

УДК 004.422.8

СИМБИРКИН В.Н., канд. техн. наук, **ФРОСИН А.В.**, канд. техн. наук
ООО «ЕВРОСОФТ», Москва

РАЗВИТИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА СТАРКОН ДЛЯ МАССОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Рассматриваются вопросы построения и развития автоматизированной системы СТАРКОН, применяемой для инженерного анализа при проектировании и исследовании строительных конструкций и сооружений. Обобщён опыт и представлены основные результаты совершенствования системы за прошедший пятилетний период. Приведены сведения о взаимодействии её компонентов. Указаны некоторые пути дальнейшего развития системы.

В последние годы в России отмечен рост объёма строительства объектов высокого уровня ответственности с возможным массовым присутствием в них людей: высотных зданий и сооружений, крупных спортивных, культурных и торговых комплексов и др. Это поставило серьёзные задачи перед строительной наукой и проектно-строительными организациями страны. В свою очередь, не менее серьёзные требования были предъявлены к системам автоматизации проектирования (САПР), в том числе, к системам инженерного анализа (САЕ) массового применения в строительстве. К таким требованиям можно отнести развитие метода конечных элементов для эффективного решения пространственных задач большой размерности, разработку информационных технологий для нелинейных расчетов, расчетов конструкций при вероятных аварийных ситуациях и, в частности, на прогрессирующее разрушение, для проектирования с учетом последовательности возведения объекта, развитие программной интеграции с системами автоматизированного конструирования и оформления конструкторской документации (CAD), эффективных методов и средств 3D-моделирования и т.п.

Основным требованием, предъявляемым к САЕ-системам в строительстве на современном этапе, является функциональность, достигающаяся за счет реализации широкого круга численных методов для решения задач строительной механики и автоматизации инженерных методик, заложенных в российские и международные стандарты в предметной области. Общие характеристики функциональных возможностей САЕ-систем в строительстве, представленных на российском рынке, предложены в [1]. Необходимость расширения возможностей функциональности программной системы неизбежно ставит перед её разработчиками задачу реализации принципа модифицируемости и реализации других атрибутов качества программной системы [2], связанных со встраиванием вновь разработанных программных кодов в существующую промышленную систему. С другой стороны, увеличение объёмов обрабатываемой информации, возникновение требований повышения быстродействия отдельных функций, точности вычислений, а также появление новых поколений компьютеров, операционных сред и технологий программирования требуют реализации принципа модифицируемости автоматизированной системы, связанного с изменением количественных показателей функциональности существующих программных кодов. Так как жизненный цикл непрерывно ведущейся разработки САЕ-системы в условиях промышленного внедрения исчисляется десятилетиями, то решение описанных выше задач требует от её разработчиков значительных усилий.

Рассмотрим вопросы и опыт модифицируемости автоматизированной системы инженерного анализа в строительстве СТАРКОН за прошедший пятилетний период.

Система СТАРКОН разрабатывается научно-производственным предприятием ООО «ЕВРОСОФТ» с 1993 года и состоит из набора интегрированных программных комплексов и программ окружения. Ядром системы служит программный комплекс (ПК) STARK ES [3] для расчета конструкций зданий и сооружений на прочность, устойчивость и колебания. Статический и динамический расчет несущих систем зданий и сооружений в ПК выполняется на основе метода конечных элементов с использованием произвольных, принятых пользователем комплекса, расчетных схем.

Интероперабельность системы достигается за счет конструктивной и конечно-элементной (КЭ) пространственных моделей сооружения соответственно.

Конструктивная 3D-модель сооружения в системе СТАРКОН (в системе для ее обозначения используется термин «позиционная модель») – это совокупность элементов, описывающих свойства строительных конструкций сооружения и воздействий на них. Каждый такой элемент представляет собой контейнер данных, фиксирующий:

- однозначную идентификацию типа элемента согласно принадлежности к принятой классификации строительных конструкций;
- геометрическую структуру элемента;
- расположение элемента в пространстве относительно глобальной системы координат и относительно других элементов (топологию);
- физические свойства;
- интерпретацию в конечно-элементном представлении.

Можно говорить, что контейнеры данных элементов модели являются дочерними элементами главного контейнера пространства модели, единственной характеристикой которого является глобальная система координат.

