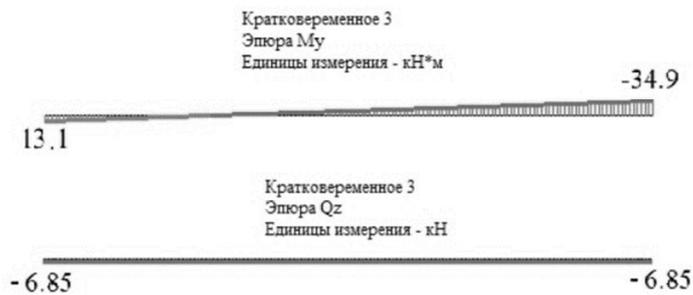
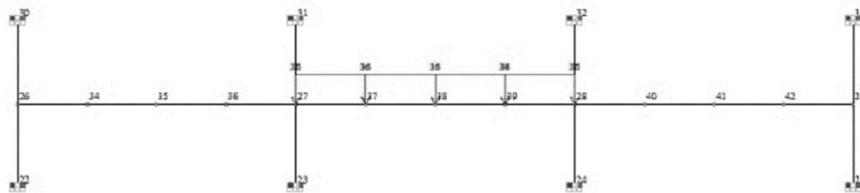
Нахождение ординаты максимального момента

$$\frac{d}{dx} M2(x) = 0 \quad Q_{12} - v \cdot x_{\max} = 0 \quad x_{\max} := \frac{Q_{12}}{v} = 3.466 \text{ м}$$



$$M2(x_{\max}) = 95.254 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

### 3 Кратковременное загрузка

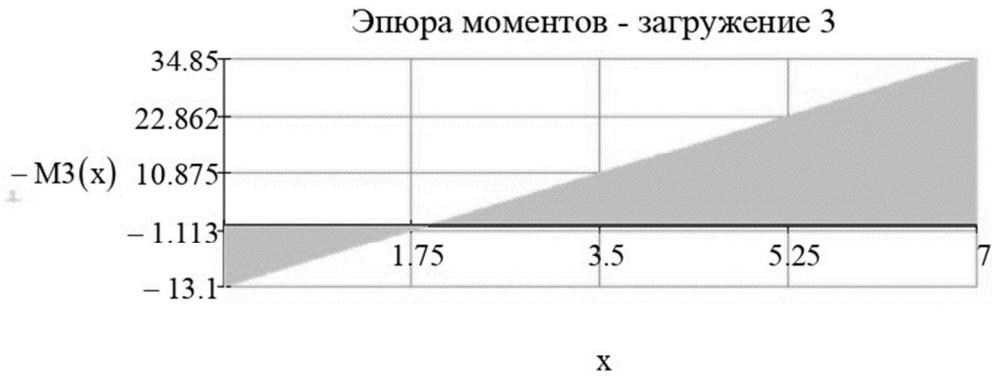


$$M_{12} := 13.1 \text{ кН}\cdot\text{м} \quad M_{21} := -34.9 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

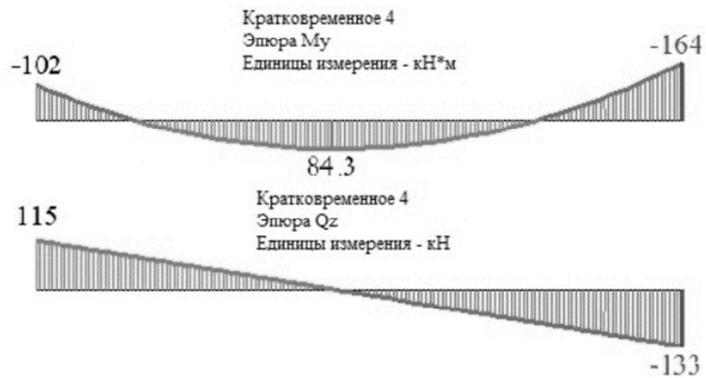
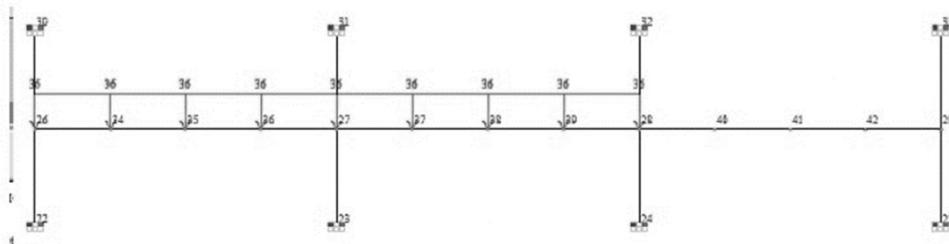
$$Q_{12} := -6.85 \text{ кН} \quad Q_{21} := -6.85 \text{ кН}$$

$$M3(x) := Q_{12} \cdot x + M_{12}$$

Рис. 2.45. Расчет усилий для первого пролета ригеля (продолжение)



#### 4 Кратковременное загрузка



$$M_{12} := -102.25 \text{ кН}\cdot\text{м} \quad M_{21} := -164 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$Q_{12} := 114.83 \text{ кН} \quad Q_{21} := -132 \text{ кН}$$

$$M_4(x) := Q_{12} \cdot x - v \cdot \frac{x^2}{2} + M_{12}$$

*Нахождение ординаты максимального момента*

$$\frac{d}{dx} M_4(x) = 0 \quad Q_{12} - v \cdot x_{\max} = 0 \quad x_{\max} := \frac{Q_{12}}{v} = 3.249 \text{ м}$$

Рис. 2.45. Расчет усилий для первого пролета ригеля (продолжение)

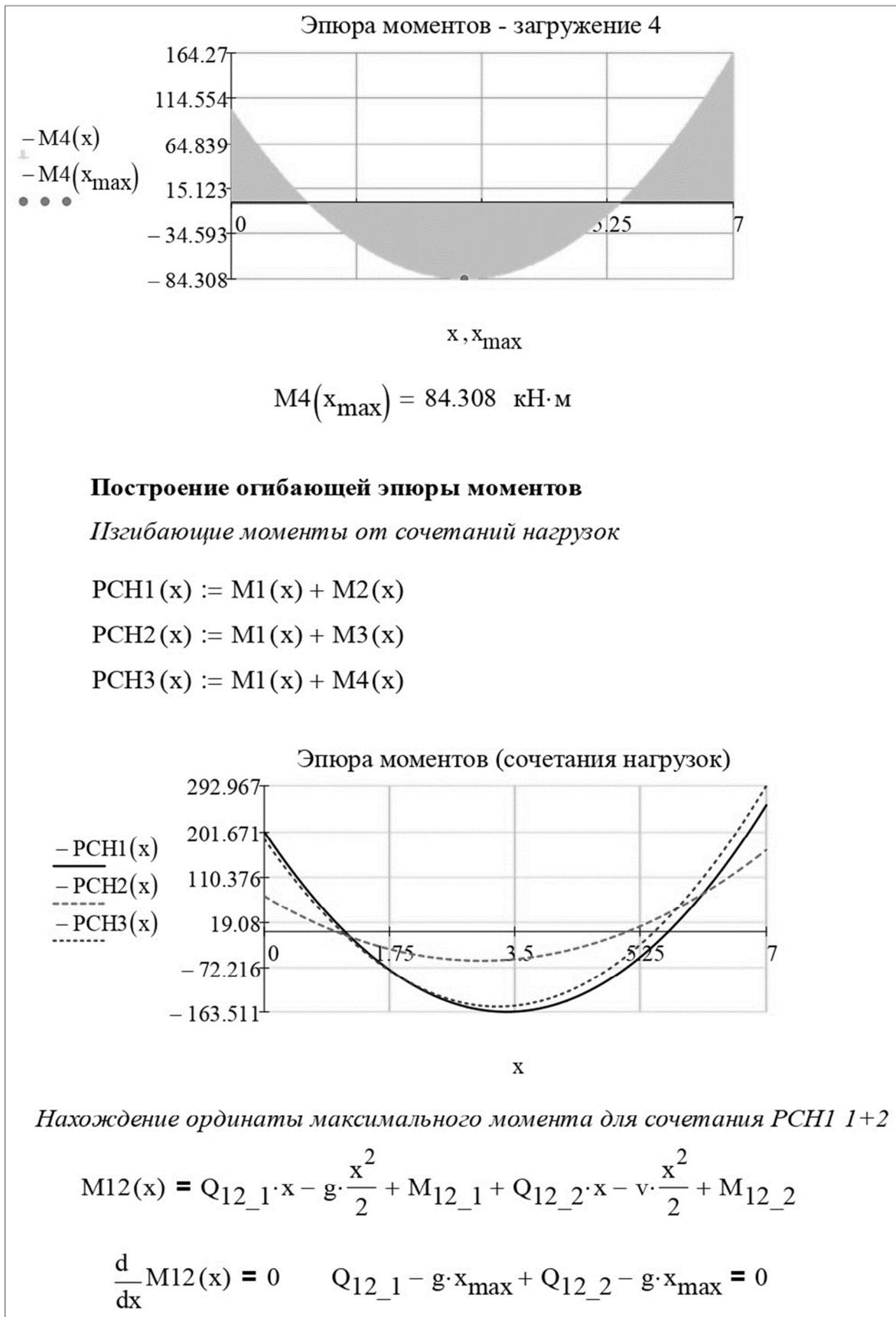
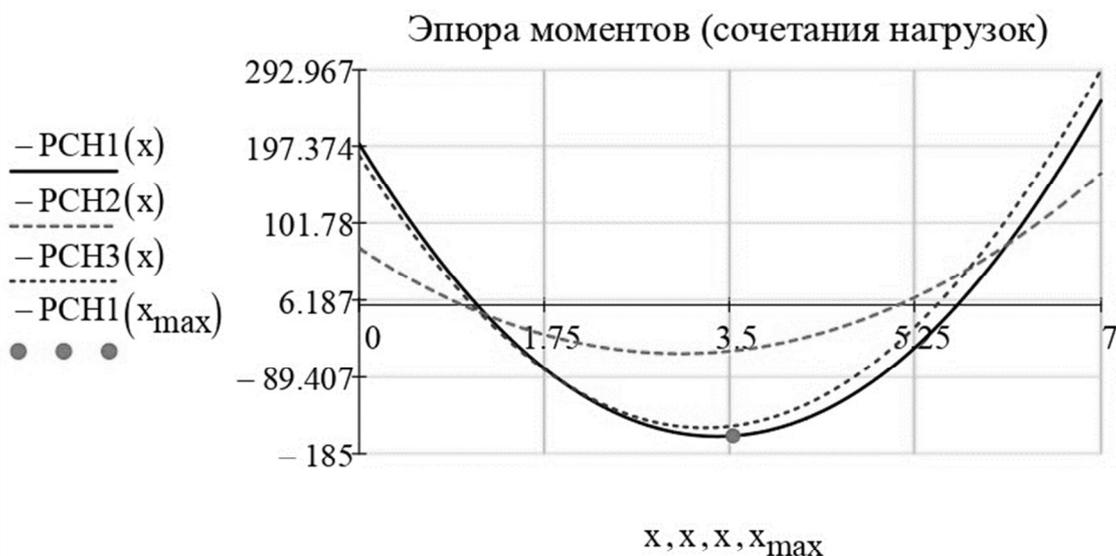


Рис. 2.45. Расчет усилий для первого пролета ригеля (продолжение)

$$Q_{12\_1} := 96.8 \text{ кН} \quad Q_{12\_2} := 128 \text{ кН}$$

$$x_{\max} := \frac{Q_{12\_1} + Q_{12\_2}}{g + v} = 3.528 \text{ м}$$

$$PCH1(x_{\max}) = 162.813 \text{ кН}\cdot\text{м}$$



### Итоговые расчетные усилия

*Сечение 1-2 (на левой опоре ригеля)*

$$PCH1(0.5 \cdot b_c) = -158.602 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

*Сечение 1 (в пролете)*

$$PCH1(x_{\max}) = 162.813 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

*Сечение 2-1 (на правой опоре ригеля)*

$$PCH3(L - 0.5 \cdot b_c) = -246.567 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

Рис. 2.45. Расчет усилий для первого пролета ригеля (окончание)

## 2.2. Конструктивный расчет неразрезного ригеля

### 2.2.1. Выбор варианта конструирования

Необходимо подобрать сечение продольной рабочей арматуры для шести расчетных сечений ригеля по расчетным сочетаниям усилий, полученным в результате статического расчета:  $M_1 = 158$  кН·м,  $M_2 = 164$  кН·м,  $M_3 = 247$  кН·м,  $M_4 = 235$  кН·м,  $M_5 = 147$  кН·м,  $M_6 = 200$  кН·м.

