

# РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ РАМ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ ГЕПАРД-А И SCAD

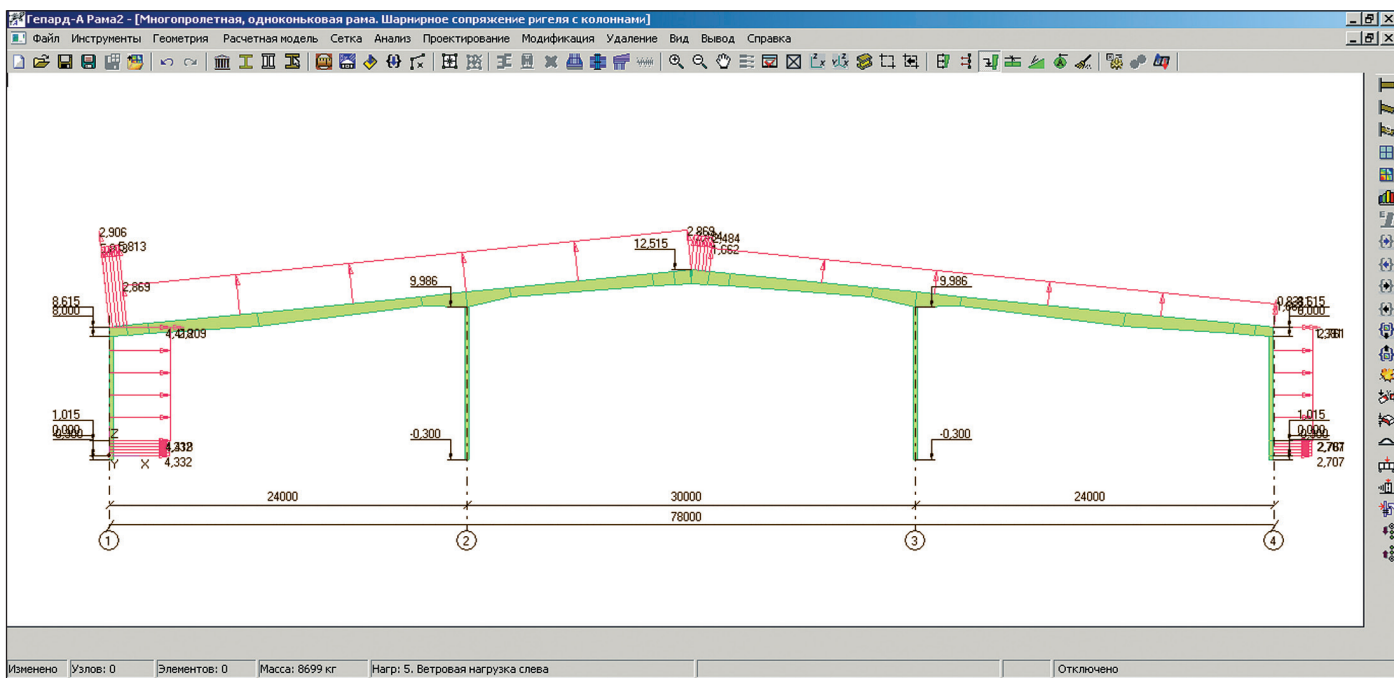


Рис. 1. Окно программы Гепард-А

Для современного рынка стальных строительных конструкций характерен повышенный спрос на здания различного назначения, поставляемые в комплекте (комплектная поставка), состоящем из несущих и ограждающих конструкций, а также необходимых отделочных и крепежных деталей. Сроки поставки при приемлемой стоимости зачастую становятся решающим фактором при выборе поставщика, в то же время «узким местом» является подготовка проектной и разработка рабочей документации, и особенно чертежей КМД. Двухэтапная (КМ-КМД), а с введением новых нормативных требований в некоторых случаях и трехэтапная (КР-КМ-КМД) технология подготовки проектной и разработки

рабочей документации по традиционной схеме, когда одна организация готовит проектную документацию и разрабатывает КМ, а затем другая (КБ завода-изготовителя) выполняет комплект рабочих чертежей КМД, не гарантирует поставки металлических конструкций в установленные сроки из-за неизбежно возникающих неувязок. В настоящее время все более насущной становится потребность в выпуске проектной организацией (независимой или интегрированной с заводом-изготовителем или строительной компанией) сразу рабочей документации КМД. Поскольку подготовка проектной документации, а при необходимости и ее экспертиза, являются обязательной процедурой, актуальной становится технология подготовки проектной документации

в нужном объеме (раздел КР), а затем (или одновременно) выпуск комплекта рабочих чертежей КМД силами одной проектной группы. Предлагаемая далее в этой статье технология позволяет выполнять рациональное проектирование зданий комплектной поставки по сквозной технологии КР-КМД при последовательной или одновременной подготовке проектной документации и разработке рабочих чертежей КМД.

