



Динамика разработки программного обеспечения CAE-анализа механических конструкций и систем компании НТЦ «АПМ»

Владимир Шелофаст, Сергей Розинский

Ежегодный майский Форум пользователей программных продуктов компании НТЦ «АПМ» в 2020 году трансформировался в ОНЛАЙН-ФОРУМ «Российские CAE-системы на службе промышленности» и прошел интерактивно в режиме видеоконференции, на которой были продемонстрированы новые решения компании, включенные в актуальную, 17-ю версию, а также текущие разработки, выход которых запланирован на декабрь 2020-го. В докладах обсуждались сложные вопросы в области динамического анализа, ударного взаимодействия объектов, структурного анализа, топологической и параметрической оптимизации и многие другие. Были представлены также новые разработки в области графики, связанные с тем, что компания НТЦ «АПМ» заменила ядро собственного графического редактора на C3D (разработка компании C3D Labs, дочерней компании АСКОН).

Компания НТЦ «АПМ» 20-21 мая 2020 года провела ОНЛАЙН-ФОРУМ «Российские CAE-системы на службе промышленности», на котором были продемонстрированы ее текущие разработки программного обеспечения. Это традиционное время, когда мы подводим итоги работы за истекший год. Ранее такие мероприятия проводились в рамках Ежегодного майского Форума пользователей. К сожалению, в этом году из-за коронавируса заявленное ранее офлайн-мероприятие пришлось

проводить удаленно. Это не помешало организовать встречу интересно, познавательно и с большой пользой для всех участников. Поскольку удаленная форма работы меняет традиционные и устоявшиеся методы публичного проведения мероприятий, то нам пришлось подстраиваться под новые условия. В первый день работы онлайн-форума не обошлось без технических накладок, что еще раз доказало справедливость пословицы о том, что в России первый блин всегда «комом»! Что каса-



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



Сергей Розинский, заместитель генерального директора по развитию НТЦ «АПМ»

ется второго дня, который вынужденно вообрал в себя большую часть докладов, то он, по признанию и организаторов, и участников, прошел очень успешно!

Следует отметить, что главным мотивом к публикации этого материала является не описание технических и организационных проблем, а информирование пользователей о новых возможностях программного обеспечения компании НТЦ «АПМ» в современной, 17-й версии и тех решениях, которые запланированы к выходу в конце текущего года.

Главной отличительной особенностью 17-й версии АРМ является то, что кардинальные изменения произошли в структуре графического представления геометрических моделей,

которые в дальнейшем используются для выполнения инженерного анализа. Было решено заменить существующее геометрическое ядро нашего графического редактора АРМ Studio на C3D (разработка компании C3D Labs, дочерней компании АСКОН). Такая замена имеет стратегическое значение, поскольку компания НТЦ «АПМ» и АСКОН, а также компании ТЕСИС, АДЕМ и ЭРЕМЕКС объединились в консорциум с целью создания интегрированного ПО для обеспечения всей цепочки жизненного цикла изделий. Эта стратегическая задача может быть решена только при использовании единой графической среды, разработку которой выполняет компания АСКОН.



Очевидно, что переход на другое ядро — это полная переработка основ графического представления геометрических объектов, что, в конечном счете, привело к полной модификации собственной графической среды. В этом направлении была проделана огромная работа, результаты которой трудно переоценить. Следует отметить, что ядро C3D постоянно совершенствуется, а его современное состояние по большинству критериев удовлетворяет требованиям для конструкторской проработки изделий. Использование ядра C3D улучшило качество подготовки графической информации и повысило надежность работы препроцессора — модуля APM Studio (рис. 1). Справедливости ради заметим, что внешнее представление вызываемых команд изменилось незначительно.

Поскольку данная часть статьи посвящена описанию графических возможностей наших программных систем, то следует упомянуть о разработке инструментов, созданных компанией НТЦ «АПМ» для импорта графических моделей из BIM-системы Renga (Renga Software, совместное предприятие компании АСКОН и фирмы «1С») в графическую среду APM Civil Engineering. Импорт 3D-моделей объектов промышленного и гражданского строительства из Renga в APM Civil Engineering позволяет упростить процедуру подготовки информации к расчету, что важно в условиях дефицита времени на разработку проектов. В рамках данной статьи мы не будем подробно останавливаться на новинках строительной отрасли, так как основными участниками форума были специалисты в области механики. Что касается строительной тематики, то для этого направления будет подготовлен отдельный материал.

