

И участие, и победа — важно всё!

Итоги ежегодного конкурса студенческих работ 2023

Антон Сытин, Сергей Розинский

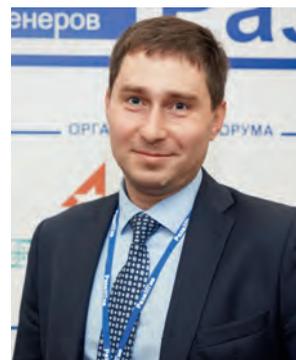
В статье представлены результаты ежегодного конкурса студенческих работ 2023 года, проводимого компанией НТЦ «АПМ». По каждому участнику дан краткий обзор конструкции, основных подходов к моделированию, используемых программных модулей, подходов к выбору типов конечных элементов и способов задания действующих в системе нагрузок. Представлены ключевые результаты моделирования и расчетов. Описываемые результаты работ включают расчеты на прочность в стационарной постановке, расчеты жесткости и устойчивости конструкций, а также расчет течений жидкостей и газов, тепловой анализ, топологическую оптимизацию конструкций.

Компания «НТЦ «АПМ» — российский разработчик программных продуктов мультидисциплинарного анализа — подвела итоги ежегодного конкурса студенческих работ, выполняемых студентами различных вузов России с помощью программного обеспечения АРМ. Участие в инженерных конкурсах, особенно связанных с математическим и компьютерным моделированием на основе программных систем компьютерного инжиниринга (CAE — Computer-Aided Engineering) — важный элемент современного образования для подготовки будущих инженеров. Согласно условиям, в конкурсе участвовали работы, выполненные студентами в программных продуктах АРМ WinMachine, АРМ Civil Engineering, а также в системе прочностного анализа АРМ FEM для КОМПАС-3D. Традиционно к участию в конкурсе допускались курсовые и дипломные, а также инициативные и научные работы студентов вузов.

Хочется отметить факт большого разнообразия тематик присланных работ. Это и классическая оценка прочности, жесткости и устойчивости конструкций,



Антон Сытин,
к.т.н., главный
специалист отдела
обучения НТЦ «АПМ»



Сергей Розинский,
директор по развитию
НТЦ «АПМ»

и новые направления: расчет течений жидкостей и газов, тепловой анализ, топологическая оптимизация конструкций. Все это говорит о том, что постепенно все больше и больше возможностей, заложенных в продукты АРМ, осваиваются и применяются в вузах. В этом году на конкурсе дебютировали несколько вузов, которые стали использовать наше программное обеспечение только в 2022-2023 учебном году. Но это не помешало им прислать много интересных работ, а некоторые из них были удостоены призовых мест! Всего было прислано 12 работ представителями пяти вузов. В состав конкурсной комиссии, оценивающей постановку решаемых задач, сложность расчетных моделей и качество представления результатов, были включены представители преподавательского состава ведущих вузов, а также представители промышленности. Председателем конкурсной комиссии стал директор по развитию НТЦ «АПМ» Сергей Михайлович Розинский. В результате работы комиссии было принято решение о выборе трех основных призеров!

По итогам конкурса первое и третье место заняли студенты передовой инженерной школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ПИШ СПбПУ) «Цифровой инжиниринг» и Высшей школы механики и процессов управления (ВШ МПУ). Студенты СПбПУ впервые участвовали в конкурсе компании «НТЦ «АПМ». Победителем конкурса стала студентка ВШ МПУ Милитта Колесни-

кова с работой на тему «Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния бедренной кости с переломом».

В представленной на конкурс работе рассматривалась бедренная кость с имитацией перелома, две части одной кости стянуты с помощью титановых пластин, а также присутствует эндопротез бедренного сустава. Для создания конечно-элементной модели системы, состоящей из части бедренной кости, компонента эндопротеза и пластин, были выбраны элементы-тетраэдры первого порядка, а характерный размер конечного элемента в расчетной модели составил 2 мм. Для обеспечения конформной сетки была применена опция совместной топологии между соприкасающимися телами. На рис. 1 представлена полученная конечно-элементная модель системы с частью бедренной кости и компонентом эндопротеза.

В работе исследовался сценарий нагружения модели бедренного компонента эндопротеза: случай стояния на одной ноге. Этот сценарий имитирует ситуацию, когда человек переносит весь вес тела на одну ногу, что в повседневной жизни является типичной нагрузкой для бедренного сустава.

Перемещения и напряжения были рассчитаны для каждого элемента конструкции и представлены в виде соответствующих полей. На рис. 2 приведены поля распределения эквивалентных напряжений. Результаты показаны в наиболее ответственных зонах, а именно: эндопротез, соединительные пластины и заделка эндопротеза в кости. Именно там воз-



Рис. 1. Внешний вид конечно-элементной модели

никают наиболее опасные перемещения с точки зрения скорости заживления.

В целом, проведенное исследование напряженно-деформированного состояния биомеханической системы с использованием метода конечных элементов предоставляет ценную информацию о поведении системы под нагрузкой. Расчеты позволили определить распределение напряжений и деформаций внутри системы, выявить наиболее опасные зоны. На основании проведенных исследований могут быть сформированы рекомендации для улучшения конструкции имплантатов и оптими-

зации процедур восстановительной хирургии, что способствует повышению качества лечения и безопасности пациентов.