Под рациональным проектированием в контексте предлагаемой технологии понимается подход, который гарантирует заказчику получение комплекта необходимой проектной и рабочей документации в установленные сроки в объеме, определенном Градостроительным кодексом, действующими техническими регламентами, сводами правил, нацио-

нальными стандартами, заданием на проектирование и достаточном для производства и монтажа металлических конструкций. При этом стоимость поставки должна вписываться в бюджет. В отличие от оптимального проектирования, предлагаемая технология не ставит своей задачей получение самого оптимального решения (например, минимизацию массы или приведенных затрат), но при этом содержит элементы оптимизации, основанной на быстром переборе вариантов и завершаемой проектировщиком при достижении заданных параметров стоимости или металлоемкости в установленные сроки. Возможности информационного моделирования и расчета программы Гепард-А [1] (рис. 1) позволяют в течение рабочего дня (на этапе подготовки коммерческого предложения или при проектировании) сделать оценку нескольких вариантов рам различной конфигурации (число и размеры пролетов, уклоны, высоты и т.д.) с разными шагами, а при необходимости – в разных районах.

Возможности моделирования и расчета программы SCAD [2] и отработанная технология передачи данных из Гепард-А в SCAD и обратно (через текстовый файл и API-интерфейс SCAD) позволяют быстро построить трехмерную расчетную модель и выполнить полный набор требуемых нормами проверок.

## Возможности информационного моделирования программы Гепард-А

1. Моделирование ведется на основе плоских параметризованных типовых рам, а в общем случае для плоских произвольных рам – на основе параметризованных элементов. Реализована работа с прокатными и сварными двутаврами переменного сечения с плоскими стенками. Имеющийся набор типовых рам позволяет выполнять компоновку практически любых рам. Планируется реализация сварных двутавров переменной высоты с гофрированными стенками, параметризованных ферм, сквозных колонн, подкрановых балок, тормозных конструкций и т.д.
2. Нагрузки разделены на типовые общие, действующие на любое здание (собственный вес, постоянные, снеговые, ветровые), типовые крановые и произвольные. Формирова-

ние типовых нагрузок выполняется автоматически на основе заданных параметров. Изменение модели приводит к автоматическому перезадаванию нагрузок.

3. На основе параметризованной модели выполняется автоматическая разбивка на стержневые или оболочечные конечные элементы.
4. Встроенный блок конечно-элементного анализа позволяет выполнять для стержневых моделей линейно-статический расчет, анализ потери устойчивости по Эйлеру, модальный анализ.
5. При использовании типовых рам и типовых нагрузок логические связи между загружениями для выбора РСУ формируются автоматически.
6. Встроенные проверки несущей способности элементов (прочность, общая и местная устойчивость, предельная гибкость), прогибов и узловых решений позволяют быстро оценить проектное решение по первой и второй группам предельных состояний.

7. Встроенные средства подбора сечений во многих случаях дают возможность быстро подобрать рациональные сечения элементов (как прокатных, так и сварных).
8. Постоянное отображение массы на нижней информационной панели позволяет оценивать принимаемые решения.
9. Узловые решения параметризованы, а их расчет может выполняться как в составе модели, так и отдельно. Реализован расчет и проектирование жестких и шарнирных узлов опирания колонн на фундаменты, фланцевых узлов, шарнирных узлов опирания ригелей на колонны.
10. Встроенные средства документирования дают возможность быстро подготовить материалы, необходимые для текстовой и графической части раздела "Конструктивные и объемно-планировочные решения" проектной документации, а также на их основе сразу начать разработку КМД без разработки рабочего проекта КМ.