Конечные элементы в системе СТАРКОН подразделяются на три вида:

- одномерные конечные элементы (стержни) [4];
- двумерные конечные элементы (пластины) [5]-[8];
- трехмерные конечные элементы-многогранники (трех- или четырехгранные пирамиды и призмы) [9].

Формирование конечно-элементной модели сооружения достигается генерацией КЭ-сетки. Основные принципы реализации процесса изложены в [10]. В результате генерации КЭ-сетки элементы конструктивной модели сооружения интерпретируются в КЭ виде. Так, конструктивные элементы типа «стена» или «плита» интерпретируются конечными элементами вида «пластины», элементы типа «балка» или «колонна» – конечными элементами вида «стержни». В последние годы генератор КЭ-сетки подвергся серьезной переработке, что позволило многократно ускорить работу алгоритма. Также модуль пополнился расширенной диагностикой при проверке исходной конструктивной модели на корректность её формирования.

Для обеспечения импорта/экспорта данных из/в конечно-элементную модель ПК ЛИРА (производитель ООО «Лирасофт», Украина) в составе системы СТАРКОН разработан конвертор StarLi, обрабатывающий данные, сохранённые в XML-формате. Информационная технология расчета с использованием двух независимых программ и некоторые аспекты её применения при расчетах строительных конструкций изложены в [11]. Указанная технология позволяет корректно интерпретировать до 95-100% передаваемых данных.

Расчеты конструкций на основе метода конечных элементов позволяют определить в них силовые факторы и перемещения. ПК STARK ES осуществляет линейный и нелинейный статический расчет, расчеты на собственные и вынужденные колебания, на устойчивость, спектральный анализ матрицы жесткости и предельный жестко-пластический анализ. Значительно возросшие размерности расчетных схем требуют применения новейших методов в разработке КЭ решателя. В настоящий момент в институте ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко ОАО «НИЦ«Строительство» проходит опытную

эксплуатацию решатель, позволяющий работать на персональных ЭВМ с расчетными схемами размерностью до шести миллионов неизвестных. Совместно с институтом автоматизации проектирования (ИАП) РАН ведутся работы по организации параллельных вычислений на высокопроизводительных ЭВМ [12]. Результаты работы решателя используются при анализе состояния и поведения сооружения, а также для проведения конструктивных расчетов по определению требуемых параметров конструктивных решений.

При определении расчетных сочетаний усилий в элементах расчётной схемы в своё время был реализован подход, основанный на полном переборе имеющейся информации. Значительное усложнение расчетных схем выявило ряд серьёзных ограничений при использовании такого подхода. Был предложен новый подход, позволивший многократно ускорить работу алгоритма и снять ограничения по числу временных нагружений при определении расчетных сочетаний усилий и реакций опор.

Расчеты железобетонных и металлических конструкций осуществляются не только с помощью ПК STARK ES, но и с помощью ПК для расчета и конструирования отдельных элементов строительных конструкций и узлов ПРУСК и МЕТАЛЛ. В отличие от ПК STARK ES, в этих комплексах рассматриваются конкретные частные типы строительных конструкций, для которых используются не произвольные, а стандартные расчетные схемы. В ПК ПРУСК рассматриваются:

- системы железобетонных плоских и ребристых плит;
- многопролетные железобетонные балки прямоугольного или таврового сечения с вутами;
- многоэтажные железобетонные колонны прямоугольного, кругового, кольцевого или полигонального сечения;
- сваи сплошного и полого квадратного и кругового сечения, сваи-оболочки;
- железобетонные плитные, ленточные и столбчатые фундаменты;
- сварные узлы стальных рам.

В ПК МЕТАЛЛ рассматриваются следующие стальные конструкции и их элементы:

- базы колонн;
- узлы ферм;
- прямоугольные бункеры и бункерные балки;
- фланцевые соединения на высокопрочных болтах;
- элементы из прокатных, гнутых и составных профилей.

Ведомость отправочных элементов и техническая спецификация стали к чертежам на стадии КМ формируются в DXF-формате. Расчетные сочетания усилий и другие необходимые данные передаются из STARK ES в текстовом формате и автоматически.

