

УДК : 721.01:624.012.3:681.3.06.

*Д.А. Городецкий к.т.н.; А.А. Рассказов, к.т.н.;  
А.А. Лазарев; Л.Г. Батрак;  
А.М. Маснуха, ТОВ «Лира Софт»;  
В.П. Максименко, НИИСП.*

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «МОНОМАХ» ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОТНЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

В настоящее время развитие строительной механики идет по пути разработки всё более совершенных аналитических и численных методов, ориентированных на широкое применение в расчетных комплексах. Все теснее становится связь задач строительной механики с проектированием конструкций, с технологией их изготовления и монтажа. ПК «МОНОМАХ» позволяет решать большой класс задач строительной механики и успешно применяется в расчетах зданий и сооружений во многих странах.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, вариантное проектирование, каркас, плита, балка, колонна.

### **Назначение и преимущества ПК «МОНОМАХ»**

ПК «МОНОМАХ» представляет собой универсальный программный комплекс, позволяющий решать большой класс задач расчета и проектирования железобетонных, каменных и армокаменных конструкций. Этапы проектирования и расчета конструкций, выполняемые с использованием различных программных продуктов, в ПК «МОНОМАХ» объединены в рамках общего комплексного подхода. Этот подход обеспечивает значительное упрощение работы и увеличение скорости проектирования.

Область применения ПК «МОНОМАХ» весьма разнообразна — это расчет и проектирование монолитных железобетонных зданий, высотных зданий, сборных зданий рамной и рамно-связевой конфигурации, кирпичных зданий со сложным планом, переменной конфигурацией по высоте, большим количеством нерегулярных включений и многими другими особенностями.

В ПК «МОНОМАХ» реализованы нормативы СНГ и ряда стран: СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия», СНиП II-7-81 «Строительство в сейсмических районах», СНиП 2.03.01-84 «Бетон-

ные и железобетонные конструкции», СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», ТСН102-00 «Железобетонные конструкции с арматурой классов А500С и А400С», СНиП II-22-81 «Каменные и армокаменные конструкции», СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений», СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений», СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты», СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов», МГСН 2.07-01 «Основания, фундаменты и подземные сооружения», СНиП 2.09.03-85 «Сооружения промышленных предприятий», СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений», СНиП II-7-81 с изм. 2000 г., СНиП II-7-81 с изм. 1996 г., СНиП II-7-81, ДБН «Высотные здания», МГСН 4.19-05, СНРА II-2.02.94, КМК 2.01.03-96, СНиП РК 2.03-30-2006, СНТ 2.01.08-99, МКС ЧТ 22-07-2007, ИВС-2000, PS-92, RPA99, RPS-2000, Ответ-спектр. Для учета ветрового воздействия указываются нормы СНиП 2.01.07-85, ДБН, ASCE798, N&V 65.

Работая в среде ПК «МОНОМАХ», от пользователя не требуется глубоких знаний метода конечных элементов (МКЭ) и специфических знаний по работе со сложными расчетными комплексами, поскольку при создании расчетной модели сооружения ему предоставляется возможность оперировать общепринятыми терминами: оси, балки, плита, колонна, этаж, отверстие, форма штампа приложенной нагрузки и т.д. Процедура создания конструктивной схемы концептуально очень близка к архитектурным программам (ArchiCAD, Revit, Allplan, ADT и др. см.рис.1), поэтому на уровне вариантного проектирования архитектор для проверки правомерности принятых решений может работать в ПК «МОНОМАХ» самостоятельно, не прибегая к помощи конструктора.

ПК «МОНОМАХ» может быть использован на разных этапах проектирования. На стадии принятия проектных решений за короткое время можно выполнять многовариантное проектирование, получить результаты расчетов вариантов конструктивных схем с различной расстановкой колонн, диафрагм, свай, с разной толщиной плит и пр., а также определить расход материалов и стоимость конструкций здания. Применение ПК «МОНОМАХ» на стадии рабочего проектирования позволяет создать расчетную схему, выдать результаты расчетов и эскизы рабочих чертежей в единой среде, что позволяет существенно сократить сроки

выполнения работ. Есть возможность расчета сооружений совместно с грунтовым основанием на базе создаваемой 3D-модели грунтового массива по имеющимся инженерно-геологическим данным. ПК «МОНОМАХ» предоставляет пользователю возможность задания фундаментов как на естественном, так и на свайном основании, причем с различными вариантами описания жесткостных характеристик свай.