В новой версии появилось больше возможностей в области анализа динамических характеристик механиче-

ских систем. Начинается всё с расчета собственных частот и форм собственных колебаний (рис. 2). Любая механическая система имеет набор частот резонансных колебаний, который в общем случае является бесконечно большим, поэтому их количество, необходимое для текущего анализа, пользователь указывает в настройках расчета.

Для получения общей картины динамического отклика механической системы в случае ее нагружения произвольной вынуждающей нагрузкой мы можем воспользоваться расчетом вынужденных колебаний. Применяемым методам и анализу результатов в этом расчете был посвящен отдельный доклад (рис. 3).

Анализ собственных частот и расчет вынужденных колебаний появились в наших программных продуктах достаточно давно, и на их основе развиваются другие виды динамического анализа. В частности, новинкой 17-й версии следует считать гармонический анализ — вид анализа установившихся вынужденных колебаний, при котором на вход колебательной системы подается гармоническое (синусоидальное) воздействие. Необходимо отметить, что такое воздействие реализуется при проведении вибрационных испытаний. Набор частот резонансных пиков при учете вклада от демпфирования может значительно отличаться от полученных при расчете собственных частот колебаний.

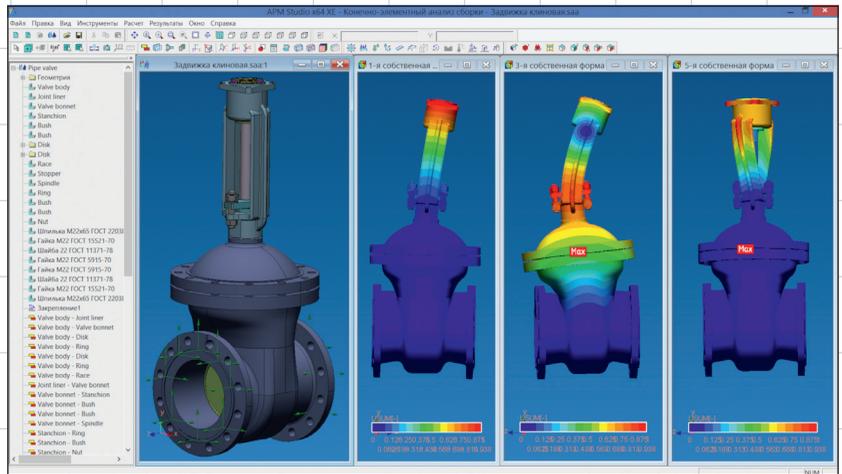


Рис. 1. Пример применения обновленного модуля APM Studio для расчета клиновидной задвижки

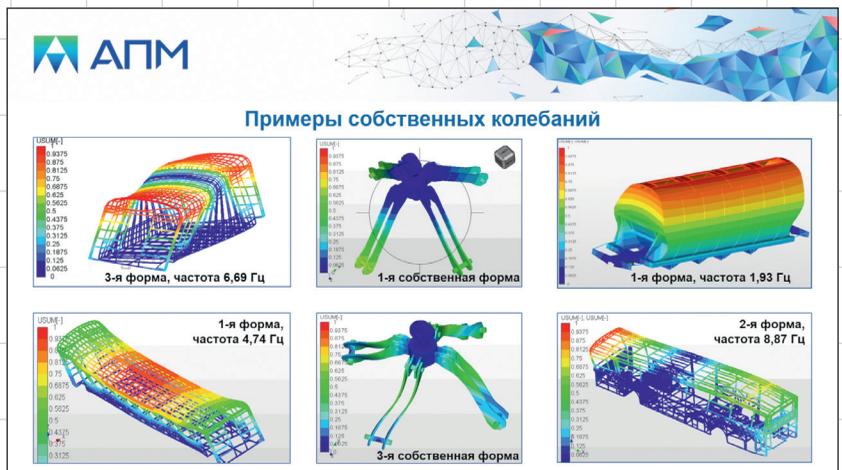


Рис. 2. Пример вывода форм собственных колебаний для различных конструкций



В результате анализа можно получить карту отклика для любой точки конструкции при силовом и кинематическом внешнем нагружении (рис. 4).