Магистрант ПИШ СПбПУ Станислав Степанов, представивший на конкурс прочностной расчет рамы болида в модуле APM Structure3D (входит в состав APM WinMachine), занял третье место. Решение задачи предполагало проведение статического анализа конструкции. Рама болида представляет собой сварную трубчатую конструкцию, поэтому в качестве конечных элементов были использованы пластинчатые элементы, имеющие шесть степеней свободы

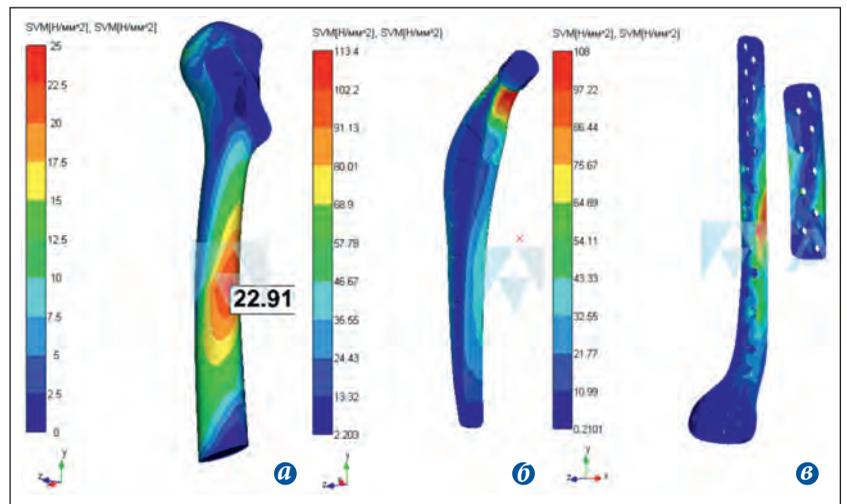


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу): а — в бедренной кости; б — в импланте; в — в пластинах

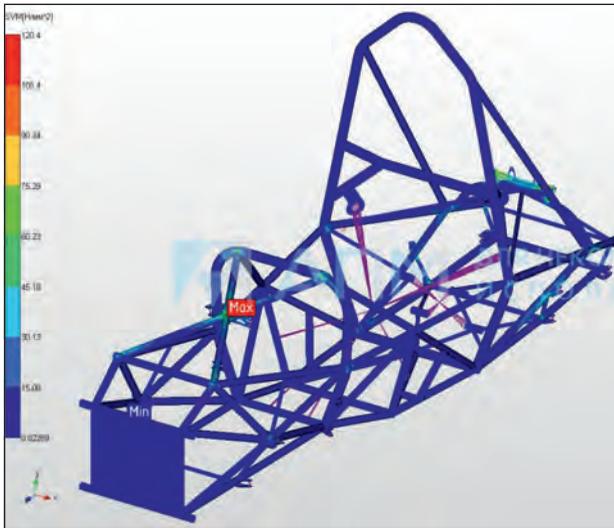


Рис. 3. Карта напряжений для расчетного случая «Удар»

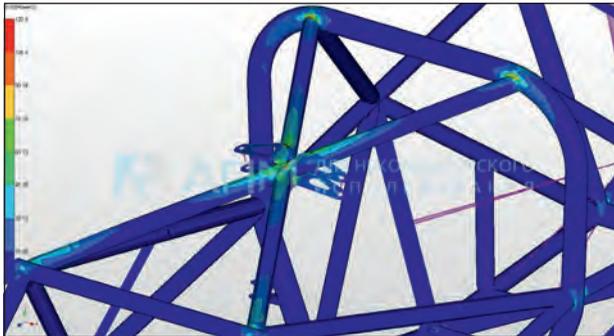


Рис. 4. Картина напряжений вблизи области максимальных напряжений

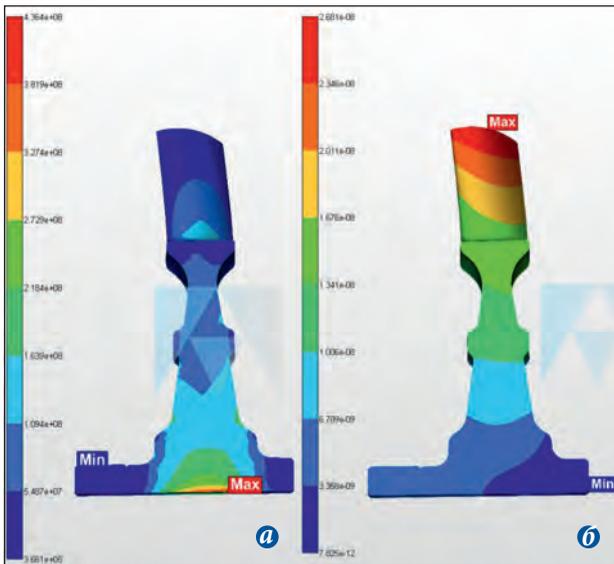


Рис. 5. Результаты расчета детали ГТД: а — распределение эквивалентных напряжений в ступени ГТД; б — распределение суммарных перемещений в ступени ГТД

в каждом узле. Силы, приложенные к кронштейнам вдоль осей элементов подвески, были разложены по осям глобальной системы координат. Точкой приложения силы был выбран независимый узел жесткого элемента. В результате проведенных расчетов были получены карты перемещений и напряжений для нескольких расчетных случаев. Пример вывода результатов для случая «Удар» (рис. 3 и 4).