В последнее пятилетие разработаны новые программы для расчета железобетонных конструкций, осуществляющие обмен данными со STARK ES на основе XML-формата. Это RCDiagra – модуль расчета стержневых железобетонных элементов по нормальным сечениям с использованием нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры, и PlatePunch – модуль расчета бетонных и железобетонных плит на прочность при продавливании колоннами. Также STARK ES пополнился реализацией указаний и методик СП 52-101-2003 для расчета железобетонных стержневых и пластинчатых элементов.

Для работы с базой характеристик прокатных профилей был разработан модуль ProfilTool, который расширил функциональность в дополнение к возможностям модуля определения характеристик произвольных сечений ProfilMaker.

Динамический расчет конструкций на сейсмические воздействия линейно-спектральным методом в последнее время пополнился реализацией норм Азербайджана, Казахстана, Армении и Украины, а также реализацией российского свода правил СП 31-

114-2004. При активном участии и научно-технической поддержке сотрудников ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко д.т.н., профессора Ю.П. Назарова и к.т.н. И.В. Лебедевой в ООО «ЕВРОСОФТ» разработан модуль ОДИССЕЙ, предназначенный для обработки записей сейсмического движения грунта, представленных акселерограммами, или синтезированных акселерограмм. Результаты работы модуля могут быть использованы для расчета конструкций зданий и сооружений на сейсмические воздействия в ПК STARK ES и других программах.

Разработаны динамические расчеты, позволяющие выполнять анализ отклика конструкций во времени на многокомпонентные акселерограммы с учетом ротационных составляющих сейсмического воздействия, а также на сосредоточенные силы и моменты, произвольно изменяющиеся во времени.

Для расчета конструкций на воздействие ветра предусмотрено автоматическое определение и задание средней составляющей ветровой нагрузки, распределенной по фасаду здания.

Реализована оценка прочности стержневых и пластинчатых элементов при статических и динамических воздействиях, в т.ч. поверочный расчет с использованием акселерограмм сейсмического движения грунта [13]. Прочность элементов оценивается коэффициентом использования прочности, который равен отношению нагрузочного эффекта к несущей способности элемента. Для удобства восприятия пользователем предусмотрено не только количественное отображение коэффициентов использования прочности на КЭ-модели, но и предложено решение в цветовой гамме. Графическое представление области прочности обеспечивается модулем StrengthRegion.

В версии системы 2010 года реализованы информационные технологии расчета строительных конструкций с учетом последовательности возведения конструкций и вариации (возможной изменчивости свойств) расчетной модели. Доказательная база необходимости проведения расчетов по указанным технологиям приведена в [14].

Получение пользователем в режиме реального времени необходимой нормативно-справочной информации, осуществление быстрого расчета для получения различных характеристик, необходимых в процессе проектирования, обеспечивает справочник-калькулятор СпИн, возможности которого описаны в [15] и пополнены в последние годы. Одной из таких новых возможностей является расчет характеристик многослойного грунтового основания и их автоматическая передача в STARK ES.

Формирование отчетов, содержащих исходные данные и результаты расчетов и конструирования, производится с помощью модуля Viewer, позволяющего вывести отчёты на печать и сохранить данные в RTF-формате.

Соответствие российским строительным нормам и правилам системы инженерного анализа в строительстве СТАРКОН в составе программ STARK ES, ПРУСК, МЕТАЛЛ, СпИн подтверждено сертификатом Госстроя России № РОСС RU.СП15.Н00291 от 01.02.2010.

С точки зрения разработки программного обеспечения особое внимание в последние годы уделено вопросам повышения отказоустойчивости системы, внедрению современных структур данных, ускорению сходимости алгоритмов и замене устаревших программных кодов, особенно тех, которые появились ещё на заре разработки системы. В настоящий момент реализация особо сложных алгоритмов в системе СТАРКОН проходит проверку с помощью unit-тестов, накопление базы которых положительно влияет на повышение работоспособности системы, обеспечивает мгновенный отклик на различные ситуации, возникающие при внесении изменений в программный код, а также способствует улучшению архитектуры программного обеспечения. Постоянно пополняется база верификационных тестов вычислительных алгоритмов, входящая в официальную поставку системы.