Выполнить несколько вариантов конструктивного расчета в одном файле позволяет ПК «Лира-САПР». Так, например, можно одновременно выполнить расчеты конструкций и по российским нормам, и по зарубежным. Выполним расчеты по двум вариантам расчета сечений – по РСУ и по РСН.

Откроем диалоговое окно «Варианты конструирования» нажатием на пиктограмму «Молоток» , находящуюся в правой нижней части рабочего окна программы. В открывшемся окне необходимо выбрать вариант расчета сечений, нормы проектирования, варианты конструктивного расчета (подбор армирования, проверка заданного армирования).

Если в настройках программы была заранее замена устаревших норм проектирования (СНиП) на актуальные (СП), то корректировать эти опции не надо. Конструктивный расчет будет выполнен по [1].

Особое внимание необходимо обратить на выбор варианта расчета сечений. По умолчанию в программе стоит вариант расчета по отдельным усилиям. Если пользователь даже задаст таблицу РСУ (или РСН) и выполнит статический расчет по РСУ(РСН), но не изменит вариант расчета сечений по отдельным усилиям, то программа подберет заниженное значение армирования по отдельным загружениям!!!

Зададим в первом варианте конструирования расчет сечений по РСУ (рис. 2.46, а), а во втором варианте конструирования – расчет сечений по РСН (рис. 2.46, б).

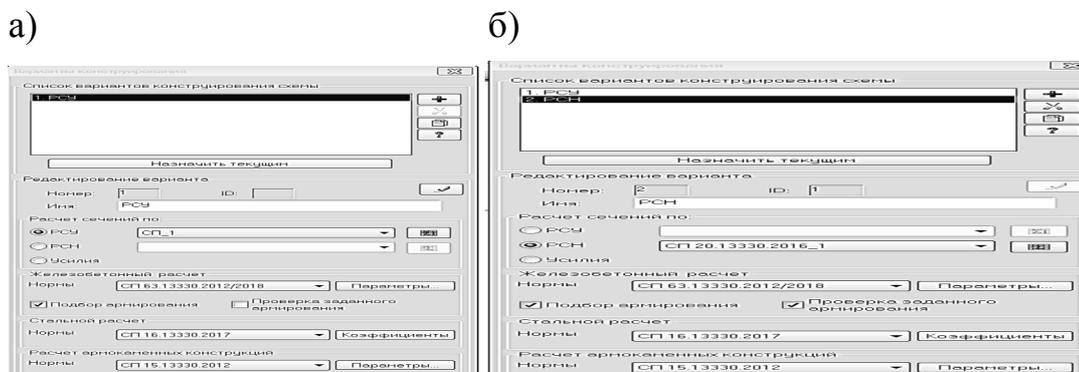


Рис. 2.46. Два варианта конструктивного расчета:  
а – по РСУ; б – по РСН

## 2.2.2. Задание материалов

Для конструктивного расчета элементов ПК «Ли́ра-САПР» используется обобщенное понятие «Материалы», в которое входят различные параметры в зависимости от материалов конструкций: для стальных конструкций – «Материал», «Дополнительные характеристики», «Ограничения подбора»; армокаменных конструкций – «Кладка», «Арматура», «Усиление»; железобетонных конструкций – «Тип», «Бетон», «Арматура».

Откроем диалоговое окно «Жесткости и материалы» (рис. 2.47) щелчком мыши по соответствующей пиктограмме  и перейдем на закладку «ЖБ» – задание параметров для железобетонных конструкций.

Откроем окно «Материалы для расчета ЖБ конструкций» (рис. 2.48) щелчком мыши по кнопке «Редактировать».

Окно «Материалы для расчета ЖБ конструкций» является универсальным, в котором можно задавать параметры конструирования для разных типов КЭ. Для рассматриваемой задачи необходимо задать данные в таблицах «Стержень», «Бетон» и «Арматура». В зависимости от того, какая таблица является активной, меняется содержимое правой части диалогового окна «Материалы для расчета ЖБ конструкций».

Перечислим те основные параметры, которые должны будем задавать (изменять) в таблице «Стержень» (см. рис. 2.48, а) для нашей задачи:

- 1) название типа;
- 2) вид расчета;
- 3) армирование;
- 4) система;
- 5) выделять угловые стержни;
- 6) расстояние от граней элемента до центра тяжести арматуры;
- 7) расчет по предельным состояниям второй группы.

Название типа выберем по смыслу решаемой задачи – «Ригель».

Параметр «Вид расчета» определяет характер НДС элемента. Всего программа предлагает пять таких вариантов: стержень, балка, колонна рядовая, колонна первого этажа, пилон.

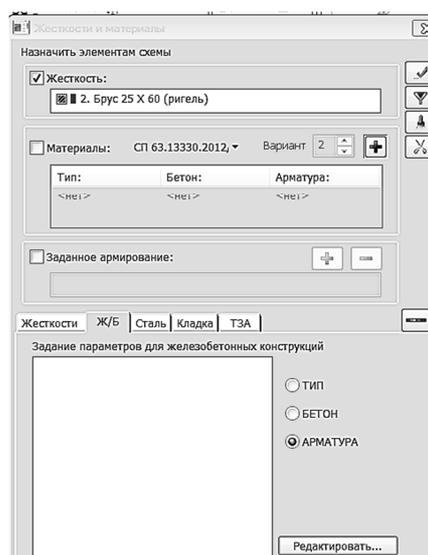
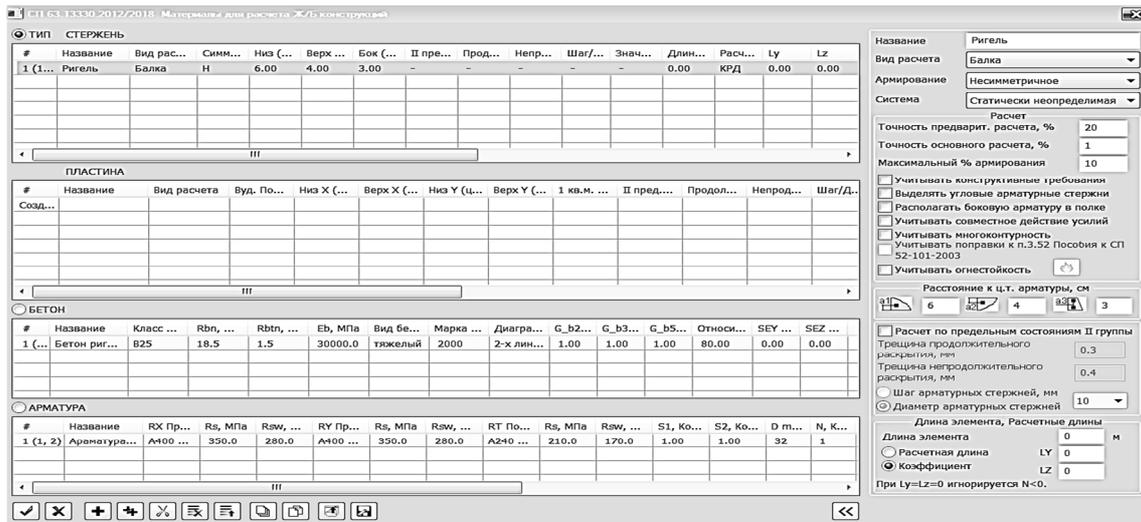
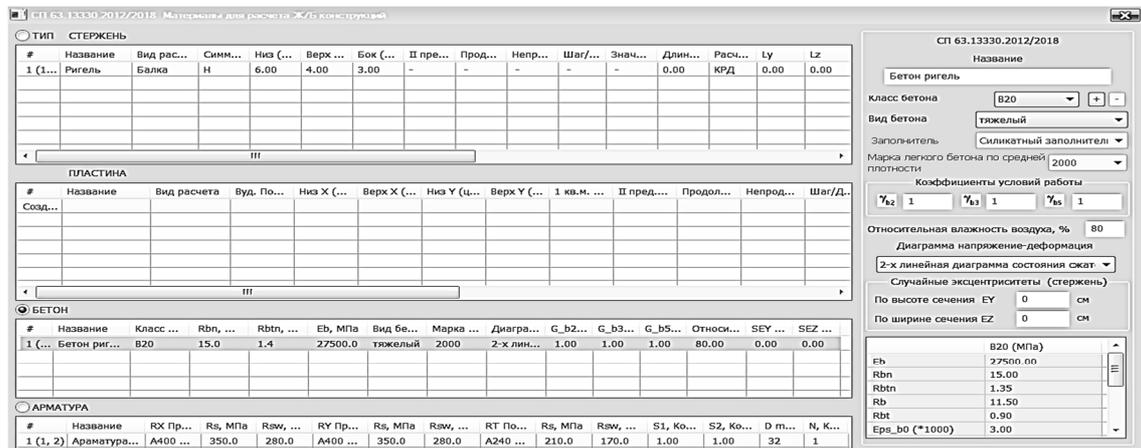


Рис. 2.47. Диалоговое окно «Жесткости и материалы»

а)



б)



в)

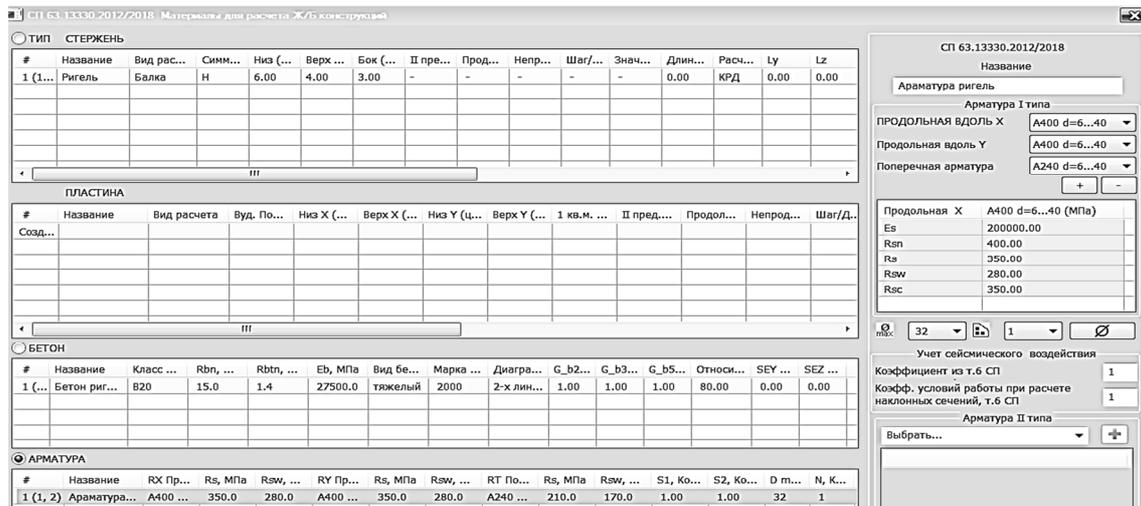


Рис. 2.48. Диалоговое окно «Материалы для расчета ЖБ конструкций»: а – режим «Стержень»; б – режим «Бетон»; в – режим «Арматура»

При выборе вида расчета «Стержень» арматура в сечении будет подобрана без учета всех конструктивных особенностей. Этот вид позволяет получить несимметричное армирование сразу относительно обеих осей  $Y1$  и  $Z1$ . Это наиболее общее НДС, когда в элементе действуют изгибающие моменты в двух плоскостях, крутящий момент, продольные и поперечные силы.

Вид расчета «Балка» предполагает конструктивный расчет на действие поперечной силы и изгибающего момента без учета действия продольной силы.

Для вида расчета «Колонна рядовая» арматура в сечении будет подобрана с учетом гибкости в двух направлениях.

Вид расчета «Колонна первого этажа» предполагает подбор арматуры в сечении с учетом наличия заделки в фундаменте.

Для вида расчета «Пилон» арматура в сечении будет подобрана только вдоль граней большего размера.

Для нашего расчетного случая выбираем вид расчета «Балка».

Параметр «Армирование» предполагает три типа армирования: 1) симметричное; 2) несимметричное; 3) симметричное и несимметричное.

Тип армирования определяет способ расположения арматуры в сечении.

Как правило, для балок назначается несимметричное армирование относительно горизонтальной оси сечения, а для колонн – симметричное. Поэтому выбираем из списка тип армирования «Несимметричное».

Параметр «Система» (статически определимая или неопределимая система) влияет на величину эксцентриситета при подборе продольной арматуры во внецентренно сжатых элементах. На расчет ригеля (изгибаемого элемента) этот параметр не влияет, но отметим все-таки правильный тип системы – статически неопределимая.

