

# Профессиональные решения для инженерного анализа конструкций

Владимир Шелофаст, Сергей Розинский, Максим Венедиктов

*В статье представлены новые возможности программного обеспечения, которые компания НТЦ «АПМ» подготовила в текущем году и анонсировала на ежегодном Форуме «ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ». Все изменения и обновления этого года станут доступными на нашем сайте и будут представлены как новая, 17-я версия. Многие изменения в релизе носят принципиальный характер. Речь идет о разработке новых решений, которые существенно укрепят позиции компании на рынке CAE-услуг. Оценивая только количественную сторону вопроса, следует отметить, что перечень изменений и дополнений в АРМ V17 занимает более ста позиций.*

#### Владимир Шелофаст

Д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, генеральный директор НТЦ «АПМ».

#### Сергей Розинский

Заместитель генерального директора по развитию НТЦ «АПМ».

#### Максим Венедиктов

Ведущий математик-программист НТЦ «АПМ».

В Подмосковье 21-23 мая 2019 года очередной майский Форум «ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ» компании НТЦ «АПМ» собрал инженеров промышленных пред-

приятий со всей России, которым небезразлична судьба отечественных программных продуктов в области CAE-анализа (рис. 1). Сейчас много говорится о необходимости использования отечественных си-

стем для производственной деятельности предприятий и организаций страны. Понятно, что связано это с тотальной санкционной политикой по отношению к России в целом и к отдельным компаниям в

частности. Западный мир на этом не остановится, и в ближайшем будущем всем нам нужно готовиться к ужесточению ситуации.

Санкционные запреты следует прежде всего относить к наукоемким инженерным технологиям,



Рис. 1. Общее фото участников XVIII ежегодного Форума «ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ»

где эти ограничения могут привести к большим негативным последствиям. Эти негативные последствия, несомненно, приведут к потере качества при выполнении проектно-конструкторских разработок в области вооружений, атомной промышленности, самолетостроения и во многих других областях машиностроения, приборостроения и строительства.

В связи с этим понятно, что существующая внешняя среда вынуждает Россию проводить политику импортозамещения в области наукоемких технологий, и только такая политика может радикально изменить ситуацию к лучшему.

Отметим, что вклад в импортнезависимость России в плане разработки инженерного ПО принадлежит и компании НТЦ «АПМ», что и было продемонстрировано на Форуме, результаты которого мы хотим обсудить в данной публикации.

## Инструменты для подготовки моделей и базовая математика

Первое, на что необходимо обратить внимание читателей, это то, что в 17-й версии обновился трехмерный графический редактор APM Studio, который был переведен на трехмерное графическое ядро компании АСКОН. Эта масштабная работа была принята, поскольку НТЦ «АПМ» и компания АСКОН, наряду с другими компаниями, образуют консорциум «РАЗВИТИЕ», в рамках которого просто необходима интеграция для создания современных и совершенных компьютерных решений.

Для создания геометрических моделей была реализована процедура импорта объектов в среду APM Studio с использованием форматов, предлагаемых графическим ядром компании АСКОН и экспорта геометрической информации в формате STEP. Что ка-



Рис. 2. Фрагмент выступления, посвященного обновленному редактору APM Studio

сается экспорта, то эта функция была реализована, чтобы обеспечить передачу графической информации для выполнения последующих операций жизненного цикла изделий.

На Форуме в модуле APM Studio были показаны результаты последовательного формирования графической модели, ее преобразование в расчетную модель и выполнение всего комплекса пре- и постпроцессорных процедур, необходимых для проведения полноценного инженерного анализа.

Следует отметить, что важным дополнением расчетного программного обеспечения является возможность автоматической генерации сетки конечных элементов. Совершенствуя технологию конечно-элементного анализа, компания объявила о выходе генератора конечно-элементной сетки с автоматическим определением шага разбиения. Если раньше при формировании конечно-элементной модели шаг сетки, который определяет число конечных элементов и, как результат, время и точность расчета, задавался пользователем, то в настоящее время это реализуется автоматически, исходя из градации уровней, — грубая сетка, точная сетка. В рамках этого

диапазона промежуточное положение определяется расположением бегунка на шкале (рис. 2). По понятным причинам, ручная технология предыдущих версий сохранена в полном объеме.