ПК «МОНОМАХ» имеет экспертную систему, которая на всех этапах автоматизированного проектирования дает пользователю подсказки относительно обоснования принятых конструктивных решений, таких как выбор размеров сечения несущих конструкций, расстановка диафрагм жесткости, обеспечение тех или иных требований нормативных документов.

В ПК «МОНОМАХ» реализован широкий спектр возможностей по межпрограммной передаче данных:

- импорт из комплекса AutoCAD набора плоских планов этажей в формате DXF. В результате импорта в ПК «МОНОМАХ» автоматически генерируется пространственная многоэтажная расчетная схема с заданными параметрами сечений конструктивных элементов;

- импорт из цифровой модели объекта (ЦМО используется в интегрированной технологической линии проектирования). Эта линия проектирования объединяет большое количество различных архитектурных программ (САПФИР, ArchiCAD, AutoCAD и др.);

- экспорт расчетной схемы в программный комплекс «ЛИРА» с возможностью автоматической генерации сетки конечных элементов (КЭ), экспорта жесткостных параметров КЭ, нагрузок, стадий монтажа здания, абсолютно жестких тел и т.д.;

- экспорт нагрузок на фундамент и слоев грунтов в ПК ФОК и в программу «ФУНДАМЕНТ» для дальнейшего расчета и проектирования столбчатых фундаментов.

Все чертежи, сформированные в ПК «МОНОМАХ», могут быть сохранены в формате DXF и экспортированы в любые программы, поддерживающие этот формат.

Возможности межпрограммной передачи данных о расчетных моделях непрерывно развиваются. Расширяется спектр реализованных функций импорта и экспорта для новых типов и форматов файлов.

В состав ПК «МОНОМАХ» входят следующие программы: «КОМПОНОВКА», «БАЛКА», «КОЛОННА», «ФУНДАМЕНТ», «ПОДПОРНАЯ

СТЕНА», «ПЛИТА», «РАЗРЕЗ» (СТЕНА), «КИРПИЧ» и «ГРУНТ». Данные программы связаны информативно, но в то же время могут работать в автономном режиме.

Программа «КОМПОНОВКА» — это основной модуль ПК «МОНОМАХ». Он позволяет в короткий срок сформировать схему здания, выполнить статический и динамический расчеты, определить расход материалов, оценить стоимость конструкций и экспортировать данные для конструирующих программ («ПЛИТА», «БАЛКА» и т.д.). В программе «КОМПОНОВКА» формируются модели здания, при помощи следующих операций:

- расстановка строительных осей, колонн, балок, стен, перегородок, плит перекрытия и фундаментных плит произвольной конфигурации, а также свай;
- задание отверстий в стенах (с возможностью формирования собственной базы отверстий), плитах перекрытия, фундаментных плитах;

- задание нагрузок в виде сосредоточенных сил или произвольных штампов равномерно распределенной нагрузки, для задания ветровой и сейсмической нагрузки указывается только направление воздействия и район строительства;

- расчет здания на горизонтальные нагрузки, вызванные ветровыми, в том числе неравномерным давлением по высоте (по результатам обдува), сейсмическими воздействиями и боковым давлением грунта;

- подбор и проверка сечений конструктивных элементов;

- определение перемещений и усилий, частот и периодов колебаний методом конечных элементов с анимацией колебаний;

- учет реальных инженерно-геологических условий площадки строительства при импорте модели грунта, созданной в программе «ГРУНТ»;

- формирование и экспорт данных для конструирующих программ.

Программа «КОМПОНОВКА» является удобным инструментом как при рабочем проектировании, так и при необходимости быстрой оценки жизнеспособности конструктивных решений.