По параметру «Выделять угловые арматурные стержни» выбирается алгоритм подбора продольной арматуры.

Для стержневых элементов ПК «Лира-САПР» может подобрать угловую арматуру ( $AU1, AU2, AU3, AU4$ ), расположенную в четырех углах сечения, и боковую арматуру ( $AS1, AS2, AS3, AS4$ ), расположенную по четырем граням сечения.

Так как для балок обычно подбирается арматура по двум боковым граням, то мы снимаем отметку напротив параметра «Выделять угловые арматурные стержни».

Алгоритм расчета с выделением угловых стержней является оптимальным при расчете сжатых элементов. В этом случае программа сначала подбирает максимально допустимое сечение угловых стержней, и только в случае если его оказывается недостаточно, то дальше дополнительно рассчитывается сечение арматуры по боковым граням. При этом площадь арматуры, которую необходимо расположить в угловых зонах, добавляется к площади нижней и верхней продольной арматур. По сравнению с алгорит-

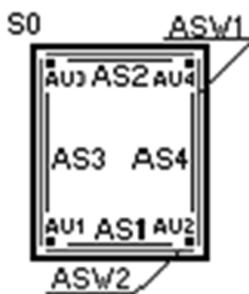


Рис. 2.49. Армирование

мом распределенной арматуры этот подход, как правило, позволяет уменьшить требуемую площадь арматурных стержней.

На рис. 2.49 показана схема армирования элемента прямоугольного сечения. Помимо продольной арматуры сечения, выполняется также расчет поперечной арматуры  $ASW1$  и  $ASW2$ .

В параметре «Расстояние от граней элемента до центра тяжести арматуры» зададим для нижней арматуры расстояние  $a_1 = 6$  см (двухрядное расположение), для верхней арматуры расстояние  $a_2 = 4$  см (однорядное расположение). Расстояние  $a_3$  до боковой грани не влияет на расчет балок, поэтому оставляем его значение по умолчанию.

Отмеченный параметр «Расчет по предельным состояниям второй группы» предполагает расчет как по первой, так и по второй группе предельных состояний. Снимаем его активацию для чистоты эксперимента сравнения результатов численного и аналитического расчетов. Выполняется расчет арматуры только по прочности, а сечение арматуры, подобранной ПК «Лира-САПР» по второй группе, может оказаться определяющим.

После задания параметров таблицы «Стержень» активизируем таблицу «Бетон», щелкнув по ней левой кнопкой мыши. В этой таблице необходимо задать: название; класс бетона; вид бетона; коэффициенты условий работы бетона.

Зададим по исходным данным (см. рис. 2.48, б) класс бетона В20, вид бетона тяжелый, все коэффициенты условий работы бетона равными 1 (подробно о выборе значений коэффициентов смотреть в п. 1.3.2).

Перейдем на таблицы «Арматура», щелкнув по ней левой кнопкой мыши. Зададим в ней (см. рис. 2.48, в) класс продольной арматуры А400 по оси X (по оси Y продольная арматура задается для армирования плит), все коэффициенты условий работы бетона равными 1.

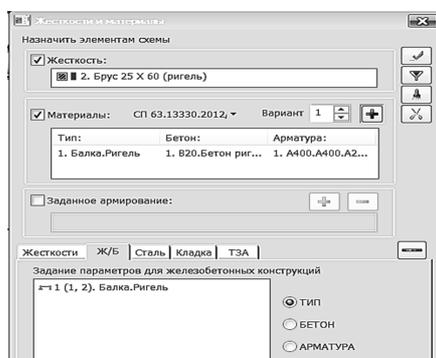


Рис. 2.50. Окно задания материалов элементам ригеля

Подтвердим заданные материалы, щелкнув по кнопке  в левой нижней части диалогового окна «Материалы для расчета ЖБ конструкций». Далее назначим материалы элементам ригеля. Для этого в окне «Жесткости и материалы» в подокне «Материалы» (рис. 2.50) выставим тип, бетон и арматуру. Обратите внимание, чтобы при этом в окне «Жесткость» была выставлена жесткость

ригеля. Затем выделим элементы ригеля и применим активные материалы на элементы ригеля, нажав на пиктограмму  в правом верхнем углу окна «Жесткости и материалы». Если все выполнено правильно, то материалы должны присвоиться КЭ, а выделение с них исчезнуть.

Контроль присвоения материалов можно проделать как с помощью инструмента «фонарик», так и выводом на экран номеров заданных материалов.

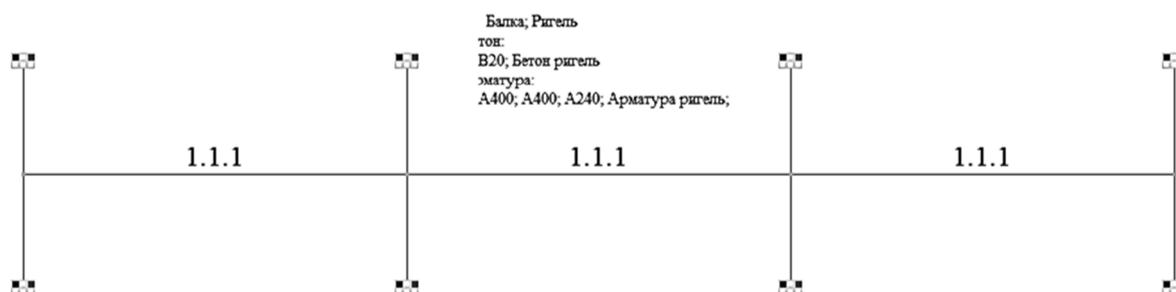


Рис. 2.51. Расчетная схема рамы с выведенными на экран номерами материалов

На рис. 2.51 показаны выведенные на экран номера материалов. Необходимо отметить, что если выполняется конструктивный расчет разных элементов здания (балок, плит, колонн, фундаментов и т.д.), то часто материалы «Бетон» и «Арматура» у всех одинаковые. Принципиальное отличие будет только в типе армирования.

### ***2.2.3. Подбор армирования. Просмотр результатов конструктивного расчета***

После задания материалов запустим файл на расчет. Для просмотра результатов расчета армирования перейдем на закладку «Железобетон». Если этой закладки нет на экране, то необходимо поменять стиль интерфейса на «Лента ЖБК» или «Лента Плюс».

В задаче мы задавали два варианта конструирования схемы. Первый – расчет по РСУ, второй – расчет по РСН. Ниже будем приводить результаты расчетов по РСУ. Предлагаем студентам самим убедиться, что при изменении варианта конструирования с помощью инструмента «молоток»  результаты расчетов будут абсолютно идентичными.

Много возможностей представляет ПК «Лири-САПР» для просмотра результатов расчета армирования. Начнем с самого наглядного – просмотра мозаик и эпюр армирования. С помощью фрагментации оставим на экране только КЭ 12 и 14. По умолчанию ПК «Лири-САПР» предлагает вариант «Симметрия», и пиктограммы просмотра армирования неактивны.

Начинающего пользователя это вводит в заблуждение: «Значит, расчет не выполнен?». Нет, просто мы не задавали расчет симметричного армирования. Поэтому на закладке «Железобетон» необходимо перейти в режим «Несимметрия» (рис. 2.52) из предлагаемых трех вариантов армирования.

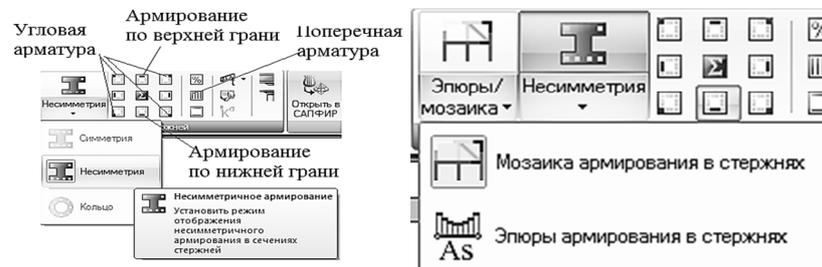


Рис. 2.52. Закладка «Армирование стержней»

Далее щелчками по пиктограммам «Армирование нижней грани» и «Армирование верхней грани» последовательно отобразим на экране мозаики подобранного армирования (рис. 2.53).

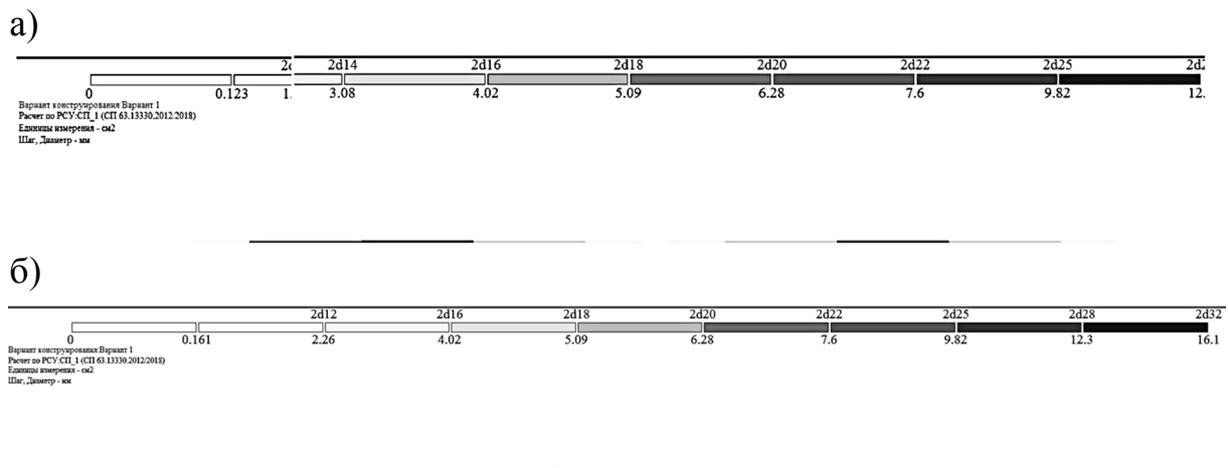


Рис. 2.53. Мозаики подобранного армирования:  
а – нижнее армирование; б – верхнее армирование

Для нижней арматуры программа подобрала максимальный диаметр 28 мм, для верхней – 32 мм. Надо отметить, что значения максимальных сечений арматуры 12,3 и 16,1 см<sup>2</sup>, отображаемых на мозаиках, – это не требуемое сечение арматуры, а выбранное.

Для того чтобы увидеть минимально требуемую по прочностному расчету площадь сечения арматуры, необходимо перейти на просмотр эпюр армирования. На рис. 2.54 приведены эпюры нижнего и верхнего армирования.

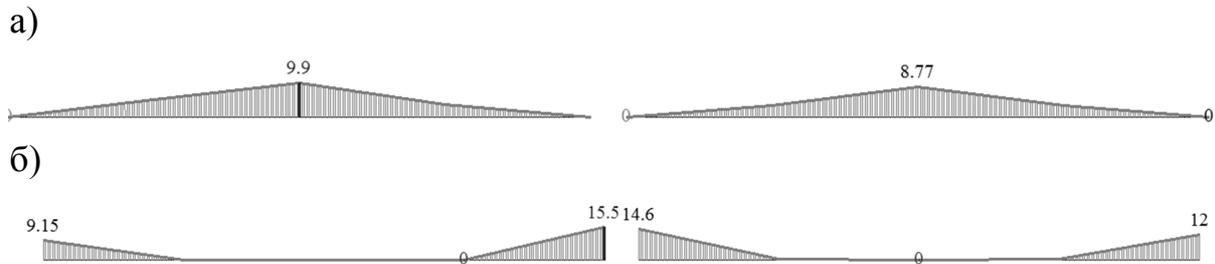


Рис. 2.54. Эпюры требуемого армирования: а – нижнее армирование; б – верхнее армирование

Для шести расчетных моментов ( $M_1 = 158$  кН·м,  $M_2 = 164$  кН·м,  $M_3 = 247$  кН·м,  $M_4 = 235$  кН·м,  $M_5 = 147$  кН·м,  $M_6 = 200$  кН·м) программа вычислила шесть требуемых сечений арматуры:  $A_{s1} = 9,15$  см<sup>2</sup>,  $A_{s2} = 9,9$  см<sup>2</sup>,  $A_{s3} = 15,5$  см<sup>2</sup>,  $A_{s4} = 14,6$  см<sup>2</sup>,  $A_{s5} = 8,77$  см<sup>2</sup>,  $A_{s6} = 12$  см<sup>2</sup>.