Принципиально важным моментом является и то, что дополнительно появилась возможность упрощения работы, а именно: при изменении граничных условий не потребуется тратить время на повторное переразбиение модели.

Следует отметить, что имидж компании определяется и зависит от стратегических задач, которые решаются ее сотрудниками. Здесь стоит подчеркнуть, что помимо прикладных задач инженерного анализа мы вынужены решать задачи базовой математики, которые позволяют отказаться от использования зарубежных программных продуктов в полном объеме. В таком случае можно гарантированно обеспечить защиту разрабатываемого ПО от недокументированных возможностей, по крайней мере на программном уровне.

Разработка базовых математических процедур касается создания собственных алгоритмов для эффективного решения алгебраических



линейных уравнений, обобщенных задач на собственные значения, задач устойчивости и т.п. Универсальный метод, созданный специалистами нашей компании, получил название «метод разложения блочных поездов».

Результаты получаемых решений можно использовать при выполнении следующих задач:

- статические расчеты;
- динамические расчеты;
- расчет собственных частот;
- расчет устойчивости;
- нелинейные расчеты;
- течение жидкости;
- мультифизические расчеты.

Перечисленные выше решения реализованы также с использованием технологии CUDA, которая предполагает применение графических процессоров для значительного повышения скорости выполнения вычислительных процедур, соперничая при этом с высокопроизводительными рабочими станциями.

## Основные дополнения мультифизического анализа

Одним из основополагающих разделов в работе нашей компании является разработка средств инженерного анализа в области моделирования нелинейных и мультифизических задач.

Среди названных разделов наибольшее развитие получил раздел прочностного и динамического анализа. На Форуме большое внимание было уделено именно этой тематике. В V17 появились новые возможности для моделирования и расчета больших деформаций высоконелинейных задач. Его можно эффективно использовать для моделирования нелинейных упругих объектов с высокой степенью нелинейности, для упруго пластических задач с большой долей пластичности и для идеально пластичных материалов. Поскольку



Рис. 3. Фрагмент выступления, посвященного нелинейному анализу и большим деформациям, доступным в новой версии АРМ V17

при упруго-пластическом деформировании пластичность носит необратимый характер, то предложенные решения позволяют построить гистерезисную кривую, с использованием которой можно определить упругую и пластическую составляющие, а также параметры изотропного упрочнения (рис. 3).

Задачи анализа больших деформаций решаются как при наличии контактного взаимодействия деформируемых тел, так и без него. При этом контактное взаимодействие может выполняться с учетом трения и проскальзывания. Говоря о больших деформациях, необходимо отметить, что при их решении учитывается как физическая, так и геометрическая нелинейности.

Актуальными, в связи с этим, помимо проблем деформирования, можно считать и задачи обработки металлов давлением (ковкой, штамповкой, прокаткой и т.д.), а также задачи обработки металлов резанием. Все они получили импульс для эффективного решения.

В будущем наша компания планирует представить самостоятельный

продукт под названием «Технологическая механика», в состав которого подобные решения войдут в полном объеме.

Подводя итоги тематике нелинейного анализа в линейке программных продуктов АРМ V17, можно коротко резюмировать, что в этой версии:

- реализован учет больших деформаций в упругой и пластической постановке для геометрически и физически нелинейных задач теории упругости;
- доработан учет упругопластических моделей материалов в геометрически нелинейных задачах механики твердых тел на основе критерия течения Мизеса;
- встроен учет контактного взаимодействия с трением на основе модифицированного закона Кулона;
- решение контактной задачи возможно с учетом геометрической, физической, общей нелинейности;
- улучшена сходимость нелинейных расчетов, связанных с учетом физической нелинейности, что сокращает затраты времени на расчет;
- добавлен новый тип контактного элемента — «склейка».

Обновился и перечень доступных моделей материалов:

- идеальный упругопластический материал;
- билинейный упругопластический материал с изотропным упрочнением;
- мультилинейный упругопластический материал с изотропным упрочнением;
- нелинейный упругопластический материал с изотропным упрочнением.

Другим важным на Форуме был доклад, посвященный динамическому анализу механических систем. К задачам такого класса можно отнести:

- модальный анализ;
- гармонический анализ;
- анализ переходных процессов;
- анализ быстротекущих высоконелинейных процессов.