В реальных эксплуатационных условиях в общем случае динамические объекты воспринимают стохастические (случайные) нагрузки — расчет такого варианта также можно выполнить в программных продуктах компании. Для указанного случая используется такая характеристика возмущающего воздействия, как спектральная плотность мощности. Спектральная плотность мощности зависит от вида случайного нагружения, которая задается в виде графика силового либо кинематического

возмущения в зависимости от частоты. Такая форма анализа позволяет оценивать случайное воздействие в статистическом (вероятностном) виде, основным параметром которого является среднее квадратичное отклонение итогового случайного распределения.

Особо отметим, что инструменты динамического анализа в 17-й версии были дополнены процедурой моделирования ударного взаимодействия твердотельных объектов. Расчеты, связанные с ударными процессами, представляются нам наиболее сложными с точки зрения программной реализации. При моделировании ударных явлений используются раз-

ные динамические модели, различные варианты нагружения и контактного взаимодействия. В 17-й версии моделирование ударных явлений реализовано с применением методов «невяной динамики», которые хорошо описывают резкие изменения состояния, куда, по понятным причинам, можно отнести и удар. Методы «невяной динамики» дают хорошие результаты при наличии больших деформаций и высоких скоростей деформаций. Необходимо отметить, что сейчас расчет ударного взаимодействия реализован только для случая использования линейно-упругой модели материала (рис. 5). Снять эти ограничения можно будет при выполнении решений в нелинейной постановке. С этой целью учет геометрической и физической нелинейности будет реализован в общем виде методами невяной и явяной динамики в будущей, 18-й версии нелинейного анализа.

Имеющиеся в современной версии решения для задач нелинейного анализа были дополнены модулем Структурного анализа (Structure Analysis). Этот термин заимствован из зарубежных источников. Применительно к механическим конструкциям это позволяет моделировать поведение их конструктивных элементов при больших деформациях, когда конфигурация конечного элемента претерпевает значительные изменения (рис. 6).

Для справки. Не следует путать аналогичный термин Структурный анализ применительно к задачам расчета рычажных механизмов, когда под ним понимается совокупность рычажных элементов и топология их связей. Также термин Структурный анализ применительно к металлам, например, обозначает анализ их микроструктуры, оценку наличия дефектов и т.д., а применительно к композиционным материалам под этим термином понимают состав композита. Надеемся, эти пояснения

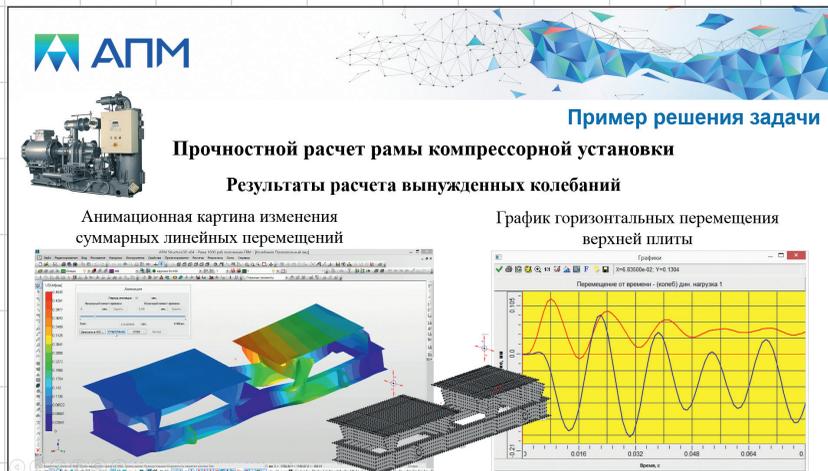


Рис. 3. Пример визуализации результатов расчета вынужденных колебаний для рамы компрессорной установки



Рис. 4. Представление результатов в новом виде расчета — гармонический анализ



позволят не запутаться в близких терминологических понятиях.

В будущей, 18-й версии планируется реализовать возможность анализа аномально больших линейных и угловых деформаций, которые выполняются инструментами *Структурного анализа*.

Из-за наличия больших геометрических изменений формы *Структурный анализ* оперирует логарифмическими относительными деформациями, в отличие от обычных относительных инженерных случаев деформирования. Нелинейные задачи в инженерной постановке рассчитаны на решение деформационных задач для относительно малого уровня деформирования, а методами *Структурного анализа* можно решать задачи деформирования без ограничений.

Если приводить примеры больших геометрических деформаций, то это можно продемонстрировать на примере обработки металлов давлением. В этом случае имеют место также и большие пластические деформации, которые характеризуют физическую нелинейность. Наличие пластических деформаций обычно ведет к упрочнению, которое, как известно, бывает как изотропным, так и кинематическим. В 17-й версии реализован только вариант изотропного упрочнения.