Программа «БАЛКА» позволяет спроектировать монолитную одно- или многопролетную неразрезную балку с переменной высотой сечения по пролетам. Сечение балки может быть прямоугольным, тавровым, коробчатым и др.; нагрузка — равномерно распределенная по пролету, по части пролета, сосредоточенные вертикальные силы и моменты. Схема балки, сечение, нагрузки, сведения о материалах и требования конструирования задаются или корректируются в интерактивном

режиме. Программа выполняет статический расчет балки с построением огибающих эпюр перемещений и усилий, определяет расчетную площадь арматуры, выполняет построение эпюры материалов, конструирование балки с выдачей чертежа (рис.2).

Программа **«КОЛОННА»** дает возможность спроектировать монолитную колонну с различной формой сечения: прямоугольной, тавровой, крестовой, уголкового, кольцевой и др. Схема формируется в режиме импорта и в автономном режиме. Колонна рассчитывается на действие сжимающей силы и моментов в двух плоскостях (косое внецентренное сжатие). Форма и размеры сечения, нагрузки, материалы задаются в интерактивном режиме. Для пилонов учитываются особенности расположения арматуры по длинным сторонам. Программа выполняет расчет по первому и второму предельному состоянию (расчет по раскрытию трещин), определяет расчетную площадь арматуры, выполняет конструирование колонны и выводит чертеж (рис.3).

Программа **«ФУНДАМЕНТ»** позволяет спроектировать монолитный столбчатый фундамент под колонны и короткие участки стен для заданных инженерно-геологических условий. Схема формируется в режиме импорта и в автономном режиме. Программа выполняет расчет основания и фундамента, определяет необходимую площадь сечения арматуры и производит конструирование фундамента. В программе учитывается просадочность грунтов. Есть возможность импорта из программы **«КОЛОННА»** в программу **«Фундамент»** данных об арматурных выпусках, соответствующих расположению арматурных стержней в примыкаемой колонне. Выполняется чертеж спроектированного фундамента (рис.4).

Программа **«ПОДПОРНАЯ СТЕНА»** проектирует монолитную уголковою подпорную стену и выполняет проверку массивной подпорной стены для заданных инженерно-геологических условий. Схема формируется в автономном режиме. В программе можно задавать нагрузки как на лицевую панель подпорной стены, так и на грунт за сыпки, в том числе подвижные нагрузки (АК, НК-80, НГ-60 и др.). Программа выполняет расчет устойчивости основания, расчет и конструирование подпорной стены. Выполняется чертеж и выводится расход материалов на погонный метр спроектированной подпорной стены (рис.5).

В программе **«ПЛИТА»** проектируются монолитная железобетонная плита перекрытия и фундаментная плита. Фундаментная плита рассмат-

ривается на естественном основании или на свайном поле произвольного очертания. Учитывается переменная толщина плиты и наличие отверстий. Сведения о грунтовом основании задаются или импортируются из программы **«ГРУНТ»**. После статического расчета программа выполняет построение полей перемещений и усилий, определяет расчетную площадь арматуры. Производится расчет на продавливание. Осуществляется конструирование плиты. По результатам конструирования выполняется чертеж с автоматической генерацией спецификаций и ведомости расхода стали. При необходимости производится экспорт расчетной схемы плиты в программный комплекс **«Лира»**.

Программа **«РАЗРЕЗ» (СТЕНА)** позволяет за проектировать монолитную железобетонную стену произвольного контура совместно с примыкающими рамными конструкциями. Учитывается наличие отверстий и участков стены разной толщины. Программа выполняет статический расчет плоской схемы разреза с построением эпюр усилий, изополей перемещений и напряжений. Определяется расчетная площадь арматуры для стеновых элементов и выполняется конструирование для указанных зон. По результатам делается чертеж (рис.6). При необходимости выполняется экспорт расчетной схемы разреза в программный комплекс **«Лира»**.

Программа **«КИРПИЧ»** выполняет расчет армирования стен кирпичных зданий. Используя в комплексе программы **«КИРПИЧ»**, **«КОМПОНОВКА»** и **«ГРУНТ»**, пользователь получает удобный инструмент для работы с каменными и армокаменными конструкциями. При вычислении усилий в программе **«КОМПОНОВКА»** учитывается совместная пространственная работа несущих кирпичных и железобетонных элементов здания (поясов, железобетонных сердечников, фундаментной плиты, диафрагм, колонн, пилонов), а также эксцентриситеты приложения нагрузок от плит перекрытий и балок. В процессе расчета определяется необходимое количество сеток и подбираются стержни вертикального армирования. Возможен расчет на заданное усиление старой кладки: металлическими уголками, железобетонной обоймой и др. Выдается коэффициент запаса несущей способности кладки. Выполняется чертеж с раскладкой сеток по сечению стен.