Принимаем по сортаменту следующую рабочую арматуру:

сечение 1 – 2d25 А400 с  $A_s = 9,82$  см<sup>2</sup>;

сечение 2 – 4d18 А400 с  $A_s = 10,18$  см<sup>2</sup>;

сечение 3 – 2d32 А400 с  $A_s = 16,09$  см<sup>2</sup>;

сечение 4 – 2d32 А400 с  $A_s = 16,09$  см<sup>2</sup>;

сечение 5 – 2d16 + 2d18 А400 с  $A_s = 4,02 + 5,09 = 9,11$  см<sup>2</sup>;

сечение 6 – 2d28 А400 с  $A_s = 12,32$  см<sup>2</sup>.

Приведем еще один наглядный способ просмотра результата расчетов армирования. Активизируем инструмент «фонарик» и щелкнем левой кнопкой мыши по КЭ 12. Затем последовательно меняя номер сечения (1, 3 и 5), просмотрим подобранные сечения армирования (рис. 2.55).

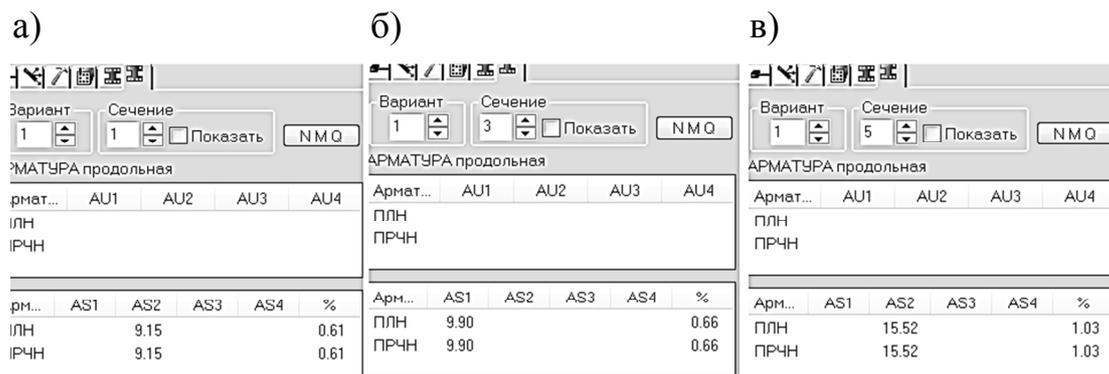


Рис. 2.55. Результаты расчета армирования КЭ 12: а – сечение 1; б – сечение 3; в – сечение 5

Также можно получить результаты армирования в табличном виде. Раскрыв меню «Документация», щелкнем по пиктограмме «Таблицы результатов для ЖБ» (рис. 2.56, а). В открывшемся окне «Таблицы» выберем

формат таблиц «Арматура в элементах», арматуру «В стержнях» и применим выбор .

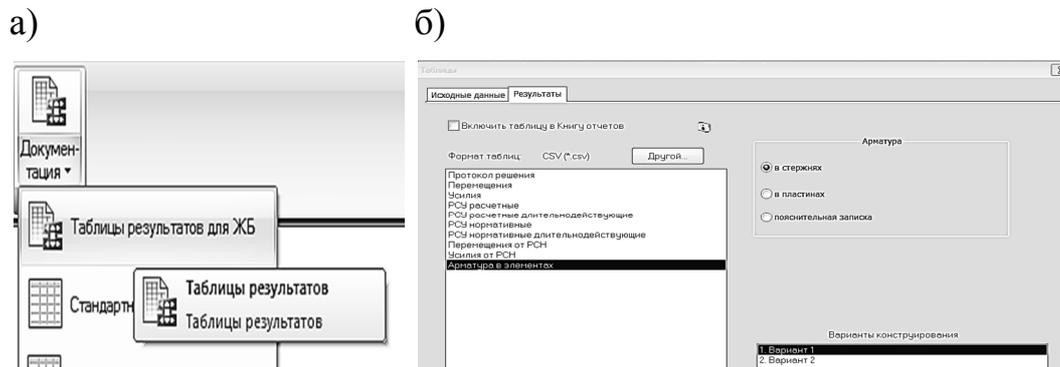


Рис. 2.56. Таблица результатов расчетов армирования:  
а – выбор таблицы ЖБ; б – параметры таблицы ЖБ

жб рама пособие:28012021: Арматура в стержнях [Вариант 1] (01)

Открыть CSV Сохранить Сверстать Предыдущий Следующий Копировать Фильтр На схему Обновить Шрифт Развернуть В отчет

Результаты армирования в стержнях СП 63.13330.2012/2018 (Вариант 1)  
Продольная арматура: сн2 Поперечная: сн2 Шир.трещин: мм

ГР	Элемент	Сечение	С/НС	AU1	AU2	AU3	AU4	AS1	AS2	AS3	AS4	%	ASW1
1	Балка / Прямоугольник/ В=25.00/ Н=60.00 см/ L=6.60 м/ Бетон В20/ Арматура: продольная А400/ поперечная А240												
1	41	1	Н						9.15			0.61	9.09
1	41	1	Н						9.15			0.61	
1	41	2	Н				5.1					0.34	2.98
1	41	2	Н				5.1					0.34	
1	41	3	Н				9.9					0.66	
1	41	3	Н				9.9					0.66	
1	41	4	Н				3.6					0.24	2.98
1	41	4	Н				3.6					0.24	
1	41	5	Н						15.52			1.03	11.27
1	41	5	Н						15.52			1.03	
1	43	1	Н						14.63			0.98	10.48
1	43	1	Н						14.63			0.98	
1	43	2	Н				3.38		0.15			0.23	2.98
1	43	2	Н				3.38		0.15			0.23	
1	43	3	Н				8.77					0.58	
1	43	3	Н				8.77					0.58	
1	43	4	Н				3.45		0.15			0.24	2.98
1	43	4	Н				3.45		0.15			0.24	
1	43	5	Н						12			0.8	9.79
1	43	5	Н						12			0.8	

Рис. 2.57. Таблица результатов расчета армирования КЭ 12 и 14

В открывшейся таблице результатов расчета армирования (рис. 2.57) выделим шесть расчетных значений армирования для шести расчетных сечений.

#### 2.2.4. Подбор армирования в программе MathCAD

Для того чтобы убедиться в корректности выполненных расчетов подбора продольной арматуры в ПК «Лири-САПР», выполним аналогичные расчеты в программе MathCAD. Человеку свойственно ошибаться, и ошибка, сделанная не от незнания, а по простой невнимательности, не перестает быть ошибкой и ведет к тем же печальным результатам. Поэтому контроль вычислений и анализ полученных результатов однозначно должен занимать не меньше времени, чем сам расчет.

На рис. 2.58 приведен пример расчета армирования в программе MathCAD.

1 Исходные данные

Ширина сечения  $b := 25$  см Высота сечения  $h := 60$  см

Материалы: - бетон тяжелый класса В20; арматура класса А400

- расчетное сопротивление бетона класса В20  $R_b := 11.5$  МПа
- начальный модуль упругости бетона класса В20  $E_b := 2.75 \cdot 10^4$  МПа
- расчетное сопротивление арматуры класса А400  $R_s := 350$  МПа
- модуль упругости арматуры класса А400  $E_s := 2 \cdot 10^5$  МПа
- верхний защитный слой  $a := 4$  см, нижний защитный слой  $a_s := 6$  см
- коэффициент, учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки  $\gamma_{b1} := 1$
- расчетные максимальные моменты:  $M_1 := 158$  кН·м,  $M_2 := 164$  кН·м,  $M_3 := 247$  кН·м,  $M_4 := 235$  кН·м,  $M_5 := 147$  кН·м,  $M_6 := 200$  кН·м.

2 Определяем рабочую высоту сечения

$$h_{01} := h - a = 56 \text{ см}$$

$$h_0 := h - a_s = 54$$

3 Определяем коэффициент  $\alpha_m$

$$\alpha_{m1} := \frac{M_1 \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.188$$

$$\alpha_{m2} := \frac{M_2 \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_{01}^2} = 0.182$$

$$\alpha_{m3} := \frac{M_3 \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.295$$

$$\alpha_{m4} := \frac{M_4 \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.28$$

$$\alpha_{m5} := \frac{M_5 \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_{01}^2} = 0.163$$

$$\alpha_{m6} := \frac{M_6 \cdot 10^5}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0^2} = 0.239$$

Рис. 2.58. Подбор армирования для шести сечений ригеля (начало)

4 Вычисляем коэффициент, определяющий характер разрушения железобетонного элемента

$$\varepsilon_{b2} := 0.0035$$

$$\varepsilon_{s\_el} := \frac{R_s}{E_s} = 0.00175$$

$$\xi_R := \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s\_el}}{\varepsilon_{b2}}} = 0.533$$

$$\alpha_R := \xi_R \cdot \left(1 - \frac{\xi_R}{2}\right) = 0.391$$

5 Определяем характер разрушения

$$\text{Разрушение} := \begin{cases} \text{"пластическое"} & \text{if } \alpha_{m1} \leq \alpha_R \\ \text{"хрупкое"} & \text{if } \alpha_{m1} > \alpha_R \end{cases}$$

Разрушение = "пластическое"

6 Определяем расчетную площадь рабочей арматуры

$$A_{s1} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_{m1}}\right)}{R_s \cdot 100} = 9.344 \text{ см}^2$$

$$A_{s2} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_{01} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_{m2}}\right)}{R_s \cdot 100} = 9.309 \text{ см}^2$$

$$A_{s3} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_{m3}}\right)}{R_s \cdot 100} = 15.929 \text{ см}^2$$

$$A_{s4} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_{m4}}\right)}{R_s \cdot 100} = 14.955 \text{ см}^2$$

$$A_{s5} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_{01} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_{m5}}\right)}{R_s \cdot 100} = 8.238 \text{ см}^2$$

$$A_{s6} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot h_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \alpha_{m6}}\right)}{R_s \cdot 100} = 12.283 \text{ см}^2$$

Рис. 2.58. Подбор армирования для шести сечений ригеля (окончание)

### **2.2.5. Автоматизация расчета армирования в программе MathCAD**

Программа MathCAD, помимо контроля результатов численных расчетов конструкций с применением САПР-систем, предлагает широкие возможности для анализа результатов расчетов.

Ниже на рис. 2.59 приведен алгоритм расчета изгибаемых железобетонных элементов с двойным армированием. Сначала, исходя из предположения равенства высоты сжатой зоны бетона граничному значению  $\xi = \xi_R$ , вычисляется площадь сечения сжатой арматуры  $A'_s$ , а затем, исходя из условия равенства нулю суммы проекций на продольную ось всех усилий, действующих на элемент, находится площадь сечения растянутой арматуры  $A_s$ .

В предлагаемой методике для подбора и проверки сечения арматуры применяются пользовательские функции, для которых аргументами являются физико-механические характеристики материалов и значения внутренних усилий. Варьируя определенными параметрами, можно легко получать наглядные табличные и графические решения. Также на рис. 2.59 приведены графики подбора растянутой и сжатой арматур в зависимости от расчетного изгибающего момента. Это позволяет не выполнять трудоемкие и громоздкие расчеты, а легко подбирать (или проверять) по графикам-номограммам сечение арматуры.

Но надо отметить обязательное условие целесообразности применения программы MathCAD как в учебном процессе, так и в реальном проектировании.

Если студент (или проектировщик) не владеет хорошей теоретической базой в области строительных конструкций или не до конца понимает, как работает функционал программы MathCAD, использование ее категорически запрещено, так как это обязательно приведет к ошибкам. Первоначально студент должен получить хорошую практику выполнения «ручных» расчетов конструкций, приобрести твердые навыки по применению функционала MathCAD для решения различных задач, и только после этого можно применять эту программу для решения серьезных задач. Без этого MathCAD, как и ПК «Лира-САПР», будет «черным ящиком», которому точно доверять нельзя.

Материалы изгибаемого элемента с двойным армированием

Класс\_бетона := "B25"    Класс\_стали := "A400"

Модуль упругости стали класса A400     $E_s := 2 \cdot 10^8$  кПа

$$R_b := \begin{cases} 11500 & \text{if Класс\_бетона} = \text{"B20"} \\ 14500 & \text{if Класс\_бетона} = \text{"B25"} \\ 17000 & \text{if Класс\_бетона} = \text{"B30"} \end{cases}$$

$R_b = 14500$  кПа

$$R_{sc} := \begin{cases} 350000 & \text{if Класс\_стали} = \text{"A400"} \\ 435000 & \text{if Класс\_стали} = \text{"A500"} \end{cases}$$

$R_{sc} = 350000$  кПа

$$R_s := \begin{cases} 350000 & \text{if Класс\_стали} = \text{"A400"} \\ 435000 & \text{if Класс\_стали} = \text{"A500"} \end{cases}$$

$R_s = 350000$  кПа

$b := 0.25$  м - ширина сечения;

$h := 0.60$  м - высота сечения;

$a := 0.05$  м - расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до внешнего растянутого края сечения;

$\gamma_{b1} := 1$  - коэффициент, учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки;

$a'_s := 0.03$  м - расстояние от центра тяжести сжатой арматуры до внешнего сжатого края сечения;

$M := 500$  кН·м - максимальный изгибающий момент в середине пролета;

$h_0 := h - a = 0.55$  м - рабочая высота сечения.