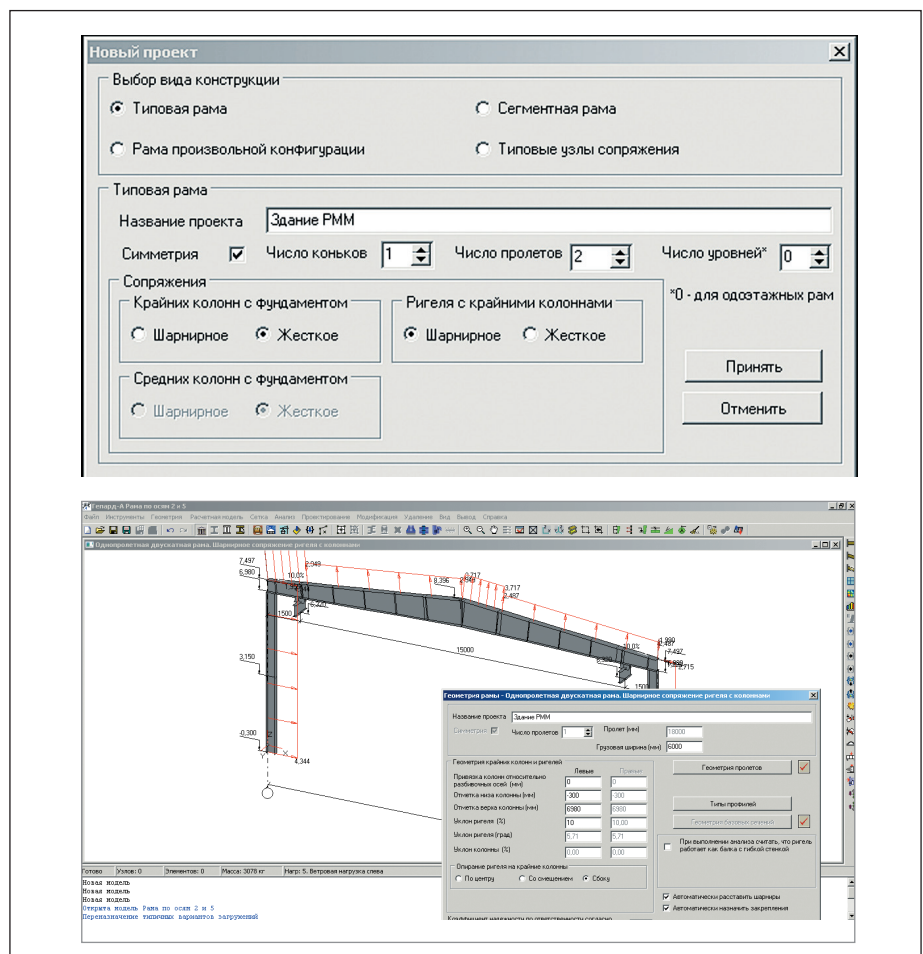


Рис. 2. Окна задания и корректировки основных параметров и графическое отображение информационной модели плоской рамы в Гепард-А

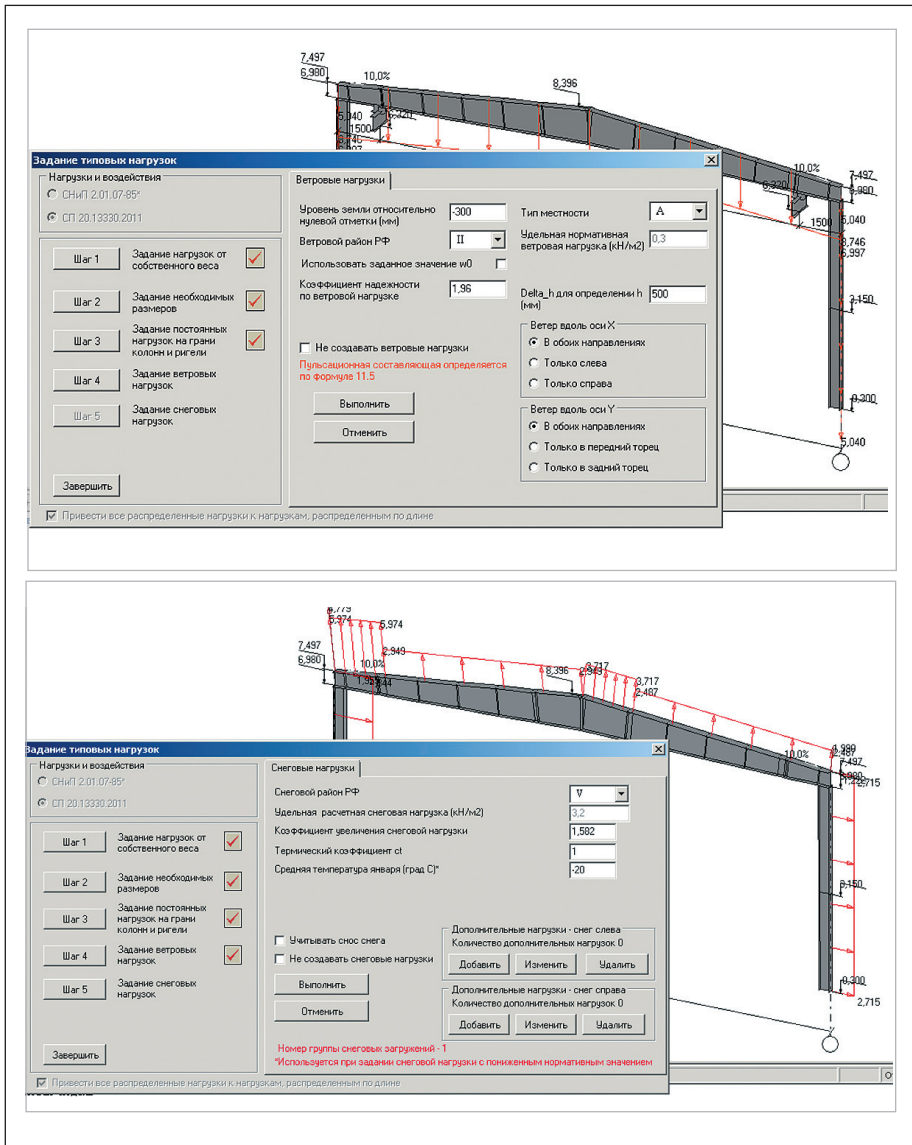


Рис. 3. Окна задания параметров для автоматического создания типовых общих загружений