Применение *Структурного анализа* позволяет решать контактные задачи при больших смещениях в контакте — как с учетом трения, так и без него. В качестве модели трения здесь используется модель Кулона.

Особенностью нелинейных задач является то, что, в отличие от линейных, результат расчета, например, напряженно-деформированного состояния конструкции, будет зависеть от последовательности нагружения той или иной нагрузкой. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание для того, чтобы получить корректный результат. Следует отметить, что в режиме *Структурного ана-*

лиза предусмотрен расчет с учетом истории нагружения, что позволяет эффективно, а главное, правильно учитывать различные сочетания внешних силовых факторов. В конечном счете можно утверждать, что *Структурный анализ* представляет собой мощный инструмент нелинейного анализа.

Стоит упомянуть, что нелинейные решения были реализованы и для гиперупругих элементов. Гиперупругими называются материалы, для которых зависимость напряжений от деформаций определяется как функция энергии деформации. Это материалы, которые способны многократно увеличить линейные разме-

ры под нагрузкой и восстановить их при снятии нагружения. В качестве примеров гиперупругих элементов можно рассматривать резину, каучуки, различные полимеры и иные эластоподобные материалы. Работы по созданию инструментов для расчета таких материалов не были закончены к 17-й версии и ожидаются в будущей — V18.

Большой интерес в процессе представления на форуме вызвали сообщения, в которых поднимались вопросы топологической оптимизации. На эту тему было сделано два доклада, и каждый из них был по-своему интересен (рис. 7 и 8). Отметим, что использование методов топологичес-

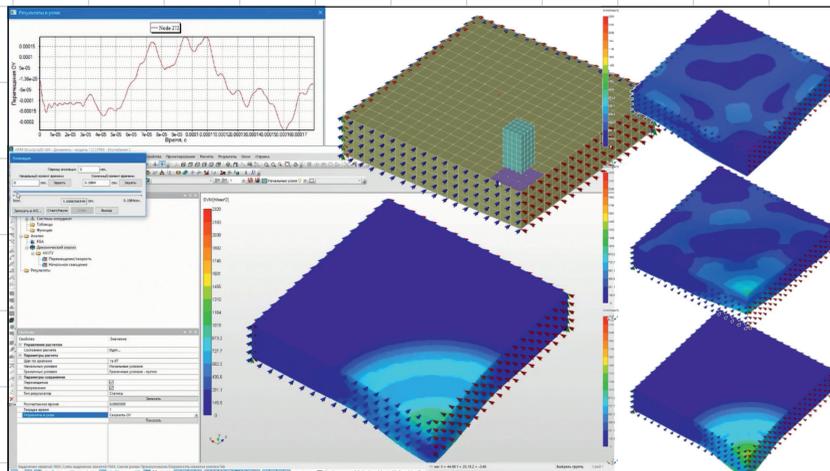


Рис. 5. Расчет ударного воздействия двух тел. Визуализация карты напряжений в разные моменты времени

