

Опыт применения технологий суперкомпьютерного инжиниринга в деятельности Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга»^{*}

М.В. Алешин, Ю.Я. Болдырев, А.И. Боровков, И.С. Давыдов, О.И. Клявин,
А.П. Петкова, А.Ю. Тамм

Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга»
Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого

Приведены результаты исследований на базе математического моделирования с использованием суперкомпьютеров для инженерного анализа и проектирования изделий и рекомендации по применению методик, позволяющих осуществлять расчет и выбор наилучших геометрических и режимных параметров малоразмерных газотурбинных двигателей, кузовов автомобилей и самолетов для малой авиации. Проанализированы возможности виртуального аэродинамического испытательного полигона, являющегося полноценным цифровым двойником традиционных аэродинамических испытательных лабораторий и средством моделирования типовых ситуаций непосредственно применения разрабатываемой техники, и виртуального полигона для проектирования класса высотных воздушных винтов для беспилотных воздушных судов большой дальности полета, отвечающих требованиям обеспечения тяги, надежности, живучести и стойкости к внешним воздействиям.

Ключевые слова: математическое моделирование, суперкомпьютерные технологии, передовые производственные технологии, цифровое производство.

Введение. Разработка промышленностью глобально конкурентных высокотехнологичных изделий в условиях четвертой промышленной революции невозможна без применения всего спектра передовых производственных технологий на каждом этапе, начиная с идеи создания нового изделия, новой системы или технологии; работ по инженерному анализу и проектно-конструкторским разработкам решения задач всего цикла расчетно-теоретической поддержки разработок; решения задач по технологической подготовке и организации производства изделий, и, наконец, приобретающих все большую значимость, задач по поддержке эксплуатации и изделий. При этом сами разработки должны создаваться в кратчайшие сроки, на уровне, превосходящем лучшие мировые образцы. Достижение соответствия всему множеству зачастую взаимно конфликтующих требований приводит современное производство к необходимости создания эффективных процедур высокопроизводительных вычислительных технологий управления всем процессом разработок и производства, что может быть реализовано только на базе платформенных решений с использованием суперкомпьютерных технологий [1-3].

Разработка и производство в кратчайшие сроки конкурентоспособной на мировом рынке продукции нового поколения сегодня возможны только на основе создания Цифровых Фабрик Будущего (Factories of the Future) – систем комплексных технологических решений. Их ключевым продуктом становятся «умные» цифровые двойники (Smart Digital Twins) объектов/изделий/продуктов, системы производств и технологических/производственных процессов [4-6]. Под «умными» цифровыми двойниками нами понимаются только основанные на высокоадекватных физической реальности математических моделях цифровые двойники, охватывающие полный жизненный цикл изделий. Как показывает наш и мировой опыт, такие цифровые двойники изделий должны обеспечивать детальный учет характеристик до нескольких тысяч материалов, совместно используемых в одном изделии, оценку до 10^{12} характеристик этого изделия при погрешности математического моделирования не более 5% по каждой из этих характеристик. В настоящее время «умные» цифровые двойники позволяют сокращать объемы на-

* Работа выполняется по госзаданию Минобрнауки, проект 9.4081.2017/ПЧ

турных испытаний при разработке новой продукции до 25 раз, на порядок сокращать сроки разработки, оперативно реагировать на запросы рынка.

Существо проблемы разработки «умного» цифрового двойника. В сжатой форме остановимся на важнейших направлениях разработки «умного» цифрового двойника изделия промышленности. Начнем с того, что для разработки «умного» цифрового двойника задается многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.), предъявляемых к продукту в целом и к его компонентам и деталям в отдельности. При решении сложных промышленных задач такая матрица может содержать десятки тысяч (~ 40 000 ... 60 000) целевых характеристик - показателей и требований, предъявляемых к изделию в целом, к его компонентам и деталям в отдельности, а также учитывает разнообразные ресурсные ограничения. Принципиально важной является возможность «управления изменениями» в процессе разработки - внесения изменений или уточнений как в целевые характеристики-показатели, так и в ресурсные ограничения в кратчайшие сроки, что обеспечивает непрерывный характер разработки.

Переходя к описанию состояния проблемы в отечественной промышленности укажем, что из всей совокупности технологий, формирующих, вообще, цифровой двойник, полномасштабно представлены в основном 3D геометрические модели. На их основе выполняются достаточно простые кинематические, статические и динамические расчеты, результаты которых обладают, как правило, низким уровнем адекватности реальным объектам и процессам (рис.1). Вполне очевидно, что полученные на физически низкоадекватных математических моделях результаты не могут пройти валидацию по итогам натурных испытаний в силу возможных больших расхождений с поведением реальных объектов. Таким образом, попытка воспроизвести поведение объектов на низкоадекватных математических моделях оборачивается, фактически, «фальстартом», который передаёт «эстафету» проблем/несоответствий на следующие этапы жизненного цикла продукта, увеличивая тем самым издержки, затраты и общее время вывода продукта на рынок.