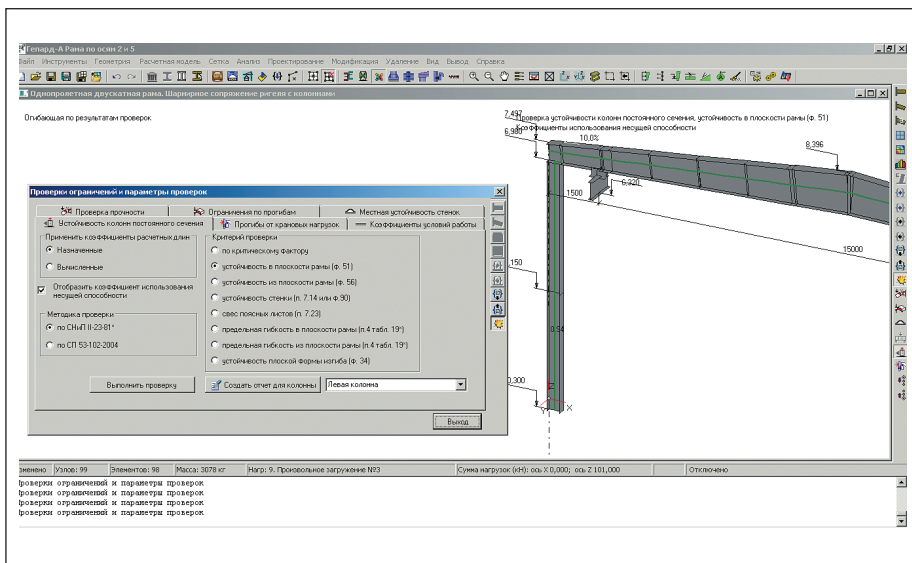


Рис. 4. Отображение результатов расчета несущей способности элементов в графическом окне

11. Возможности экспорта в программы SCAD и Nastran позволяют выполнять расчеты, не реализованные в Гепард-А.
12. Утилита формирования задания на фундаменты, работающая в связке со SCAD через API, дает возможность быстро разработать задание на фундаменты и выполнить расчет опорных узлов на основе модели SCAD.
13. Функции доступа к информационной модели рамы, созданной в Гепард-А, через API позволяют организовать передачу данных в современные плоские чертежно-графические редакторы и системы трехмерного моделирования.

### Описание технологии

1. В программе Гепард-А создается информационная модель плоской рамы (рис. 2), а в перспективе – набор плоских рам по соответствующим осям, на основе которых будет формироваться трехмерная модель.
2. В программе Гепард-А путем задания основных параметров (рис. 3) автоматически создаются типовые нагрузки (собственный вес, постоянные, снеговые, ветровые с учетом пульсационной составляющей и крановые нагрузки).
3. В программе Гепард-А выполняются автоматическая разбивка на стержневые конечные элементы, статический расчет и подбор сечений, расчет узлов и проверка прогибов (рис. 4-6).
4. Выполняется экспорт расчетной модели в SCAD, где выстраивается трехмерная модель (рис. 7) и выполняются установленные нормативными документами проверки. На рис. 8 представлены коэффициенты использования несущей способности и диаграмма факторов в программе SCAD, а на рис. 9 показана первая форма потери устойчивости каркаса, полученная в программе SCAD. Следует отметить, что согласно п. 4.2.6 и 4.3.2 СП 16.13330.2011 [3] оценка общей устойчивости каркаса является обязательной. Оценка общей устойчивости и нормируемый коэффициент запаса устойчивости  $Y_s=1,3$ , наряду с привычным поэлементным расчетом, существенно повышают качество расчетного обоснования и надежность конструкций даже для традиционных каркасов, у которых, как правило, поэлементный расчет полностью обеспе-