В результате проведенных расчетов были получены карты распределения напряжений и перемещений для трех различных расчетных случаев: «Ускорение», «Поворот», «Удар». Полученные результаты показали, что рама болида обладает необходимой прочностью и жесткостью.

Принимавшая участие в конкурсе студентка СПбПУ Дарья Асташова представила работу по расчету ступени газотурбинного двигателя (ГТД) в APM FEM — системе прочностного анализа, предназначенной для работы в интерфейсе российской САД-системы КОМПАС-3D. Конечно-элементная сетка была выполнена с использованием элементов типа тетраэдр с тремя степенями свободы в узле. В работе представлены результаты статического расчета ступени ГТД с учетом всех действующих в процессе работы нагрузок и закреплений. На рис. 5а и 5б приведены распределение эквивалентных напряжений по Мизесу и поле распределений суммарных перемещений.

Магистрант ПИШ СПбПУ Артур Асылгужин представил на конкурс задачу обтекания фигуры ангела на шпиле Петропавловского собора — одной из самых известных достопримечательностей Санкт-Петербурга. Флюгер расположен на высоте 120 м. Было проведено исследование распределения давления, возникающего на поверхности фигуры ангела, в зависимости от скорости потока внешней воздушной среды. На рис. 6 представлена КЭ модель флюгера.

Задача решалась с помощью модуля APM FGA в изотермической стационарной постановке для несжимаемого потока, с диапазоном скоростей 10–100 м/с. Относительные условия подобраны для воздуха на высоте 120 м. На рис. 7 представлены результаты расчетов: карта распределенного давления при максимальной скорости потока воздуха.

Алексей Мамин, магистрант ПИШ СПбПУ, представил на конкурс работу по анализу жесткости

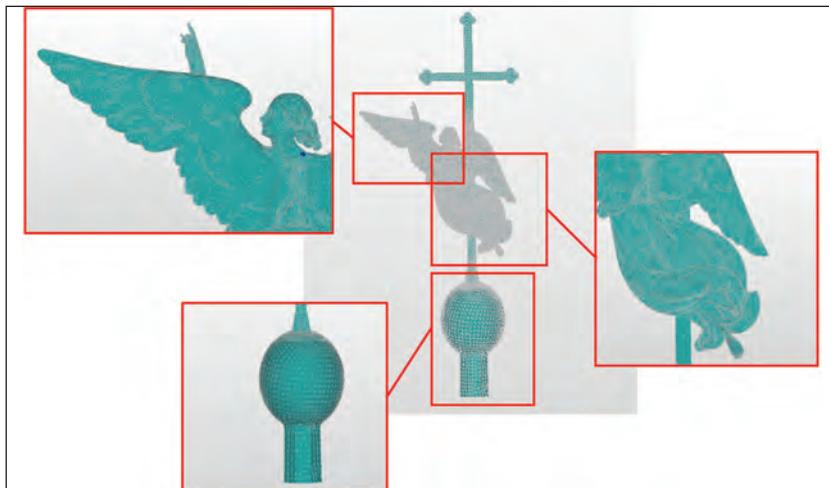


Рис. 6. Конечно-элементная модель шпиля Петропавловского собора конструкции спортивных саней с использованием программного комплекса APM Structure3D. Конструкция саней включает две основные части: алюминиевые опоры и пластиковое сиденье (обтекатель).

Оценка жесткости конструкции была проведена на основе статического расчета изгибной и крутильной жесткости. Была изготовлена конечно-элементная модель саней из двух видов элементов. Обтекатель саней состоял из четырехузловых оболочечных элементов, передняя и задняя опоры саней — из восьмиузловых объемных элементов. После проведения расчета были получены результаты для оценки жесткости конструкции. На рис. 8 представлено поле вертикальных перемещений конструкции при расчете на изгибную жесткость.

Александр Сажин, магистрант Ярославского государственного технического университета (ЯГТУ), представивший на конкурс работу «Численное исследование опоры кольцевого воздухораспределителя регенератора установки каткрекинга», занял второе место.

В его работе рассматривалась проблема локального перегрева стенки днища в месте крепления опор кольцевых воздухораспределителей при эксплуатации регенератора установки каталитического крекинга, при этом внутренние стальные элементы конструкции нагреваются до 500 °С.

В системе КОМПАС-3D была создана 3D-модель существующей опоры и выполнен ее расчет на прочность с использованием метода конечных элементов в приложении APM FEM. Сначала были сформированы отклики, ограни-

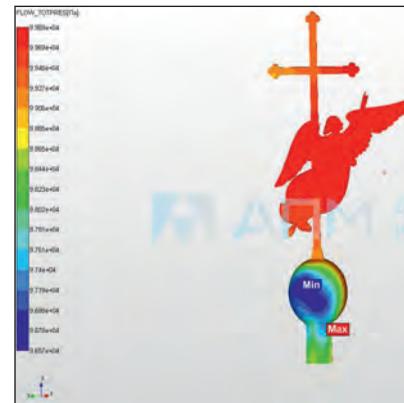


Рис. 7. Карта распределения давления при скорости потока 100 м/с

чения и целевая функция, а также задана область проектирования, в результате чего была сформулирована оптимизационная задача (максимизация жесткости конструкции с ограничением объема). Затем, после расчета топологической оптимизации, получился новый силовой каркас трехмерной модели, работающий при заданной нагрузке (рис. 9а), который в виде поверхности (полигонального 3D-объекта) был передан в КОМПАС-3D для совмещения с исходной моделью, чтобы стать шаблоном для создания новой формы опоры (рис. 9б).