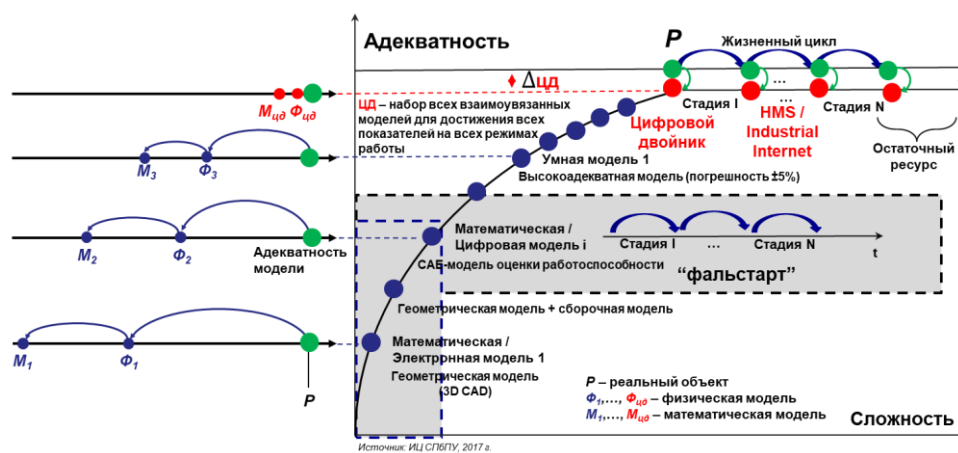


Рис. 1. Традиционный и современный подход к построению физических и математических моделей

Как правило, большой вклад в создание адекватной математической модели вносят данные о технологиях изготовления (например, «интеллектуальное» (высокоточное) литье, «интеллектуальная» штамповка, учет предварительного напряженно-деформированного состояния и утонения, «коробления» и т.д. деталей после технологических процессов). Соответственно, высокоадекватная «умная» модель изделия, с учётом особенностей конкретного производства, является *цифровым двойником производства* (Digital Twin, DT-2). Объединение цифрового двойника объекта/продукта (Digital Twin, DT-1) и цифрового двойника его производства (Digital Twin, DT-2) в рамках единой цифровой математической модели на основе выполнения десятков тысяч вычислительных экспериментов, которые мы назовем *виртуальными испытаниями* в процессе цифровой сертификации ведет к формированию «умного» цифрового двойника первого уровня (Smart Digital Twin, SDT-1), рис. 2.

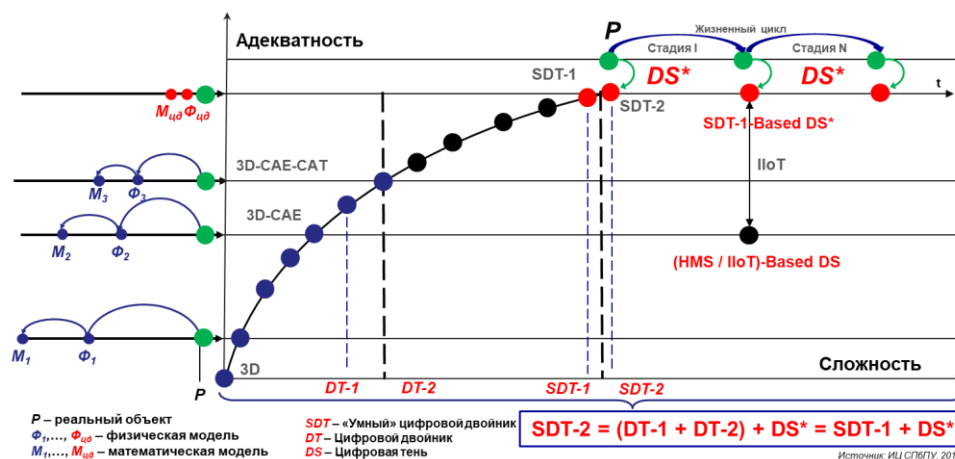


Рис. 2. Цифровой двойник, «умный» цифровой двойник, цифровая тень

В процессе эксплуатации на основе SDT-1 формируется «умная» цифровая тень (Smart Digital Shadow, SDS, DS*), которая адекватно описывает поведение реального объекта / продукта на всех режимах работы, включая аварийные ситуации. Формирование SDS происходит за счет получения оперативной множественной информации о функционировании конкретного объекта / продукта на всех режимах его работы (например, пуски и остановки, нормальные условия работы, нарушения нормальных условий работы, аварийные ситуации и пр.). Эта дополнительная информация, которая может быть получена этапе эксплуатации при помощи технологий промышленного Интернета и диагностики (Health Monitoring System, HMS), позволяет повысить уровень адекватности SDT-1 до DS*. Более того, такой подход позволяет в дальнейшем моделировать различные возможные и «непредвиденные» ситуации, включая их всевозможные комбинации/«наложения», и эксплуатационные режимы (например, оценивать уровень возможных повреждений или остаточный ресурс изделия или системы).