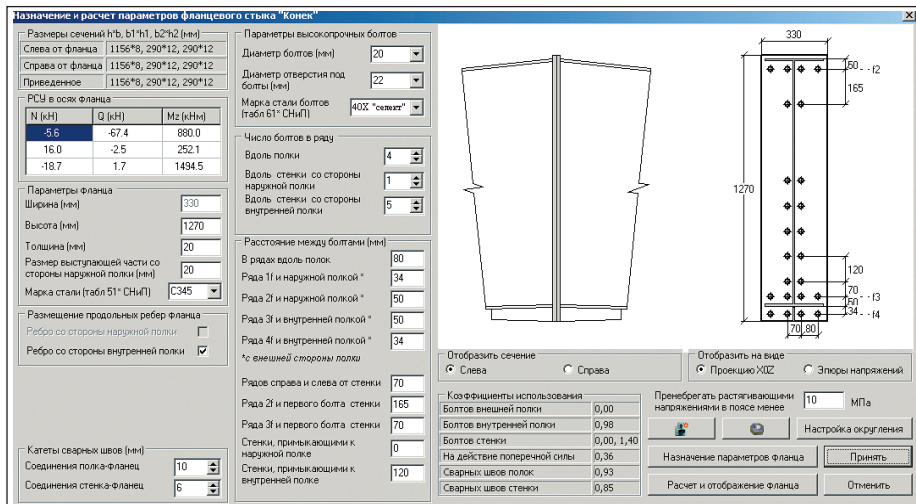


Рис. 5. Окно проектирования фланцевого стыка

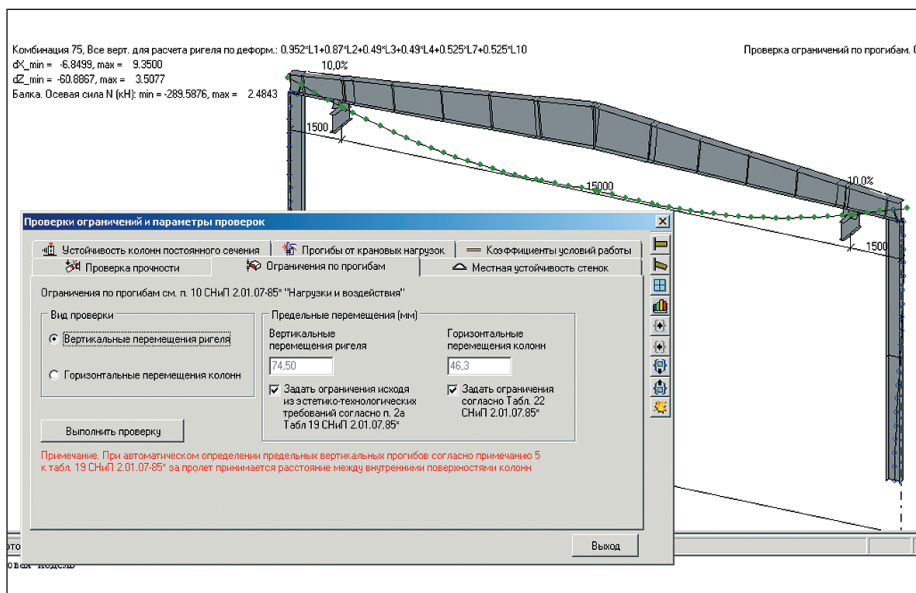


Рис. 6. Проверка вертикального прогиба

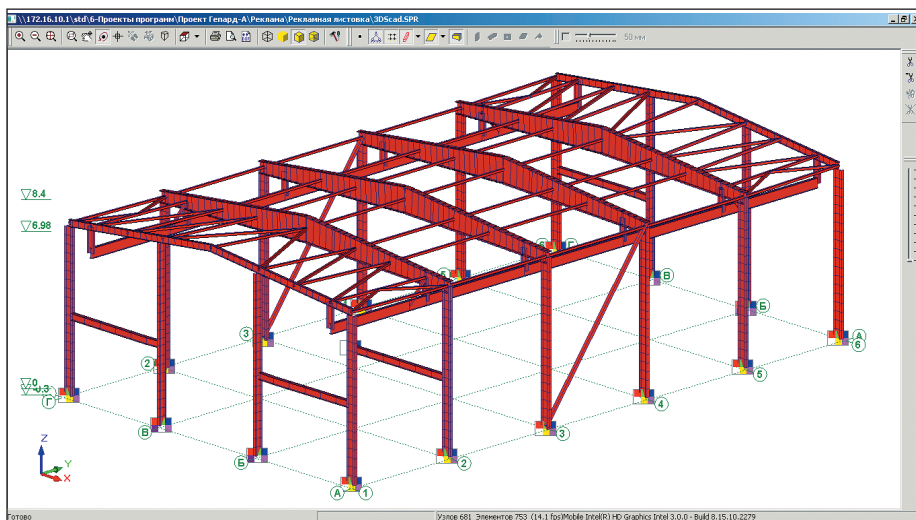


Рис. 7. Трехмерная расчетная модель в программе SCAD, построенная на основе плоских рам, созданных в Гепард-А

чивает гарантию несущей способности. Необходимо отметить, что проверка общей устойчивости даже для традиционных конструктивных схем, как минимум, поможет выявить грубые ошибки в конструкции или расчетной модели.

5. С помощью утилиты подготовки задания на фундаменты, работающей в связке со SCAD через API, на основе PCU трехмерной модели SCAD выполняются подготовка задания на фундаменты и расчет опорных узлов в режиме сквозного проектирования (рис. 10). Следует отметить, что утилита формирования заданий на фундаменты является универсальной и может работать с любой моделью SCAD. Результатом работы утилиты являются таблицы нагрузок на фундаменты, рассчитанные опорные узлы, схемы привязки и параметры фундаментных болтов.
6. Модуль формирования отчетов позволяет быстро подготовить результаты расчета для текстовой части раздела "Конструктивные и объемно-планировочные решения" проектной документации (рис. 11).
7. При необходимости средствами Гепард-А автоматически генерируется оболочечная модель, затем она экспортируется в SCAD или Nastran, где выполняется дополнительный анализ. В частности, достаточно эффективно в SCAD можно осуществлять анализ местной устойчивости стенки переменного сечения, точный расчет которой по действующим нормам не представляется возможным. На рис. 12 показаны созданная в Гепард-А оболочечная модель – слева, а справа – форма потери устойчивости стени в SCAD. На рис. 13 представлена потеря несущей способности рамы, выполненная в программе Nastran по технологии нелинейного деформационного анализа с учетом геометрической и физической нелинейности на основе диаграмм работы стали (оболочечная модель экспортировалась из программы Гепард-А). Нужно отметить, что нелинейный деформационный анализ позволяет получить фактическую оценку способности стальной конструкции на основе оболочечной модели, что в будущем даст возможность отказаться от иногда запутанных нормативных проверок, основанных на стержневых моделях.