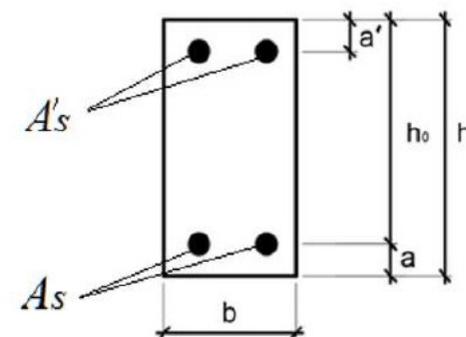


Рис. 2.59. Алгоритм расчета элементов с двойным армированием (начало)

$\epsilon_{b2} := 0.0035$  - предельная относительная деформация сжатого бетона при напряжениях, равных  $R_b$

Граничная относительная высота сжатой зоны

$$\epsilon_{sel} := \frac{R_s}{E_s} = 0.00175 \xi_R := \frac{0.8}{1 + \frac{\epsilon_{sel}}{\epsilon_{b2}}} = 0.533$$

Функция определения расчетной площади продольной сжатой арматуры прямоугольного профиля

$$A'_s(R_b, R_{sc}, b, h_0, M_{ult}, \gamma_{b1}, a'_s) := \frac{M_{ult} - \gamma_{b1} \cdot R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \left[ \xi_R \cdot \left( 1 - \frac{\xi_R}{2} \right) \right]}{R_{sc} \cdot (h_0 - a'_s)}$$

Функция для подбора сжатой арматуры, см<sup>2</sup>

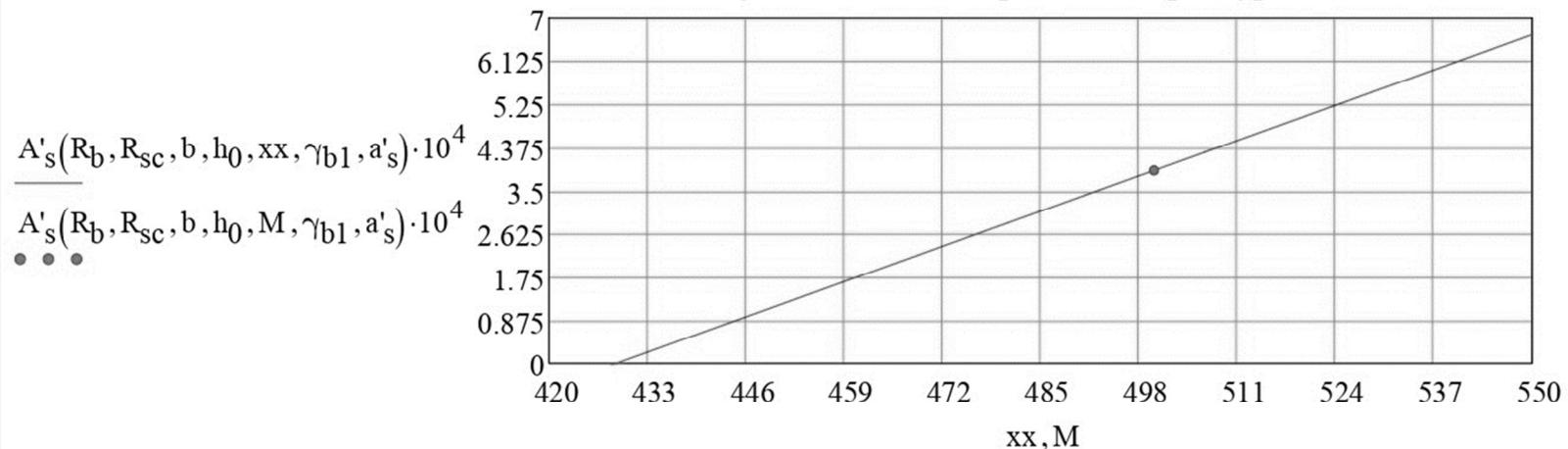


Рис. 2.59. Алгоритм расчета элементов с двойным армированием (продолжение)

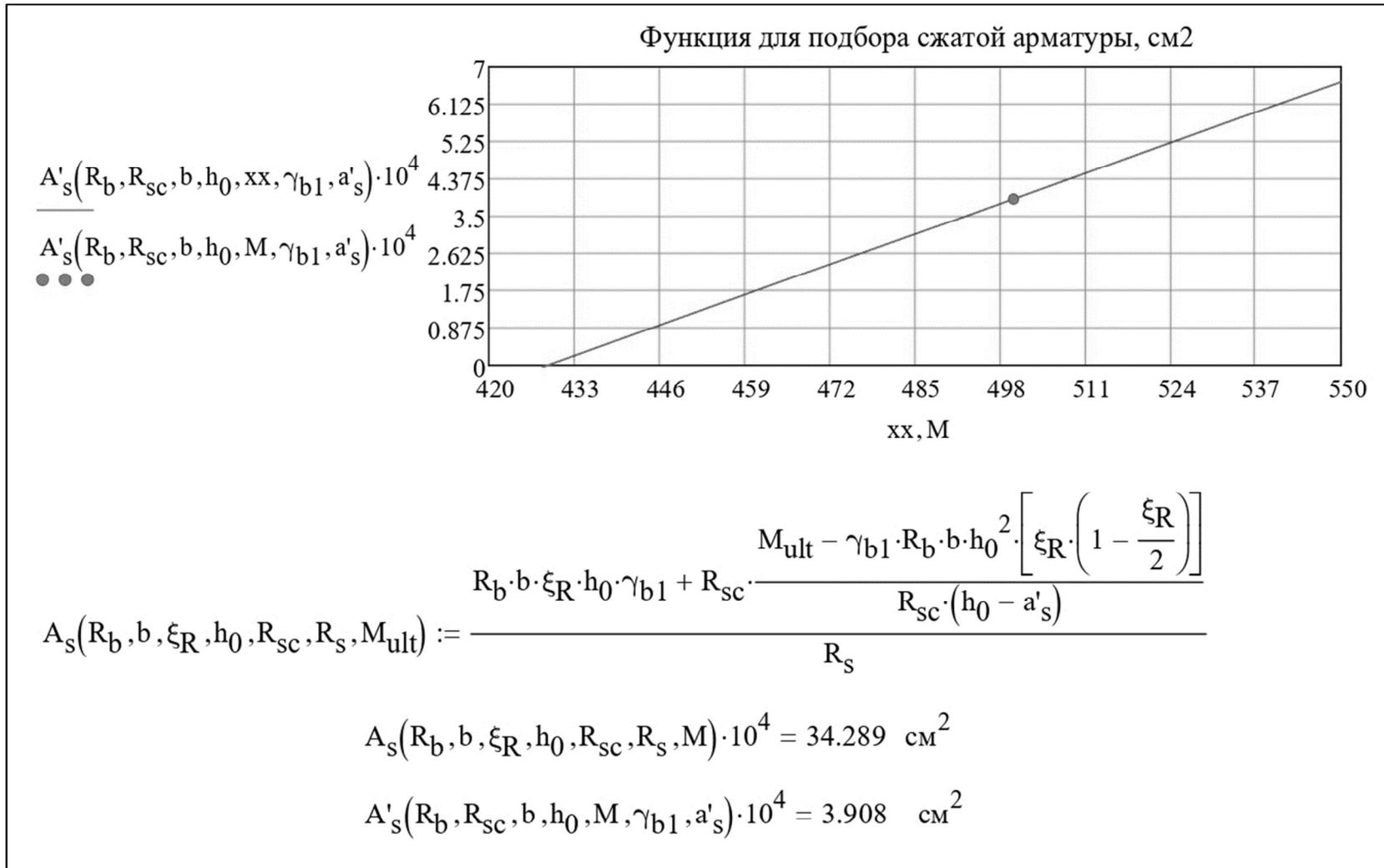


Рис. 2.59. Алгоритм расчета элементов с двойным армированием (окончание)

### 3. ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО ЗАДАННОМУ АРМИРОВАНИЮ

При расчете изгибаемых железобетонных элементов по несущей способности есть две основные задачи.

Подбор сечения арматуры по расчетным усилиям. Эту задачу обычно решают при проектировании новых зданий и сооружений. И в основном именно такие расчеты студенты выполняют в стенах вуза.

Но не менее важной является обратная задача – проверка несущей способности заданного армирования по расчетным усилиям. Такие расчеты обычно выполняются при обследовании и реконструкции. Приведем один из характерных примеров. В результате реконструкции увеличилось значение расчетной нагрузки, и надо знать, выдержит ли существующая конструкция или надо делать усиление.

Начиная с версии 2017, ПК «Ли́ра-САПР» позволяет выполнять проверку несущей способности железобетонных элементов. Также последние версии ПК «Ли́ра-САПР» позволяют выполнять конструктивный расчет для железобетонных сечений, усиленных жесткой арматурой. Например, обойма из стальных уголков – одно из самых распространенных на практике усилений.

В данном разделе будут рассмотрены задачи проверки несущей способности сечений неразрезного ригеля с применением ПК «Ли́ра-САПР». Для контроля вычислений и лучшего понимания решаемой задачи расчеты параллельно будут выполнены в программе MathCAD.

#### 3.1. Принятое армирование ригеля. Определение несущей способности сечений в программе MathCAD

Рассмотрим, каким образом армируется ригель не только рабочей, но и конструктивной арматурой.

Ранее по требуемой площади сечения арматуры была подобрана по сортаменту следующая арматура:

сечение 1 – 2d25 A400 с  $A_s = 9,82 \text{ см}^2$ ;

сечение 2 – 4d18 A400 с  $A_s = 10,18 \text{ см}^2$ ;

сечение 3 – 2d32 A400 с  $A_s = 16,09 \text{ см}^2$ ;

сечение 4 – 2d32 A400 с  $A_s = 16,09 \text{ см}^2$ ;

сечение 5 – 2d16 + 2d18 A400 с  $A_s = 4,02 + 5,09 = 9,11 \text{ см}^2$ ;

сечение 6 – 2d28 A400 с  $A_s = 12,32 \text{ см}^2$ .

В средней части пролетов ригеля верхнюю арматуру конструктивно принимаем 2d12 A400 с  $A_s = 2,26 \text{ см}^2$ .

Часть нижней арматуры обрываем, и до опор доводим по 2d18 A400 с  $A_s = 5,09 \text{ см}^2$ .

На рис. 3.1 показано армирование ригеля.

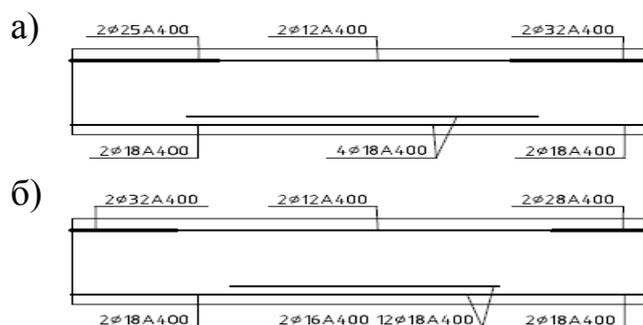


Рис. 3.1. Армирование ригеля продольной рабочей арматурой: а – первый пролет; б – второй пролет

Так как принятые по сортаменту сечения арматуры превышают значения сечений, требуемых по расчету, то, очевидно, мы имеем определенный запас прочности. Например, в первом сечении по расчету требуется площадь сечения арматуры, равная  $9,15 \text{ см}^2$ . Принятое наиболее оптимальное армирование в виде двух стержней диаметром 25 мм имеет площадь сечения, равную  $9,82 \text{ см}^2$ . Разность между принятой и требуемой площадями сечения ( $9,82 - 9,19 = 0,63 \text{ см}^2$ ) определяет запас прочности.