В дополнение к тестированию, новые версии компонентов системы СТАРКОН проходят этап опытной эксплуатации. Временной интервал этапа составляет обычно несколько месяцев. Как правило, опытная эксплуатация осуществляется в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко при расчете реальных наиболее сложных и большеразмерных сооружений. Как показывает опыт, данная практика позволяет существенно улучшить качество выпускаемой программной продукции, снизив до минимума вероятность отказов и ошибочных результатов работы системы.

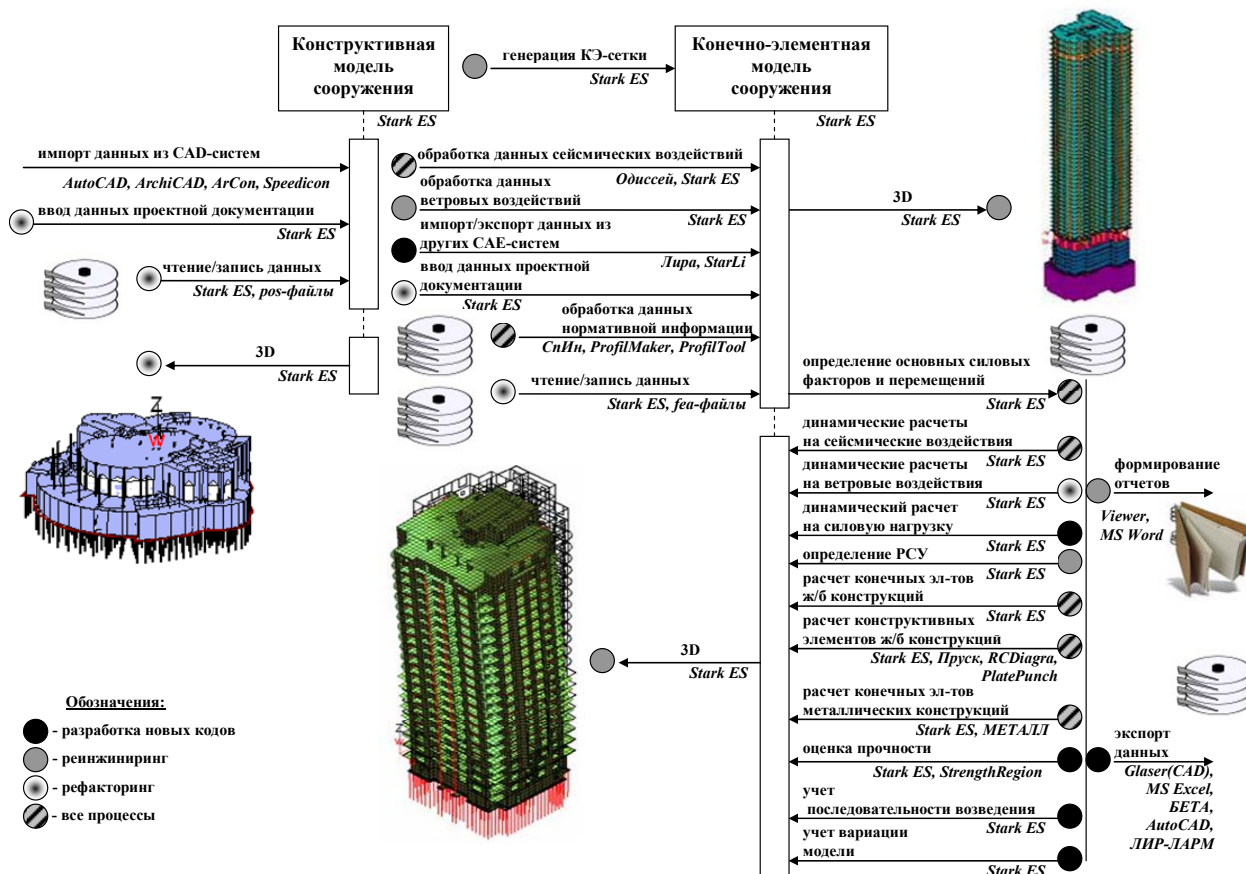


Рис. 1. Диаграмма взаимодействия компонентов системы СТАРКОН

Диаграмма взаимодействия компонентов системы СТАРКОН приведена на рис. 1. На диаграмме в горизонтальном измерении показан порядок возникновения и взаимодействия основных компонентов системы. При отображении на диаграмме процессов взаимодействия основных компонентов указаны программные модули, краткое описание которых дано выше. Вертикальное измерение показывает цикл жизни отдельных компонентов. Кружками отмечены изменения, произведенные в течение последнего пятилетия. Было достигнуто расширение функциональности системы как за счет разработки новых приложений, так и путем существенной переработки существующих кодов программ (реинжиниринг). Также была изменена внутренняя структура большинства компонентов без увеличения их функциональных возможностей (рефакторинг). Как видно из приведенной диаграммы, в последнее пятилетие изменения коснулись практически всех компонентов системы, что свидетельствует о том, что система СТАРКОН является развивающейся системой, открытой для решения серьезных отраслевых задач.

В будущем подобная работа будет продолжена. Предусмотрена постепенная замена устаревающих кодов и приложений на новые. Дальнейшее развитие системы видится не только в разработке и реализации новых численных методов и алгоритмов, но и в развитии интеграции CAD/CAE систем на основе стандарта Industry Foundation Classes

(IFC) [16] и переносе ряда процессов взаимодействия с области функционирования КЭ-модели на область конструктивной модели сооружения.

Литература

1. Расчеты надземной части с применением сертифицированных программ// Современное высотное строительство: монография. – М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. – С. 239-242.
2. Басс Л., Клементс П., Кацман Р. Архитектура программного обеспечения на практике. 2-е изд. – С.-Петербург: Питер, 2006. – 575 с.