Дальнейшая трансформация SDT-1 в «умный» цифровой двойник второго уровня (SDT-2) возможна благодаря выявлению в процессе десятков тысяч виртуальных испытаний расположения критических зон, в которых и имеет смысл размещать те или иные датчики (акселерометры, тензометры, датчики температуры, давления, скорости и т. д.). Это позволяет радикально сократить число самих используемых датчиков и регулярно (например, ежедневно) получаемый объем больших данных (фактически Smart Big Data вместо Big Data), увеличить скорость их обработки и внесения необходимых изменений в SDT-1.

О структуре Центра компьютерного инжиниринга. Ядром инфраструктуры Центра компьютерного инжиниринга (ЦКИ) является «Платформа виртуальной разработки и испытаний» (совместная разработка СПбПУ и ООО Лаборатория "Вычислительная механика" (ГК CompMechLab®)), на базе которой создаются «умные» цифровые двойники изделий для высокотехнологичных рынков. Работу ЦКИ обеспечивают высокопроизводительные вычислительные системы Суперкомпьютерного центра Политехнический суммарной производительностью более 1,3 ПФлопс и широкий спектр специального инженерного программного обеспечения (CAD / CAE / CAM / CAx / PLM / MES). Применение передовых компьютерных технологий CAD (Computer-Aided Design) и CAE (Computer-Aided Engineering), включая FEA (Finite Element Analysis), MBD (MultiBody Dynamics), CFD (Computational Fluid Dynamics), FSI (Fluid-Structure Interaction), EMA (ElectroMagnetic Analysis), CAO (Computer-Aided Optimization) позволяет значительно сократить сроки разработки и вывода на глобальный рынок сложной продукции. Применение суперкомпьютерных технологий позволяет ещё больше ускорить этот процесс математического моделирования, особенно, для сложных наукоемких и вычислительно ресурсоемких мультидисциплинарных проблем [6]. Внедрение PDM (Product Data Management) и особенно SPDM-систем (Simulation Process and Data Management) помогает упорядочить информационные потоки (для которых, как правило, характерно наличие больших массивов данных (BigData), которые генерируются в процессе многовариантного математического моделирования, проектирования/разработки продукта), систематизирует информацию и облегчает доступ к ней [7, 8].

Объектами разработок ЦКИ являются цифровые двойники изделий и процессов их разработки и производства (Digital Twins, DT1, DT2), опыт, получаемый в процессах разработки и эксплуатации изделий, аккумулируется в системах Больших Данных (Smart Big Data) и закладывает основу для работы Интеллектуальных Помощников (AI assistants) инженеров-разработчиков. Что же касается нашего видения Цифровой Фабрики Будущего, то структурно для каждого типа изделий, она состоит из набора методик (включая подходы к постановке и управлению целями разработки), автоматизированных систем виртуальных испытаний (Виртуальных Испытательных Полигонов), инструментов аккумуляции и обработки знаний, обеспечивающих работу интеллектуальных помощников. Такая интеллектуализация и автоматизация процесса разработки позволяет выйти на принципиально новый уровень проектирования, учитывать в многоуровневой матрице целей и ограничений проекта множество целевых показателей и ресурсных ограничений на изделие, создавать решения, выходящие за рамки интуиции главного конструктора. При этом сам подход, заключенный в идее Фабрик Будущего, инвариантен по отношению к используемым техническим решениям и отраслям применения. Так, в частности, Виртуальные Испытательные Полигоны в составе Цифровых Фабрик Будущего могут работать как на зарубежном, так и на отечественном инженерном программном обеспечении, отражать виртуальные испытания для жизненного цикла любых изделий в автомобилестроении, авиастроении, двигателестроении.

Примеры реализации приведенных идей в Центре компьютерного инжиниринга. Далее мы приводим иллюстрации практической реализации названного выше спектра идей, подходов и технологий на примерах ряда разработок, ведущихся в Инжиниринговом центре. Отметим при этом, что применение математического моделирования на основе высокопроизводительных вычислительных технологий является одним из основных направлений работ Центра и имеет почти двадцатилетнюю историю, берущую начало от первого восьмипроцессорного кластера в Политехническом университете до сегодняшних ресурсов петафлопсной мощности.