Программа **«ГРУНТ»** формирует пространственную модель грунтового основания по заданным инженерно-геологическим условиям площадки строительства (рис.7). Для описания площадки строительства задается база характеристик слоев

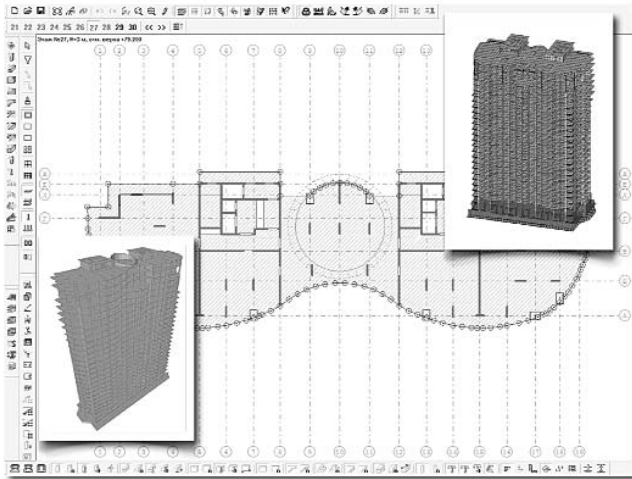


Рис.1. Рабочее окно ПК «МОНОМАХ» с планом этажа, 3-Д видом и схемой МКЭ

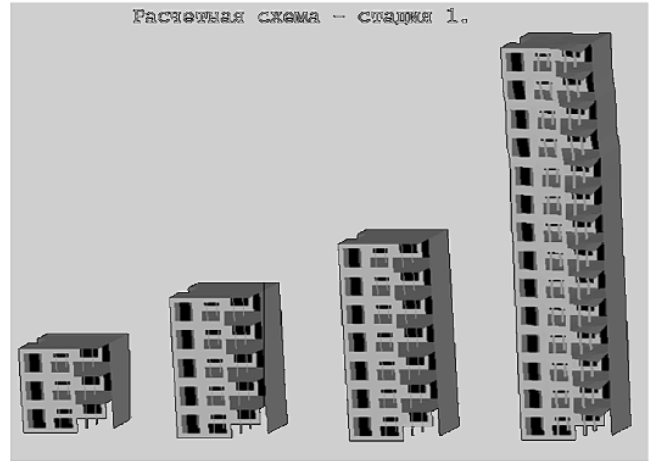


Рис.1.а Учет стадий монтажа при расчете здания