Алгоритм определения максимального изгибающего момента, который может воспринять прямоугольное сечение с одиночным армированием, достаточно простой. Так как нам известна площадь сечения растянутой арматуры, то можно из уравнения (1.1) найти высоту сжатой зоны сечения

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b}.$$

Зная высоту сжатой зоны, можно найти суммарную продольную силу сжатого бетона, а из уравнения (1.2) найти предельный максимальный момент, который может воспринять сечение

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x).$$

Ниже на рис. 3.2 приведен пример вычисления предельных максимальных моментов, которые могут воспринять расчетные сечения ригеля, и соответствующих коэффициентов запаса. Коэффициенты запаса получились небольшими, так как они определяются только тем фактом, что мы не можем принять площадь сечения арматуры строго по расчету, а ориентируемся на стандартные сечения сортамента. По сути, мы просто выполняем контроль расчета подбора сечения арматуры.

7 Определение максимальных изгибающих моментов для шести расчетных сечений ригеля:

Принятое армирование

Сечение 1 – 2Ø25 А400	$A_{s2d25} := \frac{\pi \cdot 2.5^2}{4} \cdot 2 = 9.817 \text{ см}^2$
Сечение 2 – 4Ø18 А400	$A_{s4d18} := \frac{\pi \cdot 1.8^2}{4} \cdot 4 = 10.179 \text{ см}^2$
Сечение 3 – 2Ø32 А400	$A_{s2d32} := \frac{\pi \cdot 3.2^2}{4} \cdot 2 = 16.085 \text{ см}^2$
Сечение 4 – 2Ø32 А400	$A_{s2d32} := \frac{\pi \cdot 3.2^2}{4} \cdot 2 = 16.085 \text{ см}^2$
Сечение 5 – 2Ø16+2Ø18 А400	$A_{s2d18\_2d16} := \frac{\pi \cdot (1.6^2 + 1.8^2)}{4} \cdot 2 = 9.111 \text{ см}^2$
Сечение 6 – 2Ø28 А400	$A_{s2d28} := \frac{\pi \cdot 2.8^2}{4} \cdot 2 = 12.315 \text{ см}^2$

8 Вычисление высоты сжатой зоны:

Сечение 1	$x_{2d25} := \frac{R_s \cdot A_{s2d25}}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = 11.952 \text{ см}$
Сечение 2	$x_{4d18} := \frac{R_s \cdot A_{s4d18}}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = 12.392 \text{ см}$
Сечение 3	$x_{2d32} := \frac{R_s \cdot A_{s2d32}}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = 19.582 \text{ см}$
Сечение 4	$x_{2d32} := \frac{R_s \cdot A_{s2d32}}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = 19.582 \text{ см}$
Сечение 5	$x_{2d18\_2d16} := \frac{R_s \cdot A_{s2d18\_2d16}}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = 11.091 \text{ см}$
Сечение 6	$x_{2d28} := \frac{R_s \cdot A_{s2d28}}{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot b} = 14.992 \text{ см}$

Рис. 3.2. Проверка несущей способности для шести сечений ригеля (начало)

## 9 Вычисление несущей способности сечений

Сечение 1

$$M_{2d25} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot x_{2d25} \cdot (h_{01} - 0.5 \cdot x_{2d25})}{10^5} = 171.889 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сечение 2

$$M_{4d18} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot x_{4d18} \cdot (h_0 - 0.5 \cdot x_{4d18})}{10^5} = 170.306 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сечение 3

$$M_{2d232} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot x_{2d32} \cdot (h_{01} - 0.5 \cdot x_{2d32})}{10^5} = 260.145 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сечение 4

$$M_{2d232} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot x_{2d32} \cdot (h_{01} - 0.5 \cdot x_{2d32})}{10^5} = 260.145 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сечение 5

$$M_{2d18\_2d16} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot x_{2d18\_2d16} \cdot (h_0 - 0.5 \cdot x_{2d18\_2d16})}{10^5} = 154.507 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сечение 6

$$M_{2d28} := \frac{R_b \cdot \gamma_{b1} \cdot 100 \cdot b \cdot x_{2d28} \cdot (h_{01} - 0.5 \cdot x_{2d28})}{10^5} = 209.065 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Рис. 3.2. Проверка несущей способности для шести сечений ригеля  
(продолжение)

## 10 Вычисление коэффициентов запаса прочности

$$\text{Сечение 1} \quad K_{31} := \frac{M_{2d25}}{M_1} = 1.088$$

$$\text{Сечение 2} \quad K_{32} := \frac{M_{4d18}}{M_2} = 1.038$$

$$\text{Сечение 3} \quad K_{33} := \frac{M_{2d232}}{M_3} = 1.053$$

$$\text{Сечение 4} \quad K_{34} := \frac{M_{2d232}}{M_4} = 1.107$$

$$\text{Сечение 5} \quad K_{35} := \frac{M_{2d18\_2d16}}{M_5} = 1.051$$

$$\text{Сечение 6} \quad K_{36} := \frac{M_{2d28}}{M_6} = 1.045$$

Рис. 3.2. Проверка несущей способности для шести сечений ригеля (окончание)

Когда же в задачах обследования или реконструкции решаются аналогичные задачи, то там коэффициенты запаса могут оказаться намного больше 1 или даже меньше 1. Во втором случае, очевидно, требуется усиление элементов.

### 3.2. Создание типов заданного армирования

Рассмотрим, каким образом в ПК «Лира-САПР» задается армирование элементов. Откроем диалоговое окно «Задание и корректировка типов заданного армирования», раскрыв меню пиктограммы «Заданное армирование» и щелкнув кнопкой мыши по опции «Типы заданного армирования» (рис. 3.3).

Диалоговое окно «Задание и корректировка типов заданного армирования» предназначено для формирования списка типов заданного армирования. Само понятие «тип заданного армиро-

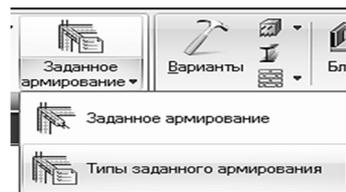


Рис. 3.3. Открытие окна ТЗА

вания» (ТЗА) можно сравнить с понятием «тип жесткости». Если в жесткостях задаются параметры сечений стержней и пластин, то в этом случае задаются параметры арматурных стержней и их расположение в сечении элемента. Прочностные характеристики арматурных стержней принимаются в соответствии с нормами конструирования железобетонных конструкций, назначенными для текущего варианта конструирования.

Для нашей задачи необходимо первоначально задать пять ТЗА, так как третье и четвертое сечения армируются идентично.

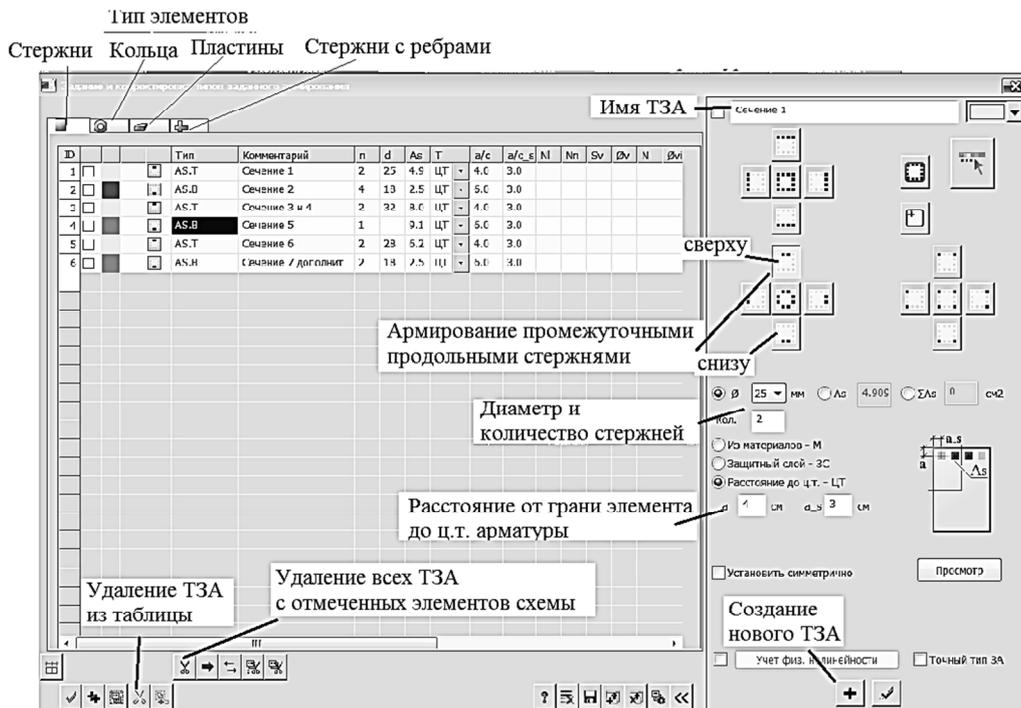


Рис. 3.4. Диалоговое окно «Задание и корректировка типов заданного армирования»

Порядок создания первого ТЗА следующий (рис. 3.4):

1. Выбираем тип элемента, который мы собираемся армировать. Для этого в левом верхнем углу диалогового окна щелчком мыши по пиктограмме  выводим таблицу армирования стержневых элементов. Кроме того, возможно армирование кольцевых сечений, пластин, стержней с ребрами.

2. В правой части диалогового окна выбираем армирование продольными промежуточными стержнями. Сечения 1, 3, 4 и 6 мы будем армировать в верхней зоне, 2 и 5 – в нижней зоне. Для первого сечения выбираем верхнее армирование.

3. Задаем имя ТЗА «Сечение 1» в поле, находящемся в самом верху правой части окна.

4. Площадь сечения можно задать или в численном виде , или через диаметр и количество стержней. Для всех сечений кроме пятого выберем второй вариант. Для первого сечения задаем диаметр арматуры 25 мм и количество стержней 2 в соответствующих полях.

5. Рабочую высоту сечения можно определить тремя способами: принять из ранее заданных материалов, задать величины защитного слоя или расстояние от грани элемента до центра тяжести арматуры. Мы для определения рабочей высоты сечения будем задавать расстояние от грани элемента до центра тяжести арматуры для сечений 1, 3, 4 и 6, равное 4 см, для сечений 2 и 5 – 6 см. Для сечений 1, 3, 4 и 6 расстояния задаются до верхней грани ригеля, для сечений 2 и 5 – до нижней грани ригеля. Расстояние  $a_s$  до боковых граней не влияет на расчет.

6. Нажав на кнопку «просмотр», проконтролируем правильность задания положения арматуры.

7. Если все правильно, то нажмем в правом нижнем углу окна на пиктограмму .

8. После отработки команды слева в таблице ТЗА появится первое созданное ТЗА. Необходимо проверить правильность заданных параметров. Запись AS.T означает верхнее армирование (нижнее обозначается AS.B). Далее следуют имя (комментарий), число стержней, диаметр арматуры, площадь сечения одного стержня, вид и размеры привязок арматуры

к граням элемента:

ID	Тип	Комментарий	n	d	As	T	a/c	a/c_s
1	AS.T	Сечение 1	2	25	4.9	ЦТ	4.0	3.0

Корректировать заданные параметры можно в самой таблице заданного армирования, но все же для создания и редактирования ТЗА удобнее работать с полями в правой части диалогового окна.

Следующие ТЗА будут создаваться в таблице на основе уже имеющегося ТЗА и наследовать все его параметры, которые легко можно корректировать кроме типа (в нашем случае верхнего или нижнего).

Следовательно, перед созданием второго ТЗА необходимо обязательно поменять тип армирования на нижнее (AS.B) и только после этого добавлять новый тип армирования (пиктограмма  в нижнем правом углу диалогового окна)!!!

Других особых тонкостей в создании ТЗА для сечений 2, 3, 4, 6 нет. Поэтому последовательно зададим эти типы армирования.

Сечение 5 армируется стержням разных диаметров – 18 и 16 мм. Можно, как вариант, создать комбинированное армирование, но проще армирование задать численно, отметив опцию  9.111 и введя значение площади сечения.

На рис. 3.4 можно просмотреть таблицу ТЗА с введенными параметрами.

Для удаления конкретного ТЗА необходимо отметить его номер , затем нажать на пиктограмму «ножницы» в самой нижней панели, расположенной слева внизу диалогового окна. Не стоит путать действие этой пиктограммы «ножницы» с аналогичной пиктограммой, на расположенной выше панели. Эта кнопка необходима для удаления уже назначенных ТЗА с отмеченных на схеме элементов.

После создания пяти ТЗА закроем диалоговое окно «Задание и корректировка типов заданного армирования» и перейдем к назначению армирования на элементы.

### 3.3. Назначение (удаление) типа заданного армирования элементам расчетной схемы

Так как ригели имеют разное армирование на приопорных участках и в пролете, разобьем каждый из КЭ 12 и 14 на четыре КЭ. Выделим эти элементы и на закладке «Создание и редактирование» раскроем меню «Добавить элемент», в котором щелкнем левой кнопки мыши по команде «Разделить на  $N$  равных частей» (рис. 3.5, а). В открывшемся окне «Добавить элемент» укажем число дробления 4 и применим команду.