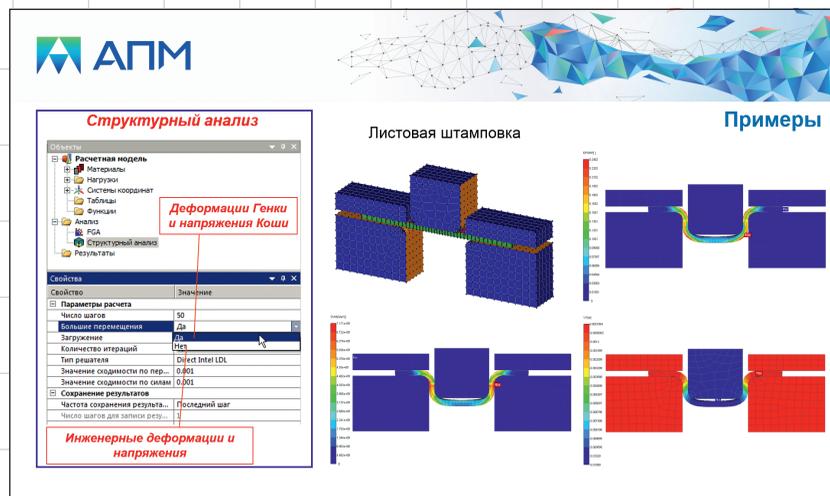


Рис. 6. Пример учета больших деформаций для процесса штамповки



Рис. 7. Основные направления применения расчета топологической оптимизации

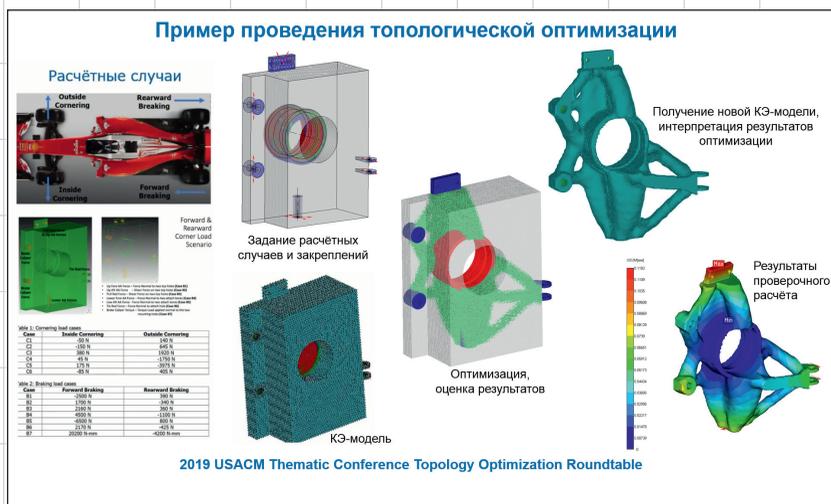


Рис. 8. Пример топологической оптимизации детали «поворотный кулак» для гоночного болида

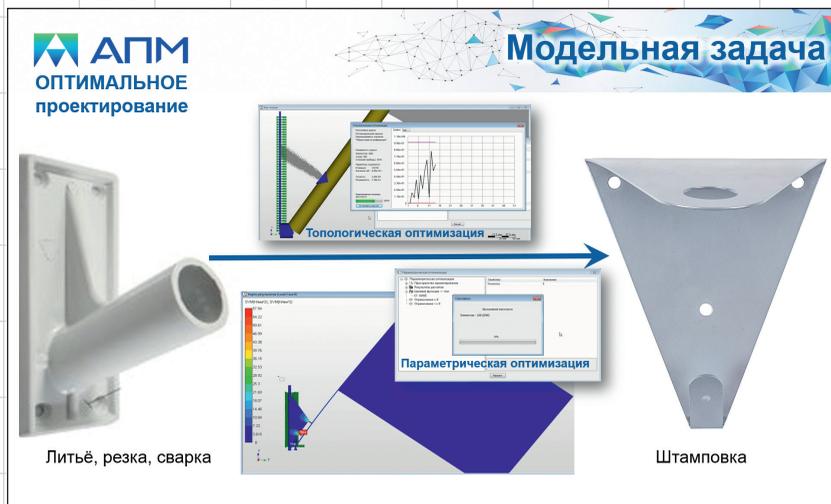


Рис. 9. Пример применения методики оптимального проектирования с использованием продуктов НТЦ «АПМ»

кой оптимизации позволяет снизить вес конструкции за счет изменения ее формы. Впервые инструменты топологической оптимизации в программных продуктах компании НТЦ «АПМ» появились еще V16. В текущей, 17-й версии эта тематика получила существенное развитие. На 2020 год также намечены пути дальнейшего совершенствования предлагаемых инструментов за счет добавления новых решений. В этом году ожидается появление расчетов устойчивости оптимизируемых конструкций, а также определение собственных частот и форм собственных колебаний рассматриваемых объектов.

Если кратко характеризовать инструменты топологической оптимизации, то они представляют среду препроцессорного задания исходных параметров, куда можно отнести области проектирования, выбор точек приложения внешних силовых факторов, узлов закрепления, выбор материалов и назначение критериев топологической оптимизации. Из анализа начальных параметров, критериев оптимизации и последующего конечно-элементного расчета напряженно-деформированного состояния объекта вычитанием ненагруженных конечных элементов из области проектирования получаем конструктивные решения, близкие к равнопрочным. Если в качестве критерия оптимизации, например, использовать минимизацию массы, то можно получить конструктивные решения минимального веса.

В отдельных случаях удобно использовать многокритериальную оптимизацию, например исходя из критериев прочности и жесткости, что также оказывается возможным в текущей версии продукта. Заключительным моментом топологической оптимизации является выполнение процедуры сглаживания и формирование файла формата STL с целью его использования для изготовления



конструкции, например, с помощью аддитивных технологий.