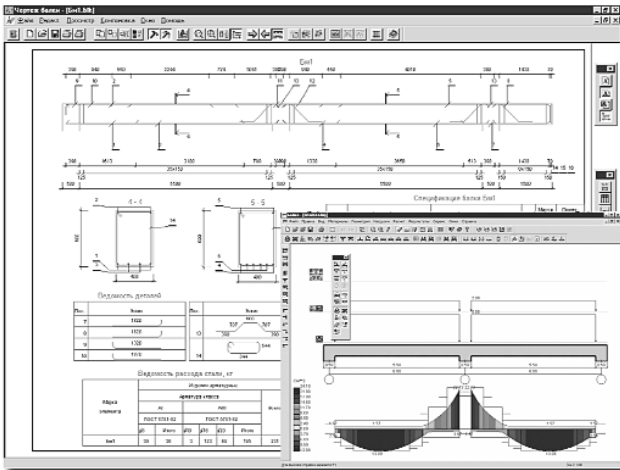


Рис.2. Рабочее окно ПС «БАЛКА» и конструктивный чертеж балки со спецификацией

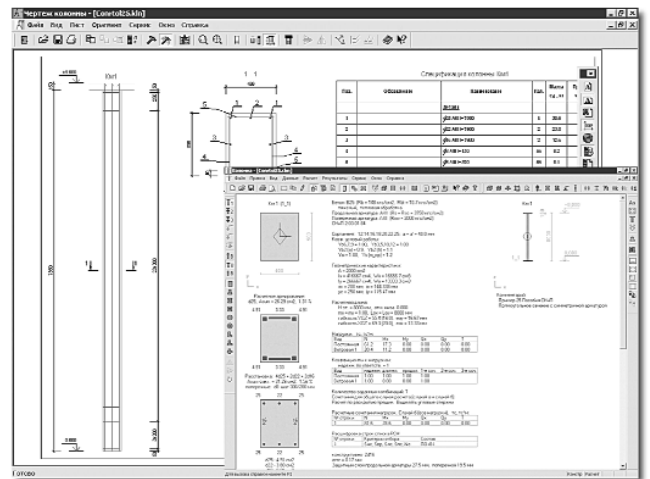


Рис.3. Рабочее окно ПС «КОЛОНА» и конструктивный чертеж со спецификацией

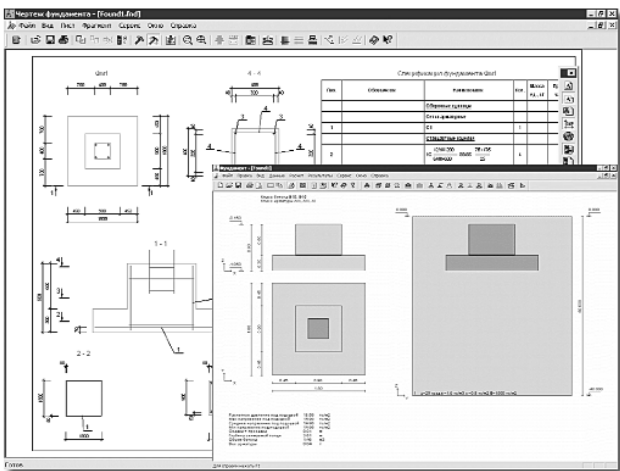


Рис.4. Рабочее окно ПС «ФУНДАМЕНТ»

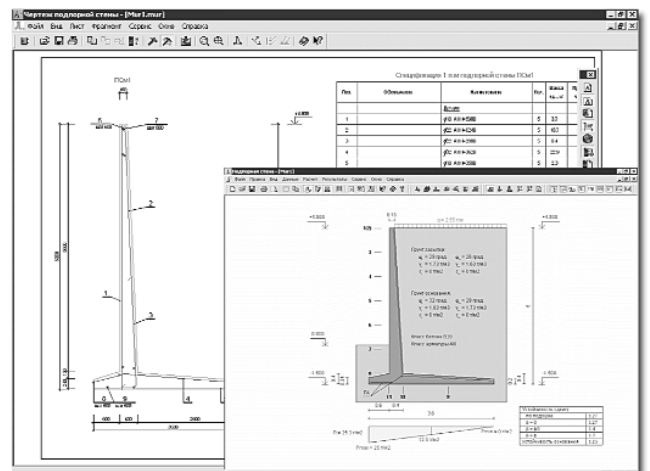


Рис.5. Рабочее окно ПС «ПОДПОРНАЯ СТЕНА»