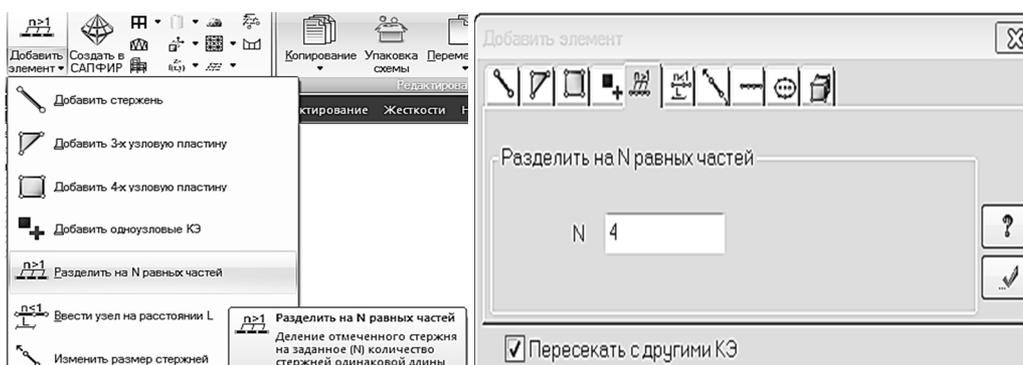


Рис. 3.5. Разбиение КЭ 12 и 14 на четыре КЭ

Далее откроем диалоговое окно «Жесткости и материалы» и перейдем на закладку ТЗА. Сделаем текущим первый ТЗА, щелкнув по соответствующей строке в таблице. Выделим самый крайний левый КЭ (сечение 1) и добавим на него ТЗА 1. Затем, последовательно отмечая следующие КЭ и активируя соответствующие ТЗА, зададим армирование для других участков ригеля (рис. 3.6).

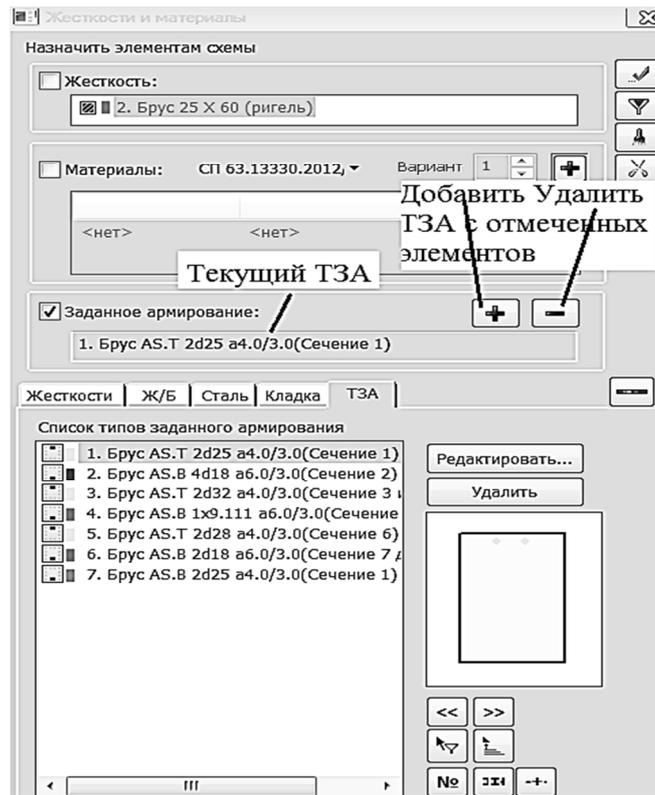


Рис. 3.6. Назначение ТЗА элементам схемы

Проконтролировать правильность задания ТЗА проще всего с помощью команд «флаги рисования», закладка «Материалы» , опция «Типы заданного армирования» . Ниже на рис. 3.6 мы видим, что в каждом пролете по два КЭ имеют ТЗА с армированием нижней зоны, а КЭ, расположенные на приопорных участках, армируется ТЗА с верхним армированием (рис. 3.7).

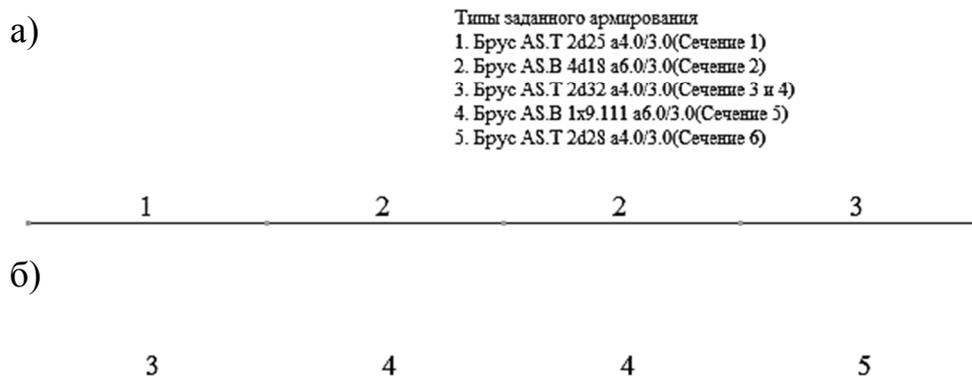


Рис. 3.7. Типы заданного армирования:  
а – первый пролет; б – второй пролет

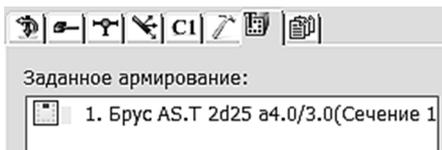


Рис. 3.8. Армирование КЭ (сечение 1)

Для любого КЭ можно просмотреть ТЗА с помощью инструмента «фонарик» (рис. 3.8).

Для выполнения полного технологического цикла расчета (статический расчет, подбор армирования, проверка заданного армирования) необходимо перейти на закладку «Расчет».

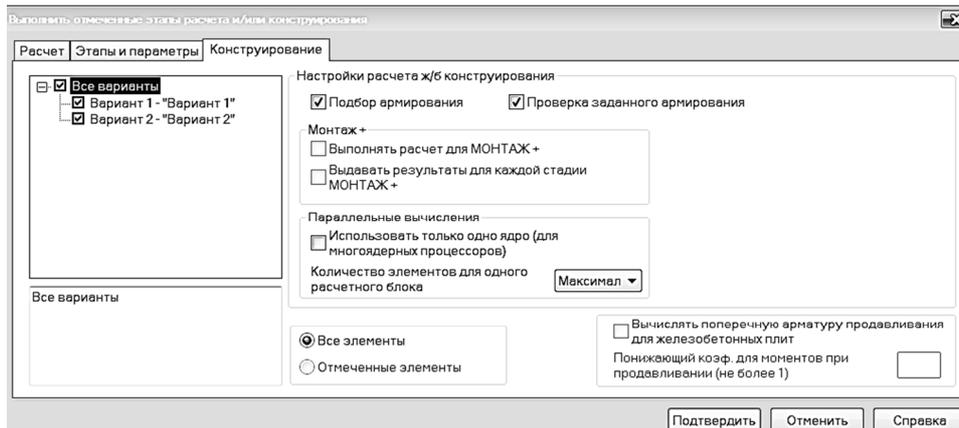


Рис. 3.9. Окно задания этапов конструирования

Далее необходимо открыть окно «Этапы расчета и жб конструирования» с помощью команды «Расчет с контролем параметров». В нем на закладке «Этапы конструирования» отметить опцию «Проверка заданного армирования» (рис. 3.9) и подтвердить запуск файла на расчет.

### 3.4. Просмотр и анализ результатов конструктивного расчета

Для просмотра результатов проверки заданного армирования перейдем на закладку «Железобетон». На панели «Армирование» щелкнем по пиктограмме  $k^{\sigma}$  «Коэффициенты запаса по прочности для стержневых элементов» и проанализируем результаты расчетов.

Сначала сравним значения коэффициентов запаса для шести расчетных сечений, вычисленных ранее в программе MathCAD (рис. 3.2) и далее в ПК «Лира-САПР». Как видим, значения численного и аналитического расчетов очень близки друг к другу.

Но если мы посмотрим на участки эпюр коэффициентов запаса опорных КЭ, расположенных примерно в третях пролета, то увидим, что там несущая способность не обеспечена (рис. 3.10)!

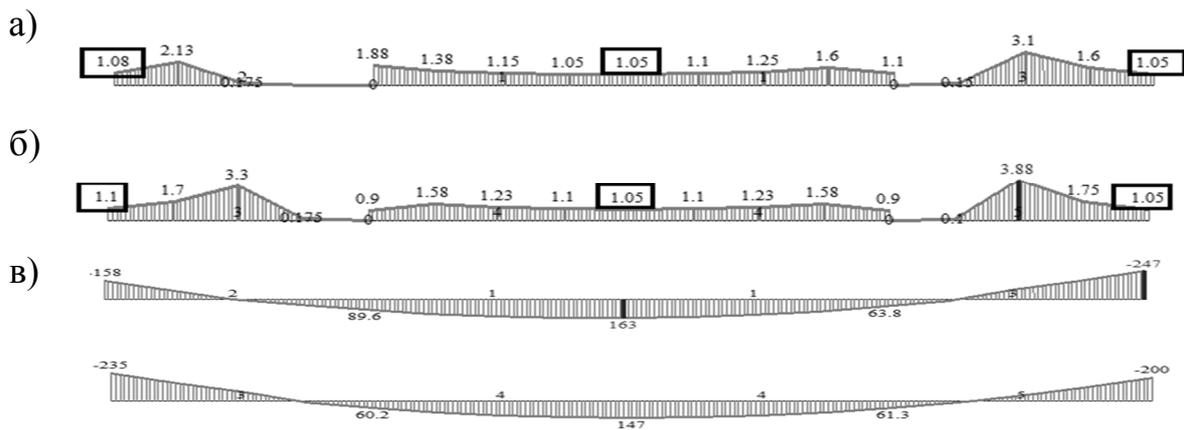


Рис. 3.10. Коэффициенты запаса по прочности для элементов ригеля:  
 а – первый пролет; б – второй пролет; в – эпюра РСУ

Чтобы понять, почему так получилось, проанализируем распределение усилий на эпюре огибающих усилий РСУ. Мы увидим, что на этих участках эпюра моментов меняет знак и растянута будет уже нижняя зона. КЭ, расположенные на приопорных участках, мы армировали только вверху. Значит, нам необходимо дополнительно заармировать эти КЭ еще и нижней арматурой, которая обрывается не полностью на приопорных участках, а только частично. Поэтому зададим новое ТЗА (2Ø18 мм) и назначим его КЭ, расположенным на опорных участках. Ниже на рис. 3.11 приведено окончательное армирование ригеля.

- Типы заданного армирования
1. Брус АУ.Т 2d25 а4.0/3.0(Сечение 1)
  2. Брус АУ.А.В 4d18 а6.0/3.0(Сечение 2)
  3. Брус АУ.Т 2d32 а4.0/3.0(Сечение 3 и 4)
  4. Брус АУ.В 2x9.110 а6.0/3.0(Сечение 5)
  5. Брус АУ.Т 2d28 а4.0/3.0(Сечение 6)
  6. Брус АУ.В 2d18 а4.0/3.0(Сечения на опорах нижнее армирование)

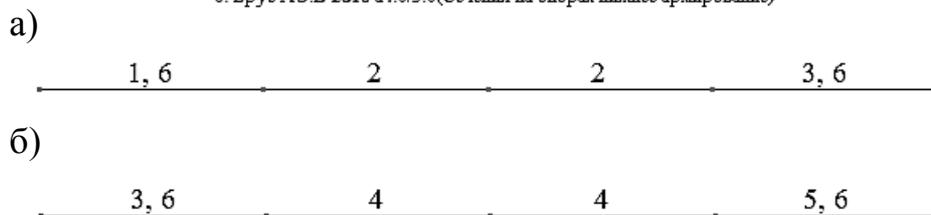


Рис. 3.11. Типы заданного армирования с дополнительным армированием опорных участков в нижней зоне:  
 а – первый пролет; б – второй пролет

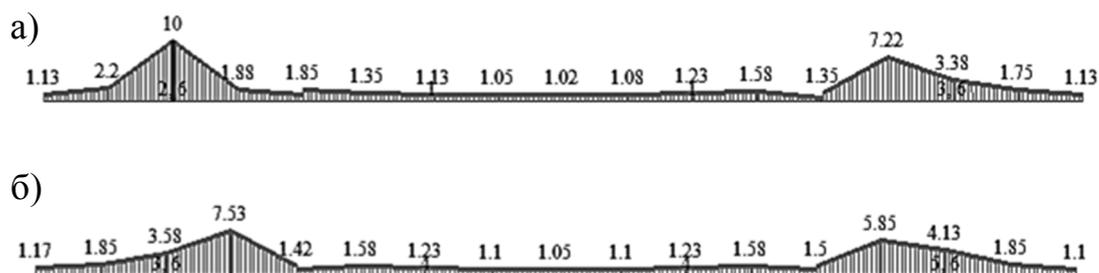


Рис. 3.12. Коэффициенты запаса по прочности для элементов ригеля с дополнительным армированием опорных участков в нижней зоне:  
а – первый пролет; б – второй пролет

Запустим повторно файл на расчет, и сейчас уже все сечения ригеля имеют коэффициент запаса больше 1 (рис. 3.12).