Рис. 8. Поле перемещений по вертикальной оси Y

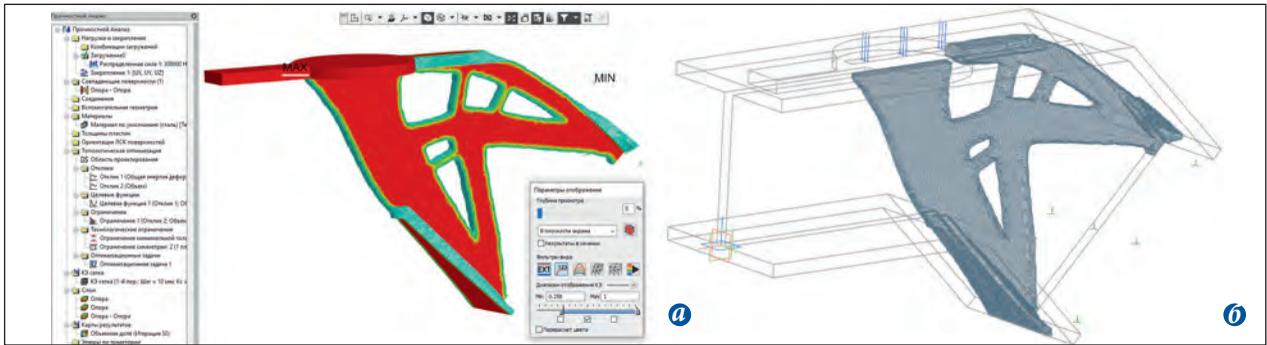


Рис. 9. Результат топологической оптимизации в APM FEM: а — результат оптимизации — карта объемных долей; б — совмещение исходной модели с результатом оптимизации

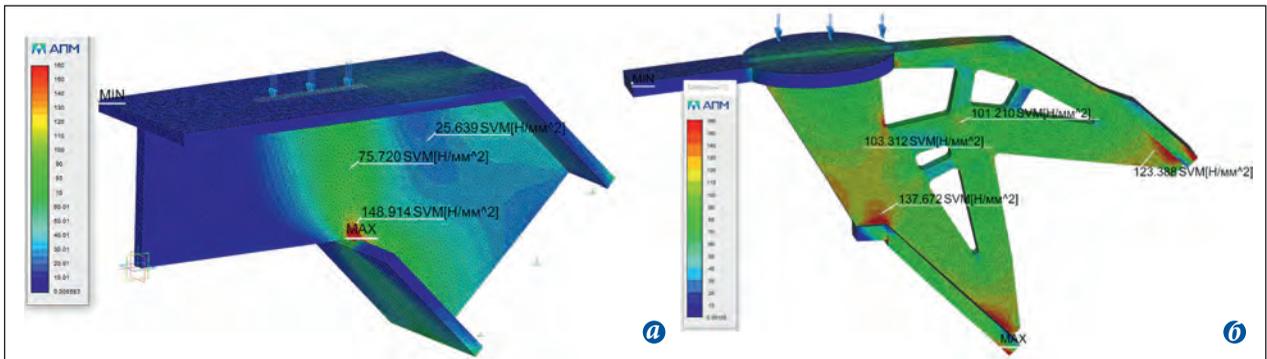


Рис. 10. Результаты расчетов конструкции опоры в APM FEM: а — распределение эквивалентных напряжений исходной модели; б — распределение эквивалентных напряжений оптимизированной модели

В данном случае конечной целью топологической оптимизации являлось не только снижение массы детали, но и уменьшение передачи тепла через опору на стенку аппарата. Как показали расчеты, умень-

шение поперечного сечения опоры привело к снижению теплопередачи, при этом новая конструкция опоры, рассчитанная в приложении APM FEM, выдерживает заданные нагрузки (рис. 10а и 10б).

В результате топологической оптимизации массу опоры, при сохранении всех эксплуатационных параметров, удалось снизить в три раза — с 134,3 до 44,8 кг. Результаты расчетов теплопроводности в