Если говорить о будущем, то топологическая оптимизация — это то направление развития, без которого технический прогресс развиваться не может. С уверенностью можно утверждать, что не понявшие этого проектировщики, конструкторы и расчетчики окажутся неспособными предложить конструктивные решения, которые смогут успешно конкурировать на мировом рынке.

Помимо топологической оптимизации важным фактором получения оптимальных решений является возможность использования смешанных оптимизационных задач — это выполнение как топологической, так и параметрической оптимизации применительно к одному объекту. Как показали выполненные исследования, такой подход позволяет выбрать из возможных конструктивных решений наилучшее, не имеющее мировых и отечественных аналогов. Один из подобных примеров был продемонстрирован на форуме и вызвал огромный интерес у слушателей (рис. 9). Таким образом, можно заключить, что оптимизация в любом виде является трендом современного проектирования.

Целью компании НТЦ «АПМ» является разработка отечественной компьютерной среды, не зависящей от зарубежного программного обеспечения. В связи с этим помимо специализирован-

ных расчетов компания вынуждена создавать библиотеки базовой вычислительной математики. Такие инструменты присутствуют на коммерческом рынке, но, к сожалению, в основном от зарубежных производителей.

Говоря о математических методах, реализованных в программных продуктах компании, нельзя не отметить фундаментальные численные решения, которые появились в текущих версиях. Все без исключения конечно-элементные решения основаны на приведении задач в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных к системе линейных алгебраических уравнений. В ранних версиях ПО компании НТЦ «АПМ» эти системы линейных уравнений решались с применением математической библиотеки Intel. В текущей версии программных продуктов мы построили свой альтернативный метод, что в будущем, возможно, позволит отказаться от использования услуг компании Intel в пользу этой собственной разработки.

Метод, предложенный компанией НТЦ «АПМ» для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), носит название *Метод блочных разложений (МБР)*. Он может применяться как на центральных, так и на графических процессорах. МБР имеет ряд преимуществ как по быстродействию, так и по рациональному использо-

ванию памяти. В зависимости от решаемой задачи и от параметров применяемых процессоров *Метод блочных разложений* позволяет выделять память, объем которой можно контролировать при организации вычислений. Такой подход к решению задач большой размерности позволяет использовать только допустимый объем оперативной памяти в блоке, а число блоков в матрице

определяется размерностью решаемой задачи.

Важно отметить, что в решениях, предложенных математической библиотекой Intel, как правило, применяются итерационные методы, которые при заявленной точности не всегда гарантируют корректность полученных результатов. Поскольку метод разложений является прямым методом, то таких коллизий при его использовании не наблюдается.

Реклама

Optimal solutions in construction and machine engineering

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

Civil Engineering

machine

X-axis	Y-axis
0	0
4	~1000
8	~2000
12	~4000
16	~8000
20	~15000



Рис. 10. Картина основных отраслей промышленности, для которых выполнялись заказные расчетные проекты