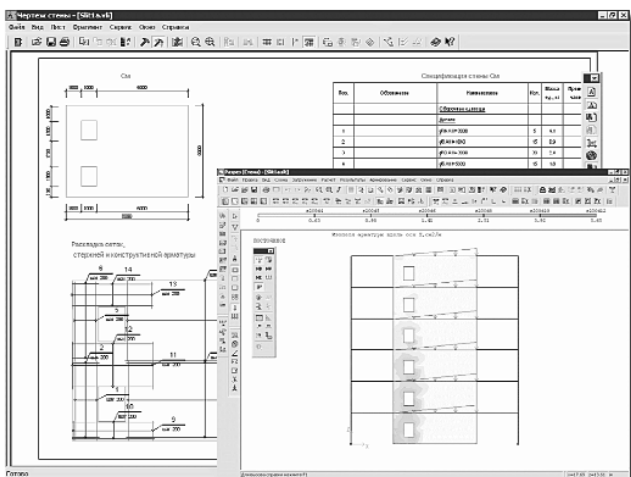


Рис. 6. Рабочее окно ПК «РАЗРЕЗ» и спецификация расхода материалов

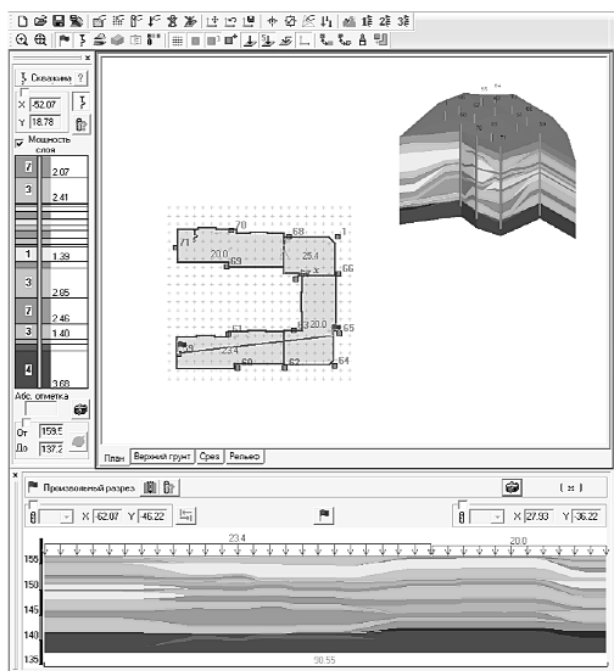


Рис. 7. Рабочее окно ПК «ГРУНТ»

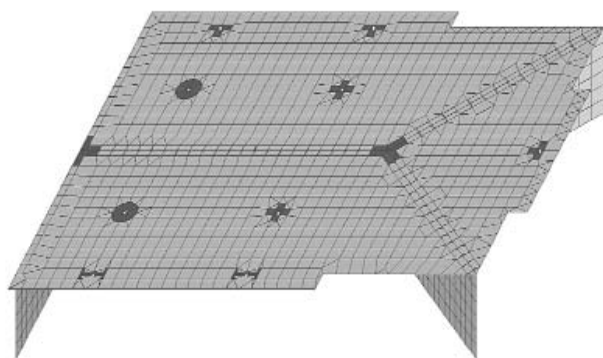


Рис. 8. Схема МКЭ перекрытия с генерацией АЖТ

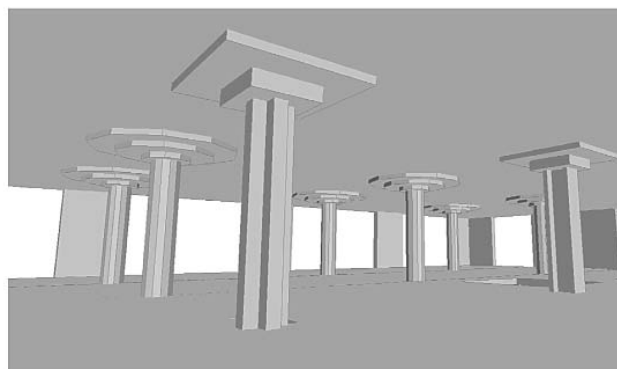


Рис. 9. Задание произвольного вида капителей в ПК «МОНОМАХ»



Рис. 10. Задание пересекающихся отверстий в стенах

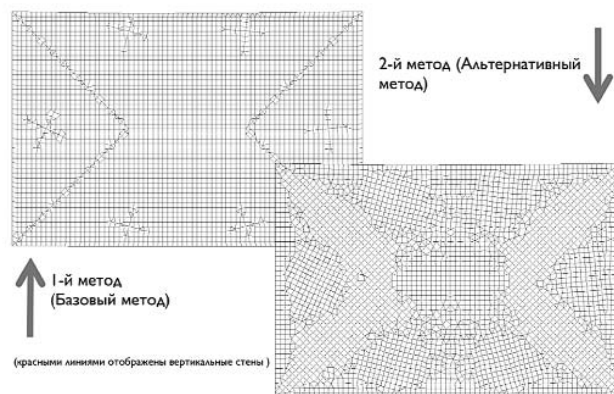


Рис. 11. Базовый и новый методы триангуляции плит

грунта, указывается расположение и отметки устья скважин, слои грунта, составляющие ту или иную скважину. Для произвольных штампов нагрузок от проектируемых или существующих зданий определяется поле осадок. По нескольким методикам выполняется расчет и определение коэффициентов постели, а для свайного основания — характеристик свай (несущая способность и осадки). Модель грунтового основания экспортируется в программы «КОМПОНОВКА» и «ПЛИТА», где используется при расчете отдельных фундаментов и фундаментных плит.