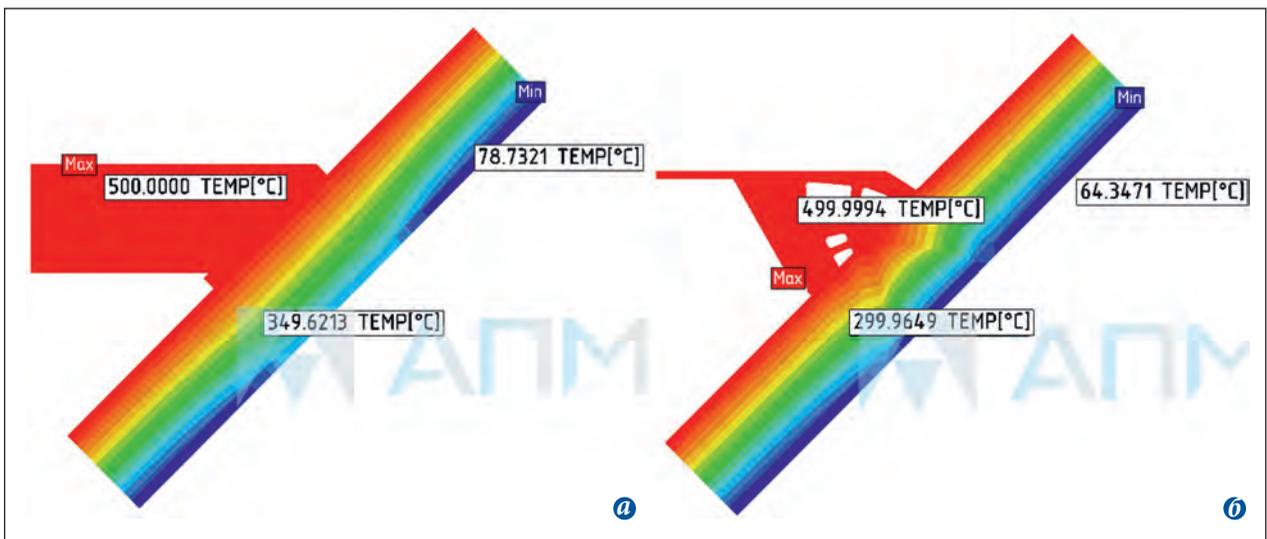


Рис. 11. Распределение температуры по сечению опор: а — результаты теплового расчета исходной модели; б — результаты теплового расчета оптимизированной модели

APM Studio (входит в состав APM WinMachine) показали, что максимальная температура днища в зоне опоры новой конструкции значительно ниже ($138,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ против $187,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Локальный перегрев днища для опоры старой конструкции составил $122,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для опоры новой конструкции — $75,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, при модернизации опоры площадь зоны локального перегрева днища существенно уменьшилась (рис. 11а и 11б).

Проведенные исследования показали, что топологическая оптимизация позволяет не только снижать массу конструкции, но и существенно уменьшать теплопередачу при сохранении эксплуатационных свойств.

Студент ЯГТУ Артем Серебряков в рамках конкурса представил работу по расчету рамы бульдозерного отвала на прочность с помощью модуля APM Studio (входит в состав APM WinMachine) и ее модернизацию на основании полученных результатов. Для этого к импортированной в APM Studio трехмерной модели рамы отвала была приложена распределенная нагрузка в наиболее ответственном шарнирном соединении. Расчеты показали, что сварные швы на отдельных участках не выдерживают заданную нагрузку (рис. 12).

В результате модернизации конструкции на основании проведенных повторных расчетов удалось значительно увеличить прочность рамы, снизить нагрузки узла в три раза, коэффициент запаса при этом вырос до приемлемых величин.

Александр Узлов, студент ЯГТУ, представил работу по поиску

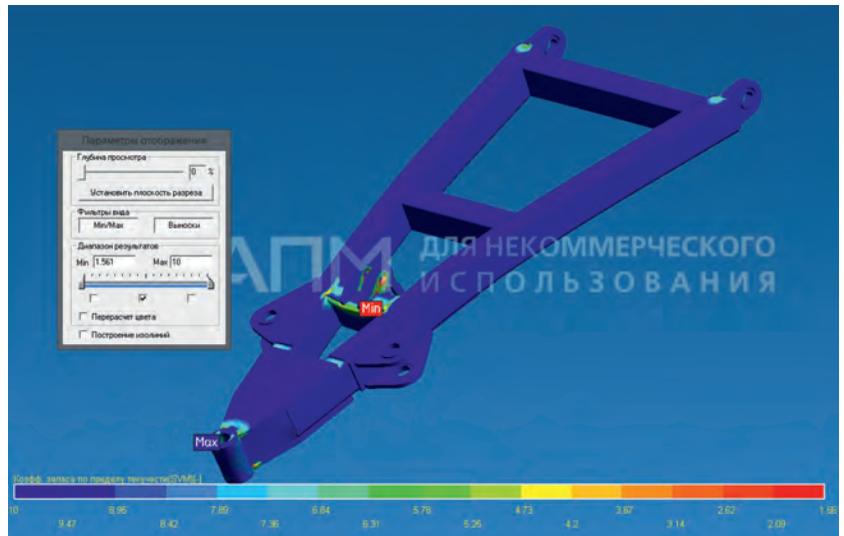


Рис. 12. Вывод карты коэффициента запаса по пределу текучести материала усиленной рамы в APM Studio

оптимальной по металлоемкости конструкции треугольной фермы консольного крана, разработанного в Ярославском государственном техническом университете. В модуле APM Structure3D (входит в состав APM WinMachine) была создана модель треугольной фермы. Место приложения силы соответствовало работе крана в наиболее опасном расчетном положении — когда груз находится на конце стрелы. На основании расчета усилий в стержнях фермы был проведен анализ и подбор параметров механизма подъема и поворота. Подбор сечений верхнего и среднего поясов фермы производился исходя из запаса

по пределу текучести, максимально допустимого прогиба консоли и минимально возможной массы металлоконструкции. Результаты расчета представлены на рис. 13.