3. Программный комплекс STARK ES//Современное высотное строительство: монография. – М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. – С. 243-244.
4. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1974.
5. V.A. Semenov, P.Yu. Semenov. Hybrid finite elements for analysis of shell structures// Proceedings of international congress ICSS-98, June 22-26, 1998, Moscow, Russia. – Vol. 1. – 1998.
6. Walder U. Beitrag zur Berechnung von Flaechentragwerken nach Methode der Finiten Elemente. – Dissertation, ETH, Zuerich, 1977.
7. Barth Ch., Lutzkanov D. Neue finite Elemente fuer dicke und duenne Platten// Bauinformatik. – 1994. – Н. 6.
8. Barth Ch., Lutzkanov D. Moderne finite Elemente fuer Scheiben und Schalen mit Drehfreiheitsgraden// Bauinformatik. – 1995. – Н. 6.
9. Punch E.F., Atluri S.N. Applications of isoparametric three-dimensional hybrid-stress finite elements with least-order stress fields// Computers and Structures. – 1984. – Vol. 19, No. 3.
10. Жирнова Т.В., Семёнов В.А., Симонян А.С. Оптимизация конечноэлементных расчетных сеток пространственных конструкций//Инжиниринг и инвестиционные проекты/ М.: Сборник научных трудов ЦНИИпроект, выпуск 1, 2001. – С. 157-170.
11. Городецкий А.С., Назаров Ю.П., Жук Ю.Н., Симбиркин В.Н.. Повышение качества расчетов строительных конструкций на основе совместного использования программных комплексов STARK ES и ЛИРА// Информационный вестник Мособлгосэкспертизы. – 2005. – № 1(8). – С. 42-49.
12. Жук Ю.Н., Симбиркин В.Н., Филимонов А.В., Якушев В.Л. Применение метода подконструкций для решения больших задач методом конечных элементов// Санкт-Петербургский научный форум «Наука и общество», Информационные технологии: Тезисы докладов, С.-Петербург, 21-25 сентября 2009 г. – С. 255-259.
13. Назаров Ю.П., Симбиркин В.Н., Филимонов А.В. Оценка прочности элементов пространственных сооружений при землетрясении, моделируемом акселерограммами// Современное сейсмостойкое строительство: Тезисы докладов международной конференции молодых специалистов, Алматы, 5-7 июня 2006 г. – С. 106-107.
14. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
15. Лебедев В.Л., Фросин А.В. Электронный справочник- калькулятор для инженерно-технических работников проектных и строительных организаций// М: Поиск. – №6. – 2003. – С. 123-127.
16. Рэммет Ю.Р. Интегрированное проектирование в строительстве// САПР и графика. – 2006. – № 8. – С. 16-18.