### 3.5. Подготовка отчета о выполнении расчетно-графической работы. «Книга отчетов» в ПК «Лира-САПР»

Структура итогового отчета о выполнении РГР «Расчет неразрезного ригеля с применением ПК «Лира-САПР» следующая:

- 1) основные цели выполнения РГР (п. 1.1.2);
- 2) состав РГР (п. 1.1.2);
- 3) исходные данные (п. 1.1.1);
- 4) анализ результатов статического расчета рамы типового этажа на отдельные загрузки с применением ПК «Лира-САПР» (п. 2.1.9);
- 5) результаты статического расчета рамы типового этажа по РСН и РСУ с применением ПК «Лира-САПР» (п. 2.1.11, 2.1.12);
- 6) вычисление усилий от РСН в программе MathCAD (п. 2.1.13);
- 7) конструктивный расчет неразрезного ригеля (подбор сечения продольной рабочей арматуры) с применением ПК «Лира-САПР» (п. 2.2.3);
- 8) подбор армирования в программе MathCAD (п. 2.2.4);
- 9) конструктивный расчет неразрезного ригеля (проверка несущей способности принятого армирования ригеля) в программе MathCAD (подразд. 3.1);
- 10) конструктивный расчет неразрезного ригеля (проверка несущей способности принятого армирования ригеля) с применением ПК «Лира-САПР» (подразд. 3.4);
- 11) список использованных источников.

При подготовке отчета студенты пользуются расчетными примерами, которые приводятся в пособии. Отчет должен содержать не только основные сведения о выполненных расчетах, но и быть максимально наполнен основными сведениями по расчету железобетонных конструкций. То

есть отчет должен представлять собой документ, к материалу которого студент мог бы обратиться через определенное время при решении задач других дисциплин: «Сейсмостойкость зданий и сооружений», «Нелинейные задачи строительной механики».

Студенты первоначально формируют отчет в программе MathCAD, а далее отправляют файл в формате \*.xmcd на проверку преподавателю вместе с расчетными файлами ПК «Ли́ра-САПР» в формате \*.lir. Только после того, как преподаватель проверит корректность выполненных расчетов и правильность оформления отчета, студенты переводят файл программы MathCAD в формат \*.pdf и выставляют его в личный кабинет студента.

Преподаватель проверяет именно исходные расчетные файлы в форматах \*.xmcd и \*.lir, потому что только они содержат полную информацию о выполненной работе. Файл в формате \*.pdf необходим больше для отчетности, так как он содержит минимум информации о работе, проделанной студентом. Такие же требования предъявляются к проверке чертежей, выполненных студентами в программе NanoCAD (AutoCAD).

При подготовке отчетов о результатах проектирования зданий и сооружений для прохождения экспертизы ПК «Ли́ра-САПР» предлагает удобную и эффективную систему документирования – «Книга отчетов». Для отображения «книги отчетов» на экране необходимо в верхнем правом углу раскрыть меню ПК «Приложения» щелчком по пиктограмме . Далее подвести курсор мыши на строку меню «Книга отчетов»  Книга отчетов и в выпадающем меню «Содержание книги отчетов» щелкнуть на пиктограмму «Показать книгу отчетов»  Показать книгу отчетов (рис. 3.13).

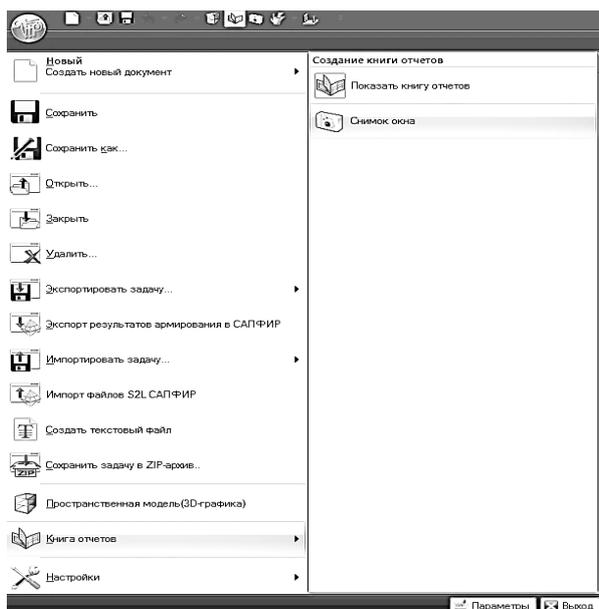


Рис. 3.13. Открытие книги отчетов

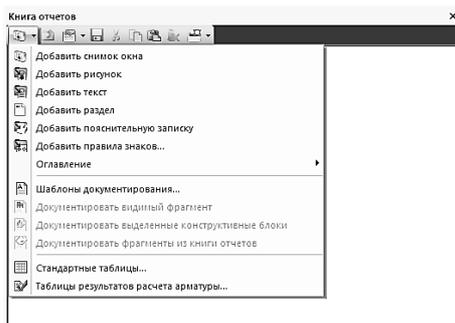


Рис. 3.14. Книга отчетов

На рис. 3.14 показана книга отчетов с раскрытым основным меню, содержание которого показывает, какого типа информацию может собирать этот контейнер. Приведем краткие пояснения по этой информации:

1) **добавить снимок окна** – инструмент для вставки графического изображения текущего окна программы (расчетные схемы, эпюры, изополя и т.д.);

2) **добавить рисунок** – инструмент для вставки рисунка из буфера обмена;

3) **добавить текст** – инструмент для вставки текстового фрагмента;

4) **добавить раздел** – инструмент для вставки нового раздела (папки) документов;

5) **добавить пояснительную записку** – инструмент для вставки стандартного текстового документа, в котором приводятся основные сведения о текущем расчетном файле (имя задачи, признак схемы, загрузки, пояснения по таблицам РСУ, РСН, правилам знаков и т.д.);

6) **добавить правила знаков** – инструмент для вставки изображений, на которых приводятся принятые в ПК «Ли́ра-САПР» правила знаков для перемещений и усилий;

7) **стандартные таблицы** – инструмент для вставки стандартных таблиц (протокол решения, усилия, расчетные РСУ и т.д.);

8) **таблицы результатов расчета арматуры** – инструмент для вставки таблиц результатов расчета армирования.

При подготовке документации о результатах проектирования зданий и сооружений в книге отчетов формируется вся основная информация о выполненном расчете (расчетные схемы, жесткости, материалы, эпюры усилий, армирование, справочная информация о ПК «Ли́ра-САПР» и т.д.). Далее вся информация компонуется и, как правило, переводится в формат \*.pdf. При этом каждое графическое изображение, таблица занимают целую страницу формата А4, и отчет может быть объемом от нескольких десятков до нескольких сотен страниц.

В последних версиях ПК «Ли́ра-САПР» у книги отчетов появилась новая интересная возможность, которая позволяет значительно уменьшить время проектировщикам при корректировке отчетов. Процедура пересылки в книгу отчета десятков (а может и сотен) изображений и таблиц является достаточно трудоемкой. Но на практике нередки случаи, когда по разным причинам приходится исправлять отчеты (повторно их готовить). И если ранее необходимо было заново заполнять книгу отчетов новыми изображениями и таблицами, то сейчас существует динамическая связь

между расчетным файлом и содержанием книги отчетов. Поэтому после нового расчета задачи достаточно просто запустить команду «Обновить выделенные элементы», и все эпюры, изополя, таблицы и другое в книге отчетов автоматически обновятся в соответствии с данными нового расчета.

При подготовке отчета о выполнении РГР «Расчет неразрезного ригеля с применением ПК «Ли́ра-СА́ПР» использование книги отчетов является не совсем целесообразным, удобнее использовать технологию скриншотов. Но в дальнейшем, при выполнении курсовой работы по проектированию здания из монолитного железобетона, в рамках дисциплины «Строительные конструкции. Спецкурс» студенты должны освоить технологию подготовки документации с помощью книги отчетов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В пособии рассматривается методика расчетов изгибаемых железобетонных элементов с одиночным армированием, так как именно такие задачи наиболее часто встречаются в практике проектирования зданий и сооружений. Материал пособия также косвенно затрагивает задачи проектирования железобетонных изгибаемых элементов с двойным армированием, рассматривается пример расчета поперечной рамы с учетом физической нелинейности. Но каждая из этих тем относительно полноценно может быть изложена только в отдельных изданиях.

Хочется сделать очень важное, с точки зрения автора, пожелание студентам и проектировщикам – применять ПК «Ли́ра-СА́ПР» для задач проектирования железобетонных конструкций в связке с ПК «САПФИР» [6]. Если первоначально ПК «САПФИР» представлял собой простой предпроцессор, позволяющий только подготавливать параметрические расчетные схемы для модуля «Ли́ра-ВИ́ЗОР», то сейчас этот комплекс решает целый ряд задач. Самой интересной с практической точки зрения является технология создания параметрических моделей зданий и сооружений из железобетона в ПК «САПФИР» с дальнейшим экспортом в модуль «Ли́ра-ВИ́ЗОР». После выполнения статического и конструктивного расчетов результаты полученного армирования элементов передаются обратно в ПК «САПФИР» и выполняется автоматизированное создание чертежей железобетонных конструкций.

Самый важный момент для любого проектировщика-расчетчика – глубокий и всесторонний анализ результатов. Без постоянного контроля (качественного и количественного) правильности выполненных расчетов ни в коем случае нельзя быть уверенным в достоверности полученных результатов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **СП 63.13330.2018.** Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : свод правил : издание официальное : разработан АО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А. А. Гвоздева : внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство» : дата введения 2019-06-20 : актуализированная редакция СНиП 52-01–2003 / утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 118 с.

2. **СП 20.13330.2016.** Нагрузки и воздействия : свод правил : издание официальное : разработан ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» : внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство» : дата введения 2017-06-04 : переиздание, март 2018 г. : актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\* / утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 72 с.

3. **ГОСТ 27751–2014.** Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : межгосударственный стандарт : издание официальное : разработан ОАО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко : внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство» : дата введения 2015-07-01 : переиздание, ноябрь 2019 г. / принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 14 ноября 2014 г. № 72-П. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 14 с.

4. **Барабаш, М. С.** Компьютерное моделирование в задачах строительной механики : учебное пособие / М. С. Барабаш, О. С. Городецкий, В. М. Сидоров. – Москва : АСВ, 2016. – 338 с.

5. **Барабаш, М. С.** Программные комплексы САПФИР и Лира-САПР – основа отечественных BIM-технологий : монография / М. С. Барабаш, Д. В. Медведенко, О. И. Палиенко. – 2-е издание. – Москва : Юрайт, 2013. – 366 с.

6. **Барабаш, М. С.** Проектирование конструкций рабочей площадки в ПК «Лира-САПР» : учебное пособие / М. С. Барабаш, М. А. Ромашкина. – Москва : АСВ, 2018. – 148 с.

7. **Дзюба, В. А.** Расчет сборных железобетонных конструкций многоэтажного каркасного здания : учебное пособие / В. А. Дзюба. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – 123 с.

8. **Чудинов, Ю. Н.** Расчет строительных стержневых конструкций в ПК «Лира-САПР 2011» : учебное пособие / Ю. Н. Чудинов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 88 с.

*Учебное издание*

**Чудинов Юрий Николаевич**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕРАЗРЕЗНОГО РИГЕЛЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК «ЛИРА-САПР»**

Учебное пособие

Научный редактор – кандидат технических наук,  
доцент В. В. Куриный

Редактор Т. И. Ивашкина

Подписано в печать 28.06.2021.  
Формат 60×84 1/16. Бумага 65 г/м<sup>2</sup>. Ризограф EZ 570E.  
Усл. печ. л. 5,80. Уч.-изд. л. 5,58. Тираж 47 экз. Заказ 30290.

Редакционно-издательский отдел  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.