Студент ЯГТУ Кирилл Шаманин представил на конкурс работу по теме «Модернизация вибрационного катка DM-614». Расчеты валов и подшипников проводились по стандартным методикам в соответствующих модулях программного продукта APM WinMachine. Для финального расчета вала и кулачкового банджа в APM Studio были импортированы предварительно созданные в КОМПАС-3D модели. Результаты расчетов показали допустимый диапазон

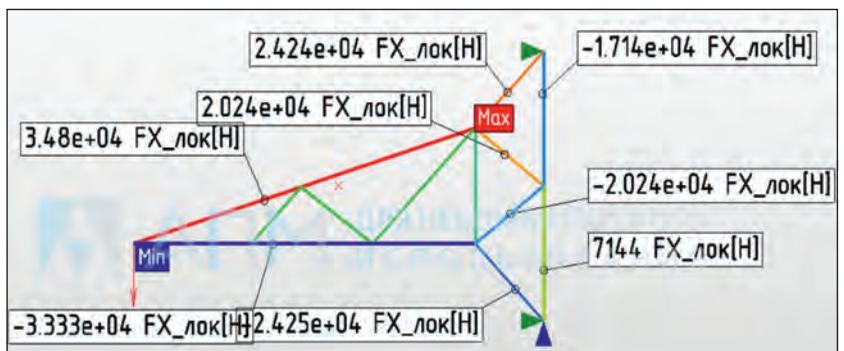


Рис. 13. Нагрузка в стержнях при расположении груза на конце стрелы

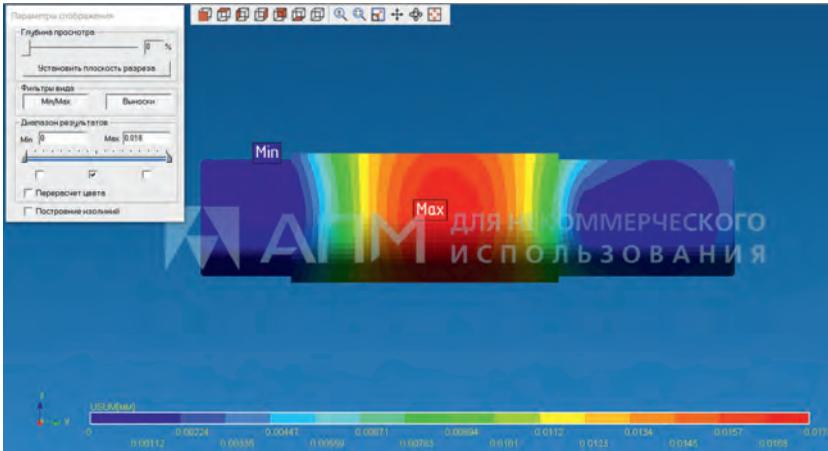


Рис. 14. Результат расчета перемещений перемещений наиболее нагруженного участка вала (рис. 14), а также значительный коэффициент запаса по пределу текучести в элементах кулачкового бандажа барабана (рис. 15).



Рис. 15. Карта результатов коэффициента запаса

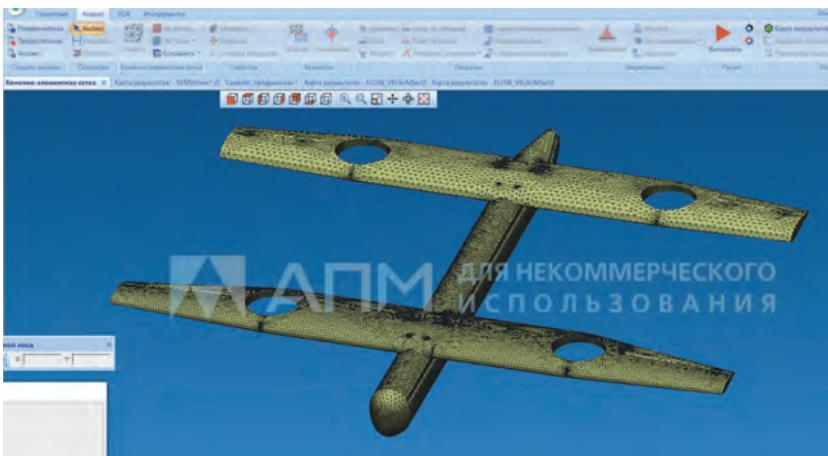


Рис. 16. КЭ-сетка на корпусе БПЛА в модуле APM Studio

Студенты МГТУ им. Н.Э. Баумана Даниил Кривоногов и Иван Чистяков представили на конкурс работу по теме «Проверочный расчет БПЛА самолетного типа с вертикальным взлетом и посадкой». Для проведения расчетов ими был использован модуль APM Studio в режиме анализа течений жидкостей и газов (APM FGA). Расчет скорости потока и давления на поверхностях крыльев, в рамках проверочного силового и аэродинамического расчета созданной конечно-элементной модели самолета (рис. 16 и 17), основывался на уравнениях Навье — Стокса и был реализован в режиме APM FGA, предназначенном для анализа кинематических, динамических, тепловых, энергетических и силовых характеристик течений жидких и газовых сред.

Полученные коэффициенты запаса по прочности и жесткости, а также подъемная сила подтвердили работоспособность и основные характеристики конструкции БПЛА.