В связи с этим уместно указать на смысловое содержание приведенных понятий. Итак, **модальный анализ** проводится с целью определения собственных (резонансных) частот и форм колебаний деталей и конструкций. Частота собственных колебаний соответствует ожидаемой резонансной частоте, а форма колебаний показывает, какие относительные деформации будет испытывать конструкция на той или иной резонансной частоте. Модальный анализ был доступен в предыдущих версиях, а вот гармонический появился только в АРМ V17.

**Гармонический анализ** используется для нахождения установившейся реакции (отклика) конструкций, нагруженных синусоидальными воздействиями. По результатам такого отклика в рассматриваемом диапазоне частот можно построить амплитудно-частотную характеристику колебательного процесса. На резонансных режимах отклик системы будет экстремальным. При этом понятно, что выполнению гармонического анализа предшествует модальный анализ.

**Анализ переходных процессов** описы-



Рис. 4. Фрагмент выступления, посвященного новинкам расчета топологической оптимизации

вает отклик системы на динамическое воздействие, пролонгированное во времени. Этот тип анализа используется для определения временной зависимости перемещений, деформаций, напряжений и сил в системе как реакцию на некоторую комбинацию статических, переходных и гармонических сил до состояния стационарной устойчивости. Если динамические эффекты в режиме перехода невелики, то расчеты на этом временном интервале не производятся. Уместно отметить, что ведутся также работы и в области выполнения спектрального анализа, но они еще не завершены в полном объеме.

Значительным шагом в развитии продуктов компании НТЦ «АРМ» можно считать появление новых возможностей динамического анализа. Речь идет об описании динамики быстротекущих высоконелинейных процессов. Возможности моделирования таких вариантов динамики системы появились в АРМ V17.

Описание быстротекущих событий, с математической точки зрения, основано на решении дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения

масс, импульсов и энергии с использованием интегрирования по времени в явной и неявной форме. Этот анализ применяется для моделирования процессов, протекающих в малых временных интервалах, таких как высокоскоростные и низкоскоростные удары, взрывные события, контактное взаимодействие с разрушением и без такового.

Дополнительные возможности появились в усталостном расчете. При анализе стохастических процессов можно использовать метод «полных циклов» наряду с анализом методом «дождя». Такие возможности позволяют проводить углубленный анализ влияния различных параметров приведения на точность получаемых решений.

Значительные изменения коснулись и процедуры топологической оптимизации (рис. 4). Появилась возможность учета ограничений, связанных с симметрией при реализации алгоритма оптимизации Optimality Criterion, который представляется нам наиболее быстрым. Реализован новый расчетный алгоритм для формирования оптимизационных задач с использованием откликов модели по резуль-



татам статического расчета. При этом в качестве ограничений доступны следующие виды откликов, наложенных на целевую функцию:

- объем;
- масса;
- жесткость;
- перемещение узла по заданной степени свободы;
- проекция перемещения узла на заданное направление;
- взаимное смещение двух узлов;
- механическое напряжение в элементе (SVM);
- максимальное механическое напряжение в группе элементов (SVM);
- реакция в узле.

Добавлен новый расчетный метод с целью ограничения максимальной толщины, который предусматривает наложение ограничений симметрии в трех плоскостях, а также метод наложения технологических ограничений при организации процедуры штамповки и экструзии. Реализованы новые технологические ограничения при организации 3D-печати. Важно отметить, что в APM V17 добавлена также процедура выполнения пост-обработки результатов оптимизации для конструкций из пластинчатых конечных элементов.

Кроме топологической оптимизации в V17 появился новый расчет, который позволяет выполнить параметрическую оптимизацию. Под параметрической оптимизацией понимают вариант конструктивного решения, при котором целевая функция принимает экстремальное значение. Такие параметры позволяют из возможной выборки принимаемых решений выбирать наиболее удачные с точки зрения весовых, кинематических, энергетических и других параметров. Параметрическая оптимизация существенно улучшила возможности компании при создании современного оборудования, которое при использовании оптимизационных решений оказывается наиболее эффективным.