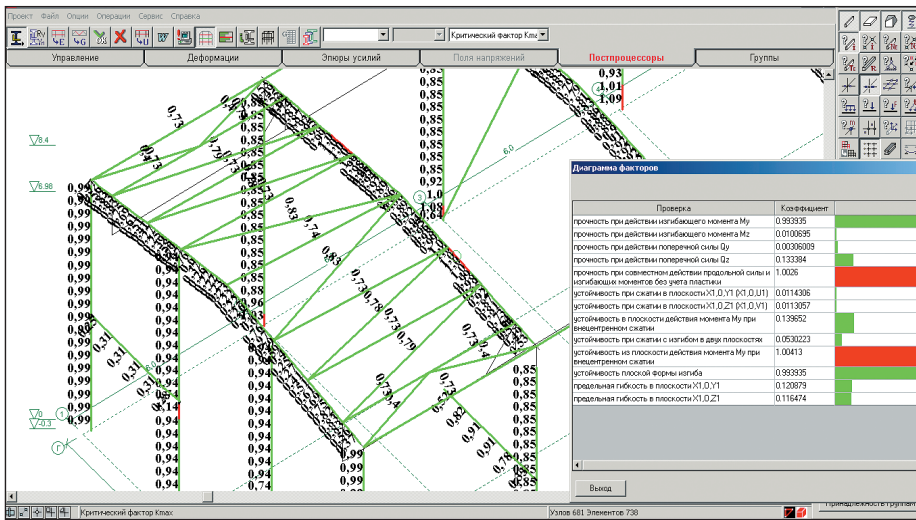


Рис. 8. Фрагмент модели SCAD с отображением максимальных коэффициентов использования и диаграммы факторов в наиболее нагруженном элементе ригеля

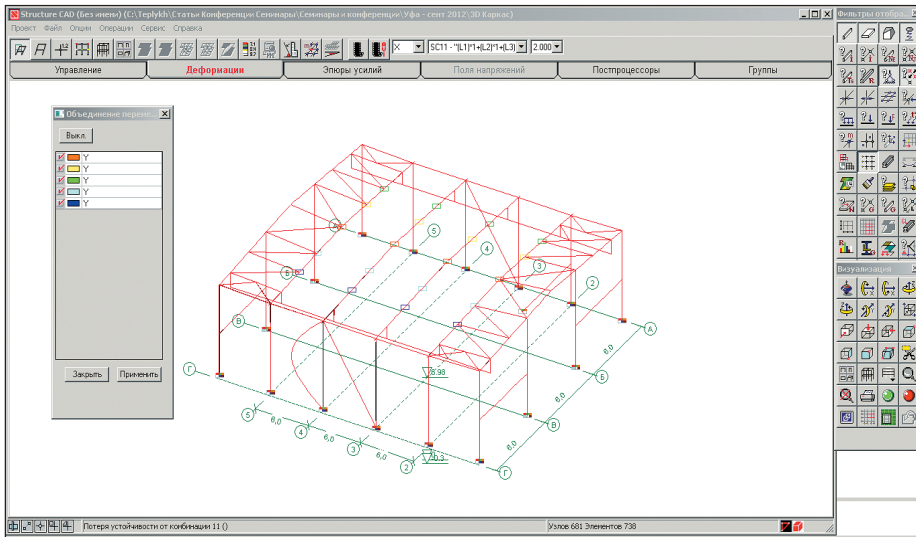


Рис. 9. Первая форма потери устойчивости каркаса в SCAD ( $\gamma_s=1,66>1,3$ )