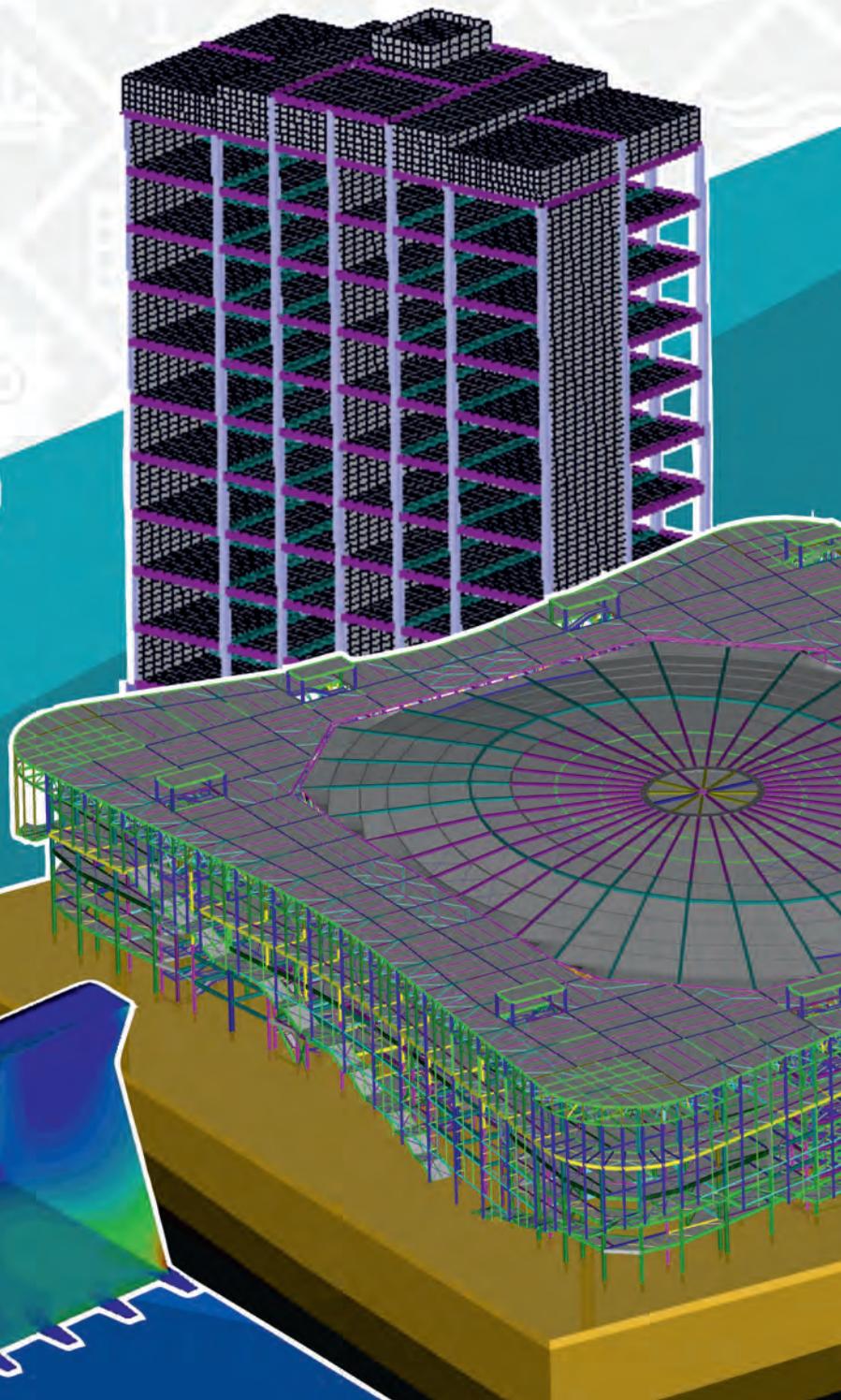
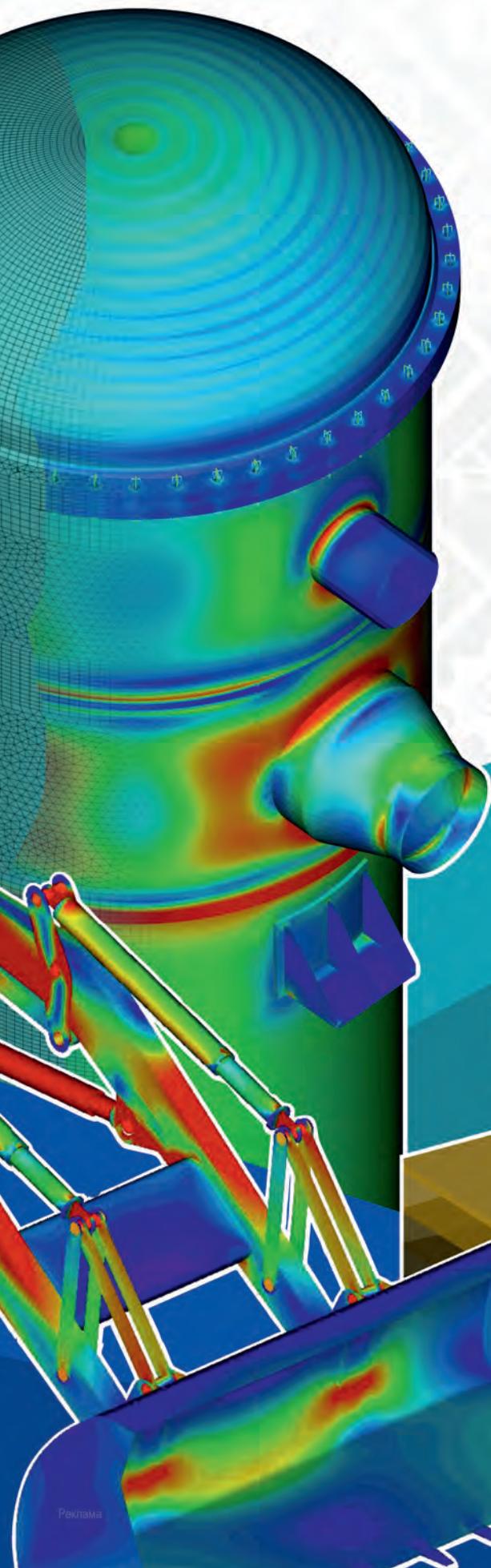
Студент Оренбургского государственного университета В. Макаренко для создания пластинчато-стержневой модели решетчатой рамы «Орск-2» выбрал программный комплекс APM Civil Engineering, который обладает необходимыми функциональными возможностями для моделирования стальных конструкций и выполнения требуемых расчетов в соответствии с государственными строительными нормами, а также визуализации полученных результатов. На конкурс он представил работу по анализу напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов решетчатой рамы, на основе которого выполняется сравнение вариантов конструирования карнизного узла с учетом использования аль-