Рис. 5. Фрагмент выступления, посвященного новым возможностям продукта APM FGA и расчету FSI (совместный расчет FlowVision+APM)

Дополнены возможности моделирования трещиностойкости:

- добавлена возможность выполнения расчета на трещиностойкость в нелинейной постановке (физическая, геометрическая и общая нелинейность);
  - расчет на трещиностойкость теперь доступен и для комбинации нагружений;
  - реализована и заполнена база данных свойств материалов для ЛУМР;
  - для расчета трещиностойкости конструкций реализован метод XFEM.
- Существенные изменения и дополнения появились и в продуктах

моделирования механики жидкости и газа (APM FGA). Перечислим главные нововведения в этой части программного обеспечения в APM V17:

- выполнена поддержка «расширенных» моделей. Конечно-элементные модели, созданные, в том числе, для проведения любого FGA-анализа, могут содержать все типы элементов (пластины, стержни и т.п.). Наличие таких элементов никак не влияет на проведение FGA-анализа, все элементы, кроме солидов 1-го порядка с заданными свойствами течений, являются «фиктивными»;



Рис. 6. Фрагмент выступления, посвященного новинкам строительного продукта APM Civil Engineering



- появился односторонний FSI: конвертер результатов анализа течений Навье — Стокса (полей давлений и/или температур) в структурные нагрузки для дальнейших расчетов напряженно-деформированных состояний твердых тел;
- появилась модель пористой среды в уравнениях Навье — Стокса;
- реализована модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$ ;
- дополнительно доступны результаты, которые могут быть получены после проведения основного анализа течений Навье — Стокса (расход через выделенную поверхность, нагрузки на выделенной поверхности и пр.);
- результаты FGA-анализа доступны в векторной форме (в виде векторных полей и линий тока). Расширенная настройка опций карт;
- выполнена поддержка стабилизированного метода бисопряженных градиентов в качестве решателя СЛАУ на основе технологий CUDA.

В завершение обзора, посвященного механике жидкости и газа, следует отметить, что окончены работы по объединению программных продуктов компании НТЦ «АРМ» и компании ТЕСИС. В результате такого объединения появился продукт, который позволяет выполнять моделирование жидких и газообразных тел с помощью программного продукта FlowVision, а для расчетов на прочность мож-

но использовать инструменты компании НТЦ «АРМ» (расчет FSI) — рис. 5. Это объединение значительно усиливает позиции наших компаний, расширяя потенциальные возможности каждой из них.

## Расчеты строительных объектов

НТЦ «АРМ» продолжает разработку и совершенствует программные продукты в области строительных расчетов и проектирования (рис. 6). Поскольку новинки строительного раздела существенны и предполагают отдельное рассмотрение, то здесь мы ограничимся только перечнем новых возможностей, которые появились в APM Civil Engineering V17:

- выполнена оптимизация по времени расчета РСН и РСУ для больших примеров;
- после расчета РСУ появилась возможность одновременной работы с результатами как по первой, так и по второй группам предельных состояний;
- результаты расчета РСУ можно получить в виде цветowych карт распределения напряжений, перемещений и усилий;
- встроены карты армирования ЖБ-элементов как отдельный тип карт результатов;
- появилась возможность учета треугольного МТС конечного элемента;
- внесены изменения в алгоритм расчета же-

лезобетонных плит на продавливание, позволяющие в автоматическом режиме проверять все варианты положения колонн относительно плиты и подбирать интенсивность поперечной арматуры для наилучшего из них;

- реализован механизм работы с группами элементов для железобетонных и армокаменных конструктивных элементов;

• существенно расширены функциональные возможности расчета столбчатых фундаментов:

- добавлена возможность проведения проверочного расчета фундамента,
- реализован расчет основания по несущей способности в соответствии с п.п. 5.7 СП 22.13330.2016,
- реализован расчет основания сложных

Civil Engineering

Реклама

Оптимальные решения в строительстве и машиностроении

**АРМ**  
Научно-технический центр  
Тел.: (495) 120-58-10  
E-mail: com@apm.ru  
www.apm.ru

Machine



- пучинистыми грунтами (морозное пучение) в соответствии с п.п. 6.8 СП 22.13330.2016,
- реализован расчет оснований опор воздушных линий электропередач в соответствии с п. 7 СП 22.13330.2016,
- результаты нелинейного расчета (расчет «односторонних опор и канатов») могут быть использованы в качестве нагрузок на фундамент;