Программный комплекс «МОНОМАХ» непрерывно совершенствуется как в направлении удобства интерфейса, так и в направлении реализации новых возможностей. Так в последней версии 4.5 реализован ряд новых возможностей:

**1. Трафарет перемещений.** Для плит перекрытий реализован экспорт в программу «ПЛИТА» результатов МКЭ расчета из программы «КОМПОНОВКА» в виде трафарета перемещений в узлах и линиях примыкания соседних элементов (в версии 4.2 ПК «МОНОМАХ» эта процедура была реализована только для программы «РАЗРЕЗ»). В ПК «МОНОМАХ» в полном объеме реализован классический метод фрагментации (так как основная схема и фрагмент рассчитывается методом перемещений, т.е. разрешающей функций является перемещения, то и взаимодействия между основной схемой и фрагментом наиболее естественно формулировать в перемещениях). Общая конструктивная схема рассчитывается в программе «КОМПОНОВКА» на все виды воздействий при достаточно грубой конечно-элементной сетке, а отдельные фрагменты (плиты, стены) подробно рассчитываются в локальных программах. При этом имеется возможность использовать все преимущества локальных программ — сгущение сетки КЭ, подробное компьютерное моделирование отдельных узлов, использование удобных приемов определения армирования. При этом адекватно учитываются различные эффекты, связанные с работой фрагмента в общей конструктивной схеме. Так, например, для плит при расчете в программе «ПЛИТА» учитывается неравномерная осадка колонн и стен, полученная из общего расчета каркаса.

**2. Поэтапное возведение здания.** Реализована возможность учета поэтапности возведения здания с выравниванием уровней перекрытий. Этим самым моделируется натуральный процесс возведения здания, когда при замоноличивании перекрытия выравниваются перемещения вертикальных

элементов от собственного веса возведенной конструкции. Для организации учета поэтапности возведения пользователю достаточно указать только номера тех этажей, которые входят в тот или иной этап (рис.1.а). Собственный вес прикладывается к элементам в момент их возведения. Для остальных нагрузок постоянного нагружения имеется возможность указать момент их появления. Нагрузки всех других нагружений прикладываются после возведения всего здания.

**3. Автоматическая генерация абсолютно жестких тел (АЖТ).** Реализована возможность автоматической генерации абсолютно жестких тел (АЖТ) для стыков колонн и стен с плитами перекрытий. Конфигурация АЖТ соответствует сечению примыкаемого вертикального элемента (для колонн — прямоугольное, крестовое, угловое, тавровое, двутавровое, круглое и др.; для стен — АЖТ соответствующей конфигурации в узлах пересечений двух или нескольких стен под различными углами и набор АЖТ на внутренних узлах стены). Откорректирован алгоритм триангуляции, учитывающий наличие АЖТ.

**4. Задание капителей.** Реализована возможность моделирования капителей. Пользователь моделирует капители набором плит различной толщины и произвольной конфигурации. В характеристиках этажа пользователь указывает взаимное расположение плит этажа по высоте (рис.9): выравнивание по верхним граням (капитель снизу); выравнивание по нижним граням (капитель сверху); выравнивание по серединным поверхностям (утолщение плиты).

В расчетной схеме для МКЭ расчета автоматически формируются вертикальные абсолютно жесткие вставки, моделирующие взаимное расположение плит по высоте. Сделаны изменения и в предварительном расчете — нагрузки собираются со всех плит вместе, а не с каждой по отдельности, как в предыдущих версиях. Использование данной функции позволяет пользователю решать более широкий спектр задач.