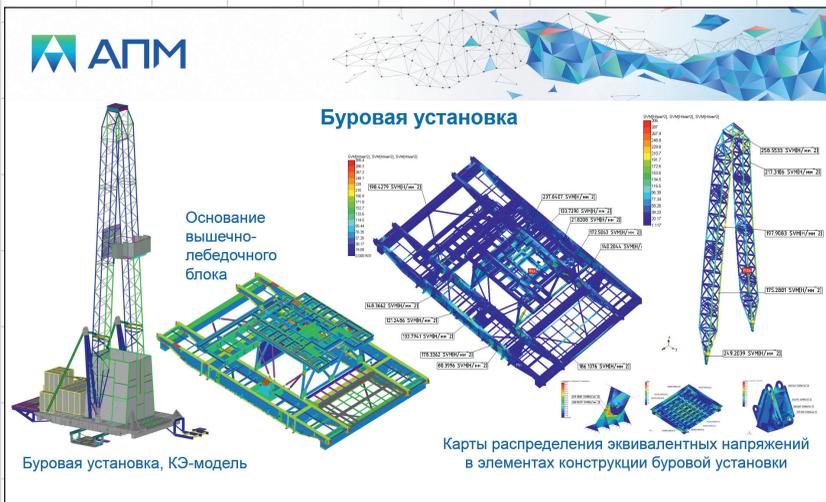


Рис. 11. Пример расчета несущих элементов буровой установки

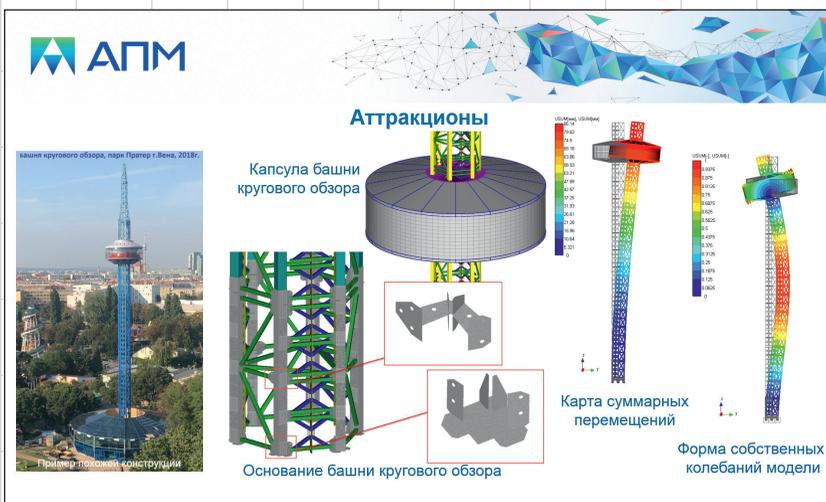


Рис. 12. Пример расчета несущих элементов аттракционов

Программное обеспечение компании НТЦ «АПМ» может применяться и на компьютерах с современными производительными видеокартами с поддержкой технологии CUDA. Программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений CUDA (*Compute Unified Device Architecture*) реализована на графических ускорителях компании NVIDIA и позволяет существенно ускорить процессы вычислений. Можно заметить, что уровень быстродействия компьютеров с вычислениями на видеокартах по параметрам скорости вычислений приближается к возможностям небольших суперкомпьютеров.

Помимо новинок содержательной части программного обеспечения АРМ на форуме было представлено три доклада расчетного отдела компании о результатах тестирования ПО и о расчетных работах, выполненных с применением наших программных продуктов (рис. 10-13). Ежегодно наш расчетный отдел выполняет 35-40 расчетных работ с использованием собственных программных продуктов и решений. Такие расчетные работы, выполненные по заказу промышленных предприятий, являются своего рода барометром оценки качественных характеристик ПО. С их помощью выполняется полноценное тестирование и валидация получаемых решений. При выполнении реальных проектов можно в полном объеме определить надежность ПО и удобство его использования. На последнем утверждении хочется остановиться особо, так как эффективно применяются только те продукты, в которых время подготовки модели и задания исходных параметров сведено к минимуму.

При выполнении расчетных работ можно эффективно оценить удобство организации структуры вычислений, время выполнения расчетных и интерфейсных операций. Компания рассматривает эти работы не только как направление получения финан-