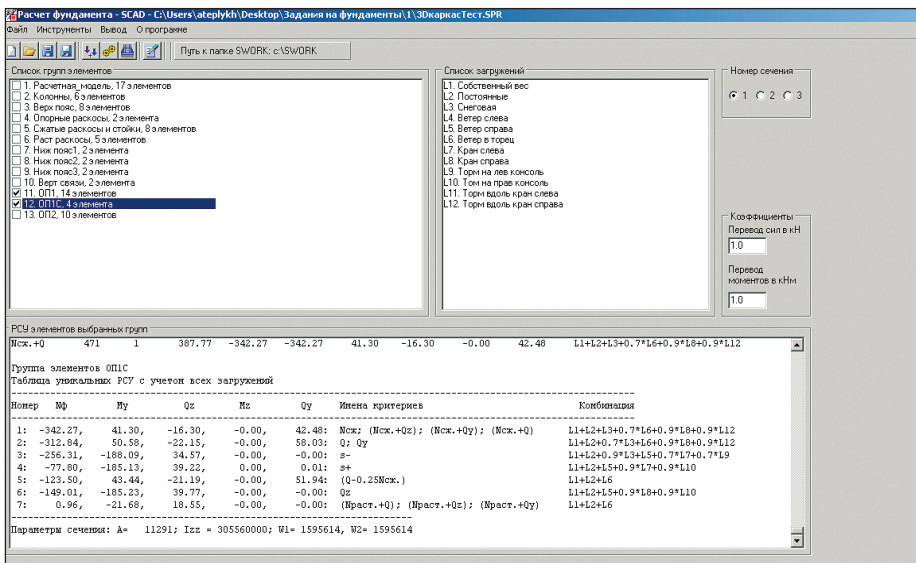


Рис. 10. Окно утилиты формирования заданий на фундаменте

При выполнении анализа устойчивости стенки с применением оболочечной модели возникает вопрос о корректности расчета. В статье [4] представлены исследования, которые показывают, что для наиболее часто используемого диапазона приведенных гибкостей стенок от 4 до 6 разница с расчетом по СНиП II-23-81\* колеблется в границах от 3 до 8%. На рис. 14 показана форма потери устойчивости в SCAD для двухпролетной балки при совместном действии  $M$  и  $Q$ , а в табл. 1 представлены результаты сравнения расчета устойчивости стенки для различных гибкостей между оболочечной моделью SCAD и СНиП II-23-81\*.

8. В перспективе информационная модель Гепард-А будет экспортироваться в систему трехмерного моделирования. В настоящее время имеется опыт экспорта поперечного разреза рамы в чертежно-графический редактор КОМПАС-График. Планируется экспорт в программу Tekla.
9. На основе трехмерной модели или средствами уже традиционного электронного плоского черчения выполняется разработка комплекта рабочих чертежей КМД.

В заключение следует сказать, что современные расчетные комплексы позволяют разрабатывать технологии, обеспечивающие анализ отклонений при производстве и быстрое принятие обоснованных решений. В статье [5] представлены результаты тестовых расчетов Т-образного фланца и намечены контуры технологии, позволяющей выполнять анализ и принимать обоснованное решение о допустимости или недопустимости эксплуатации часто применяемых фланцевых узлов с очень распространенным дефектом – грибовидностью. На рис. 15 показано напряженно-деформированное состояние тестовой модели Т-образного фланца.

В будущем описанная технология позволит разрабатывать информационную параметризованную модель целого здания, что в некоторых случаях даст возможность сократить до нескольких минут подготовку проектной и разработку рабочей документации и программ для станков с ЧПУ, а в недалекой перспективе и для 3D-принтеров. Следует также отметить, что развитие этого

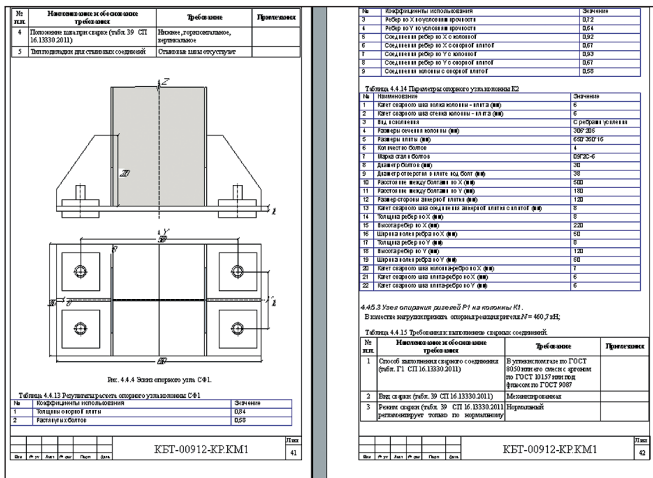


Рис. 11. Результаты расчета опорного узла в составе текстовой части раздела КР проектной документации, подготовленные средствами Гепард-А

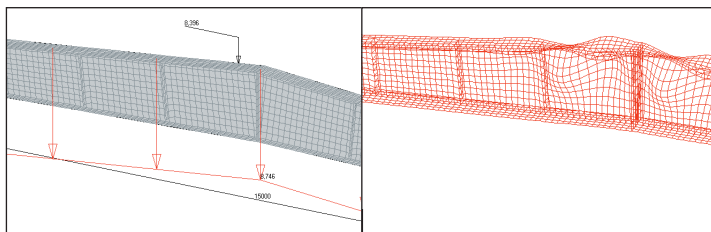


Рис. 12. Модель из оболочечных элементов, созданная автоматически в Гепард-А (слева), и первая форма потери устойчивости стенки в SCAD (справа)