**5. Унификация колонн и коротких стен.** Реализована возможность унификации колонн и коротких стен (пилонов) для экспорта в программу «КОЛОННА». Пользователь составляет унифицированную группу, для чего в его распоряжении имеются различные приемы: включать в унифицированную группу элементы одного или нескольких этажей; включать элементы, относящиеся к одной плети; применять поэлементное включение; включать элементы в заданном диапазоне армиро-

вания. Составление унифицированных групп облегчается указанием для каждого элемента процента армирования и наличием диагностической системы, которая отслеживает включение в группу элементов, имеющих одинаковое сечение и длину. После назначения унифицированных групп имеется возможность получить соответствующий им расход арматуры. Пользователь имеет возможность варьировать составом унифицированных групп, добиваясь приемлемой унификации в смысле расхода арматуры. Для каждой унифицированной группы создается один экспортный файл с наборами усилий от каждой колонны, (пилона), включенной в группу, на основании которого рассчитывается и конструируется унифицированный элемент этой группы.

**6. Возможность пересечения стен с отверстиями.** Усовершенствован процесс создания в стенах и перегородках отверстий сложной формы, а также реализована возможность пересечения отверстий в стене с внешним контуром стены. Таким образом, теперь можно моделировать, например, двери без образования порога в конечно-элементной схеме, угловое оконное или дверное отверстие и др. (рис.10)

**7. Учет бокового давления грунта.** Реализована новая нагрузка – трапециевидная нагрузка из плоскости стены. Эту нагрузку можно использовать, например, для моделирования бокового давления грунта на стену.

Новые возможности для фундаментной плиты. Весь перечень нагрузок, реализованных в программе, теперь стал доступен и для фундаментной плиты. Предусмотрена возможность задания фундаментных балок, усиливающих фундаментную плиту. В связи с этим реализован новый вид сечения балки – прямоугольник с полками плиты внизу. Операция объединения фундаментных плит в одну группу для экспорта в программу «ПЛИТА» дает возможность воспринимать их как единое целое, что значительно упрощает процесс анализа результатов.

Новый метод триангуляции (альтернативный). При формировании расчетной схемы в программах «КОМПОНОВКА» и «ПЛИТА» у пользователя появляется возможность выбирать разные методы триангуляции. Метод-1 автоматически формирует регулярную сетку КЭ по всей плоскости плит перекрытий и стенам. Её основное преимущество заключается в формировании регулярной КЭ сети по всей плоскости этих элементов, при этом основной акцент в процессе построения

направлен в пролетные зоны плит. При выполнении триангуляции, используя 1-й метод, согласование сети КЭ выполняется в приопорной зоне, что не всегда дает возможность выполнить триангуляцию без появления трехузловых пластинчатых КЭ, которые дают меньшую сходимости по сравнению с четырехузловыми КЭ.

В методе-2 триангуляции основной упор направлен на организацию КЭ сети правильной формы (квадраты, равносторонние треугольники) в приопорной зоне, а согласование КЭ сети выносится в пролетные зоны плит. Использование нового метода-2 даёт возможность избежать появления выраженных конечных элементов именно в проблемных приопорных зонах (рис.11).

В ближайших планах предусмотрена реализация нелинейной работы железобетонных конструкций, включение наклонных элементов в общую схему здания, различные схемы расположения арматуры (радиальное, под заданным углом), автоматизация расчета и проектирования стального каркаса многоэтажных зданий с железобетонными перекрытиями, диафрагмами и фундаментной плитой.

#### АНОТАЦІЯ

В тепершній час розвиток будівельної механіки йде по шляху розробки сучасних аналітичних та числових методів, які орієнтовані на широке застосування в розрахункових комплексах. Щільнішим стає зв'язок задач будівельної механіки з проектуванням конструкцій, з технологією їх виготовлення і монтажу. ПК «МОНОМАХ» дозволяє вирішувати великий клас задач будівельної механіки і успішно застосовується в розрахунках будівель та споруд у різних країнах.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, варіантне проектування, каркас, плита, балка, колона.

#### ANNOTATION

At present, advanced analytical and numerical methods are developed in structural analysis. They are intended for widespread use in modern software packages. Problems of structural mechanics are closely related to design of structures, with methods of their fabrication and erection. MONOMAKH software enables the user to solve many problems of structural mechanics. This program is profitably employed in analyses of structures in different countries.

Key Words: reinforced concrete structures, variant design, framework, slab, beam, column.