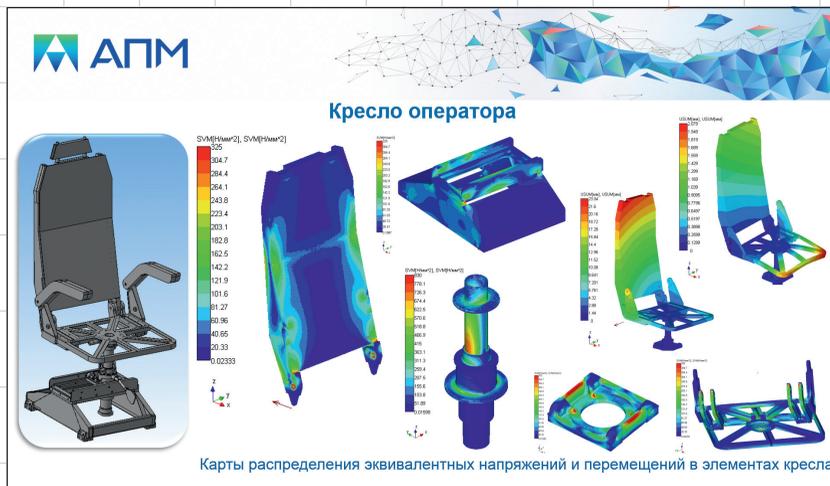


Рис. 13. Пример расчета силовых элементов кресла оператора

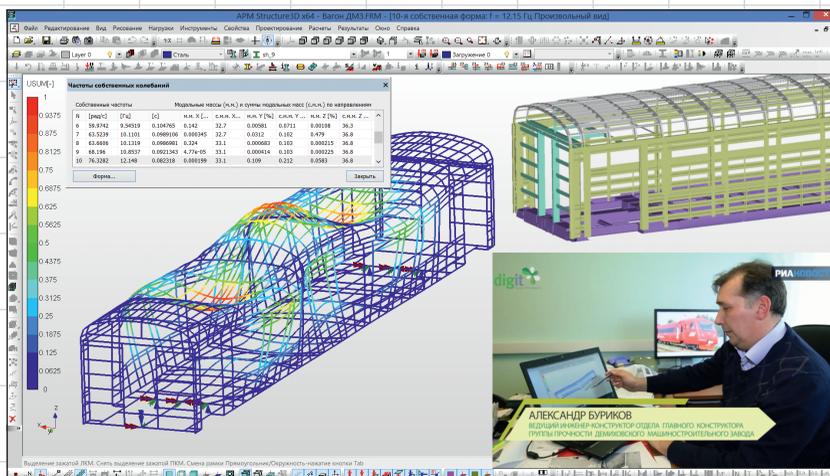


Рис. 14. Фрагмент расчета вагона электропоезда (ОАО «Демидовский машиностроительный завод»)

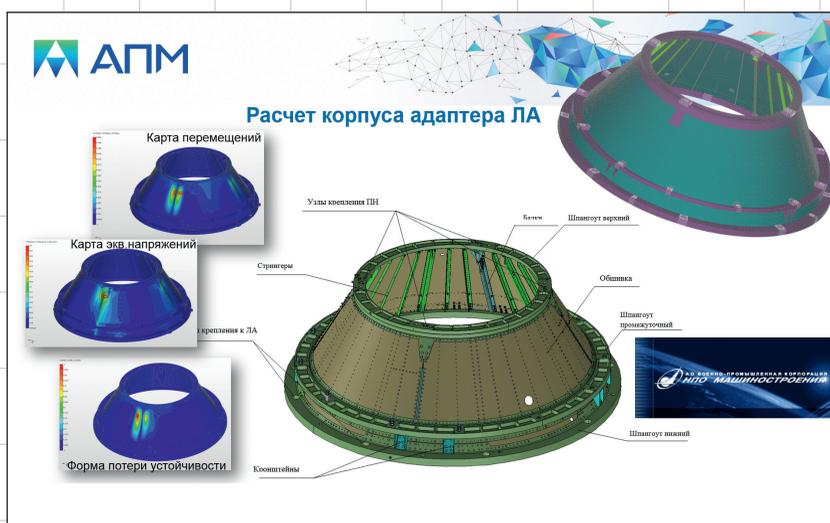


Рис. 15. Фрагмент расчетов корпуса адаптера летательного аппарата (АО «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения»)

совых средств, но и как эффективный инструмент для тестирования и совершенствования разрабатываемых инструментов для расчета.

На форуме было продемонстрировано более десятка выполненных расчетных работ. К сожалению, основную их массу мы не можем демонстрировать открыто, так как связаны соглашениями о конфиденциальности.

Отдельно отметим два сообщения, подготовленные по материалам, которые были предоставлены нашими пользователями. Они имеют особую ценность, так как только такая обратная связь может продемонстрировать эффективность применения нашего ПО (рис. 14 и 15).

В завершение ОНЛАЙН-ФОРУМА «Российские САЕ-системы на службе промышленности» был представлен доклад о ближайших планах компании на будущую, 18-ю версию, выход которой запланирован на конец 2020 года. Говоря о ближайших перспективах, следует отметить, что компания НТЦ «АПМ» предполагает и дальше улучшать функциональные характеристики процедур подготовки расчетных моделей, а самое главное, что к концу года появятся новые расчетные возможности наших программных продуктов.

При написании этой статьи мы намеренно не конкретизируем многих деталей и подробностей, потому что полная информация о проведенном двухдневном онлайн-мероприятии содержится в записи (около восьми часов), выложенной на нашем YouTube-канале (<https://www.youtube.com/user/artcompany/videos>). Посмотрев ее, вы сможете без спешки ознакомиться со всеми новинками и докладами, которые упоминались в этой статье. Надеемся, что это поможет вам лучше узнать нашу компанию и ее продукты, чтобы целенаправленно применять российские решения для своих производственных задач. ▶