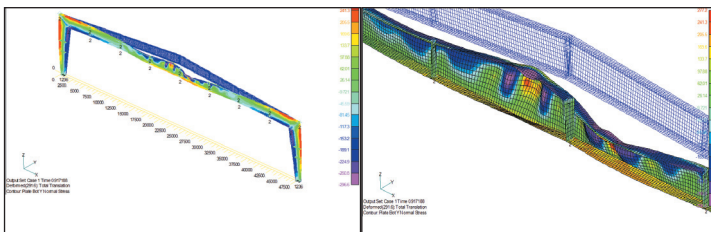


Рис. 13. Потеря несущей способности рамы в программе Nastran

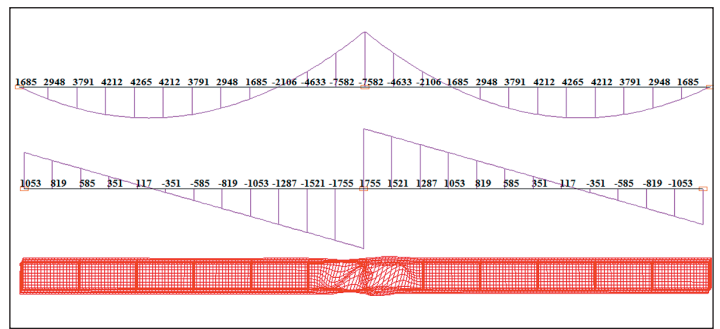


Рис. 14. Форма потери устойчивости стенки двухпролетной балки в SCAD

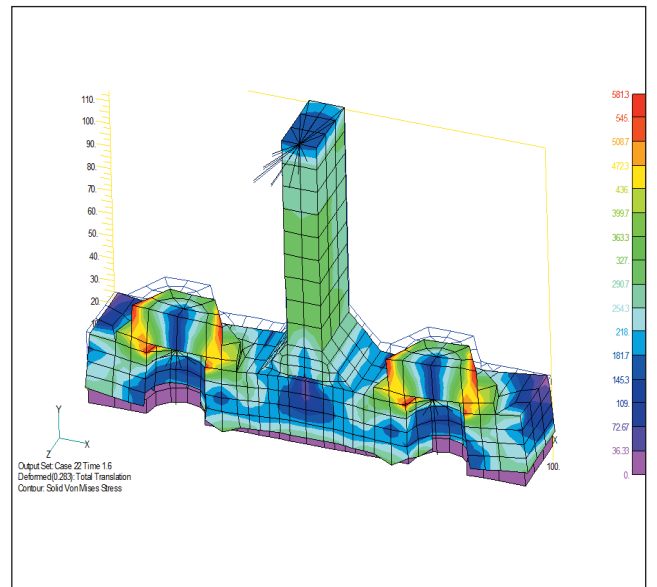


Рис. 15. Напряженно-деформированное состояние тестового Т-образного фланца

$R_{t,1}/MM$	$t_{mm}$	$R_{t,2}$ кН/см <sup>2</sup>	$\lambda_{т,1}$	$\sigma_{t,1}$ при $\beta=0,8$	$\sigma_{t,2}$ при $\beta=0,8$	$\sigma_{t,3}$	$M$ кНм	$Q$ кН	$\sigma$ кН/см <sup>2</sup>	$\epsilon$ кН/см <sup>2</sup>	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ Scad	Разница со СНиП %
1800	10	24	6,14	22,57	21,72	4,52	6107,4	1638	22,12	9,1	0,447	0,443	0,464	4,48
1800	12	24	5,12	32,5	30,37	6,51	6107,4	1638	21,29	7,58	0,748	0,735	0,736	0,08
1800	14	24	4,39	44,24	39,73	8,86	6107,4	1638	20,52	6,5	1,152	1,115	1,067	-4,45
1800	16	24	3,84	57,78	48,96	11,57	6107,4	1638	19,8	5,69	1,669	1,571	1,452	-8,2
1800	18	24	3,41	73,13	61,8	14,64	6107,4	1638	19,13	5,06	2,309	2,157	1,885	-14,41

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа расчета устойчивости стенки при совместном действии поперечной силы и изгибающего момента в SCAD со СНиП II-23-81\*

подхода обеспечит переход к полностью безбумажной технологии проектирования, изготовления и монтажа металлических конструкций вообще и зданий комплектной поставки в частности.

**Литература**

1. Рычков С.П. Программа моделирования, анализа и проектирования произвольных рамных конструкций Гепард-А. Руководство пользователя. Самара, 2012 г.

2. Вычислительный комплекс SCAD/ В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко [и др.]. М.: СКАД СОФТ, 2009, 656 с.

3. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*.

4. Теплых А.В. Применение оболочечных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом физической и геометрической нелинейности/"Промышленное и

гражданское строительство", 2011, № 6, с. 49-52, № 7, с. 38-40.

5. Теплых А.В. Оценка предельной несущей способности фланцевого соединения на высокопрочных болтах/"Строительная механика и расчет сооружений", 2011, № 2, с. 37-41.

Андрей Теплых,  
Сергей Рычков  
ООО "КБТ" (г. Самара)