- создан новый алгоритм нелинейного расчета канатов и односторонних опор, позволяющий указать, при действии каких усилий задается натяжение канатов, и выполнить расчет для нескольких комбинаций, включающий в свой состав, в том числе, и динамические нагрузки (пульсацию ветра и сейсмику);
- в диалоге «Предварительная деформация» для канатов активизированы все опции задания натяжения каната;

- на стержневые КЭ типа «Канат» реализовано приложение сосредоточенных и распределенных нагрузок;
- реализован новый тип конструктивных элементов — «алюминиевые». Проверка несущей способности выполняется по СП 128.13330.2016 — актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85\* «Алюминиевые конструкции».

## Заклучение

Представленные на Форуме доклады от разработчиков были дополнены информацией, которой делились участники — наши уважаемые пользователи! Такая форма общения наиболее оптимальна и позволяет соединить теорию и практику использования продуктов компании.

Доклады участников форума были интересны, наукоёмки и во многом поучительны. Далее представлена тематика докладов пользователей:

- «Расчет и проектирование объектов сотовой связи» (рис. 7). А.Татаринов, Удаленный инженерный центр Stress-Telecom.com;
- «Опыт использования программных продуктов НТЦ «АГМ» в Федеральном научно-производственном центре «ТИТАН-БАРРИКАДЫ»» (рис. 8). Е.К. Тимофеев, инженер-конструктор, ФНПЦ «ТИТАН-БАРРИКАДЫ»;
- «Методика расчета многослойных конструкций датчиков и актюаторов в ARM Structure3D с учетом температуры и пьезоэффекта» (рис. 9). Матвеев Е.В., А.Н.Виноградов, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий»;
- «Практический опыт и проблемы проектирования в среде ARM Structure3D» (рис. 10). С.С. Румянцев, технический директор, ООО «Алкон Трейд Систем»;
- «Студенческая олимпиада «Инженерный анализ-2019»» (рис. 11).



Рис. 7. Фрагмент выступления, посвященного применению продуктов АРМ для расчета объектов сотовой связи



Рис. 8. Фрагмент выступления, посвященного применению продуктов АРМ для расчетов гражданской продукции на ФНПЦ «ТИТАН-БАРРИКАДЫ»



Рис. 9. Фрагмент выступления, посвященного применению продуктов АРМ для расчета многослойных конструкций датчиков и актуаторов в APM Structure3D с учетом температуры и пьезоэффекта



Рис. 10. Фрагмент выступления, посвященного применению продуктов АРМ для расчета элементов фасадных систем



Рис. 11. Фрагмент выступления, посвященного всероссийским студенческим олимпиадам, ежегодно проводимым на базе ОмГТУ

С.П. Шамец, Омский государственный технический университет;

- «Моделирование воздушной подушки воздухоподводяной штанги». И.Ш. Герценштейн, С.А. Кудрявцев, Московский политехнический университет.

В завершение деловой части Форума сотрудники расчетного отдела НТЦ «АРМ» продемонстрировали наиболее интересные расчетные работы, выполненные в текущем году: анализ прочности и устойчивости козлового крана и элементов его грузовой тележки, оценка работы металлоконструкции буровой вышки на этапе подъема и в штатном рабочем положении, а также ряд других моделей, которые представляют для слушателей практический интерес.

Очевидно, что в кратком изложении расчетных возможностей программных продуктов САЕ-анализа компании невозможно подробно представить всё то новое, что появилось в нашей программной среде. Тем не менее обязательно следует отметить, что при подготовке новой версии была проделана большая работа в плане оптимизации вычислительных алгоритмов, что, в свою очередь, существенно ускорило выполнение вычислительных процедур и процедур работы с графическими объектами.

Если представить общую картину разработок НТЦ «АРМ» в области САЕ-анализа с учетом возможностей предыдущих версий, то говорить об отставании наших продуктов по сравнению с зарубежными аналогами можно только в прошедшем времени. Имеется, правда, ряд мультифизических задач, которые требуют доработки, запланированной на ближайшее время.

Анализируя ситуацию в целом, можно утверждать, что компания НТЦ «АРМ» успешно развивается, с оптимизмом смотрит в будущее и строит грандиозные планы по импортозамещению зарубежного программного обеспечения в России и не только. ➤