www.apm.ru



АПМ

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА



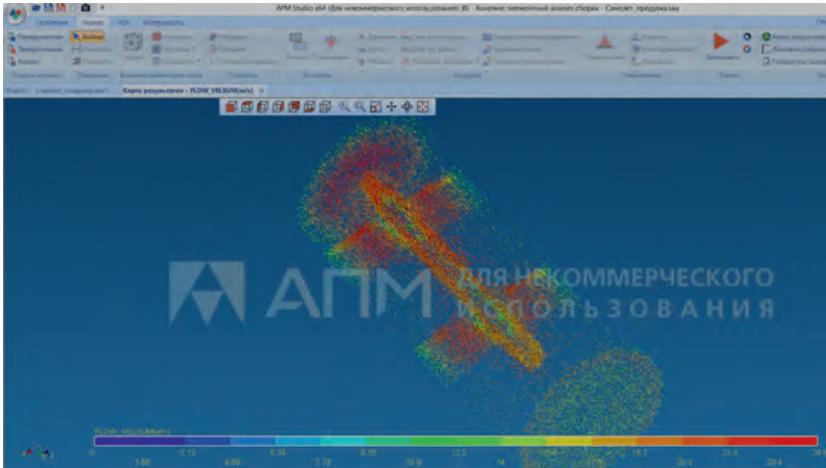


Рис. 17. Пример вывода результатов расчета — распределение скорости потока воздуха, обтекающего модель БГЛА



Рис. 18. Карта коэффициента запаса по пределу текучести

тернативных решений, включая расчет и сравнение коэффициентов запаса, локальных напряжений и зон их распространения (рис. 18). В расчете учитывались: собственный вес

конструкций, снеговая и ветровая нагрузки и их комбинации.

По результатам проведенного расчета при соизмеримых затратах и металлоемкости было

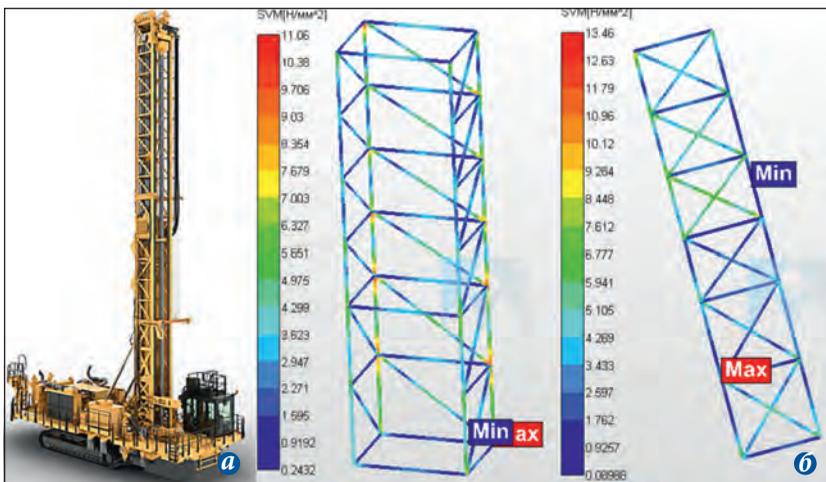


Рис. 19. Конструкция буровой мачты и результаты расчета: а — мачта буровой установки с открытой гранью; б — примеры вывода результатов расчетов напряженного состояния секции буровой мачты

определено, что наиболее эффективным решением с точки зрения применения несущей способности, а также равномерного распределения напряжений является вариант карнизного узла рамы с врезной пластиной.

Дарья Шпанькова, студентка Уральского государственного горного университета, представила на конкурс работу по исследованию мачты бурового станка на устойчивость. Модель геометрии мачты рассмотрена без дополнительного и навесного оборудования для сокращения и удобства расчетов (рис. 19). Исследования проводились в модуле APM Structure3D, который предназначен для комплексного анализа трехмерных конструкций.

По результатам расчетов определены напряжения в элементах мачты, перемещения узлов, коэффициент запаса устойчивости конструкции, а также коэффициент запаса по усталостной прочности.

Подводя общий итог, хотелось бы сказать, что конкурс в этом году явно удался! Присланные работы действительно отличались разнообразием и глубокой проработкой затронутых расчетных тем. От лица нашей компании мы выражаем искреннюю благодарность всем конкурсантам за активное участие и демонстрацию своих работ с применением программного обеспечения APM. Надеемся на дальнейшее сотрудничество как в рамках будущих мероприятий, так и в профессиональной деятельности! Участие в конкурсах и олимпиадах, несомненно, пойдет на пользу и будет расширять кругозор студентов, что в итоге поможет им при решении реальных практических задач, с которыми они столкнутся при работе на предприятиях. ➤