Характерным и исторически одним из важнейших направлений работ являются работы для автомобильной промышленности, по созданию более совершенного дизайна кузова, удовлетворяющего требованиям к прочности, жесткости, разрушению при аварии в соответствии с протоколом C-NCAP 2018 и дополнительным требованиям заказчика относительно снижения веса и NVH (шум, вибрации, плавность хода) с учетом производственных затрат. Для этого в последнее время активно применяется метод топологической оптимизации распределения материала, задачей которого является поиск оптимального распределения материала в заданной области для заданных нагрузок и граничных условий, соответствующих определенному набору целевых показателей. В постановке задачи оптимального распределения материала в качестве целевых функций используют такие критерии, как условия нагружения, локальные степени свободы, реакции сил, массу или объем конструкции, в качестве ограничений – объем или массу, напряжения, реакции сил, ограничения компоновки. Помимо расчетов прочности и жесткости конструкции автомобиля, на практике в процессе разработки проводятся расчеты пассивной безопасности автомобиля и частотный анализ [9-10]. С использованием SIMPметода (Solid Isotropic Material with Penalisation) для проведения расчетов оптимизируемая область разбивается конечными элементами с переменной плотностью, отражающей процентное соотношение используемого материала в каждом из них. Такой подход позволяет получить концептуальное представление о расположении путей-направлений нагрузки (load paths) в конструкции автомобиля, а целью оптимизации здесь является минимизация взвешенной податливости (weighted compliance) по всем расчетным случаям (load cases) кручения и изгиба. Повышение крутильной и изгибной жесткости кузова осуществляется путем модификации расположения усилителей, стоек и лонжеронов, за счет изменения их конфигурации, толщины и материала, оставаясь в рамках целевых показателей и с учетом естественных ограничений: внутреннего объема салона, дверных и оконных проемов, наличия прочих смежных компонентов. Итоговое распределение плотности и материалов используется для компоновки штампованных усилителей кузова, совмещая их с получившимися путями нагружения. Концептуальный дизайн компонента далее передается на конструкторскую доработку, где учитывается технологичность, штампуемость, собираемость введенных в конструкцию элементов. Изменения вносятся в конечно-элементную модель, проводится расчетная проверка обновленной конструкции кузова, обеспечивающая повышение крутильной и изгибной жесткости при снижении его массы. Принципиальная новизна предлагаемого подхода состоит в реали-

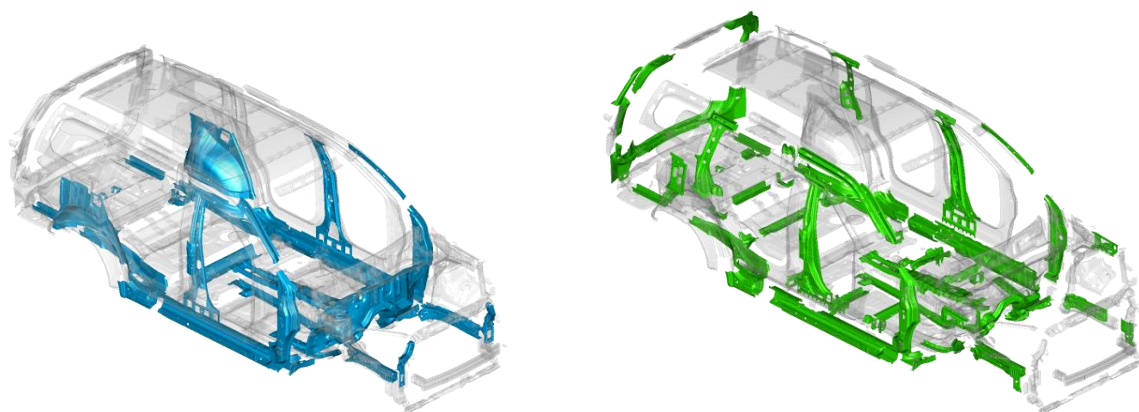
зации комплексной стратегии снижения веса каркаса кузова (Body-in-White, BIW) за счет одновременного изменения топологии, параметрической и многовариантной оптимизации конструкции кузова на основе применения уникального программного комплекса CML-Bench и экспертной оценки целевых показателей на всех этапах разработки. При этом в «умном» цифровом двойнике кузова автомобиля учитывается поведение примерно 200 различных материалов, среди которых металлы, сплавы, полимеры, композиционные материалы, наконец, метаматериалы с оптимальной микроструктурой. Для корректного описания физико-механических процессов в конструкции при различных воздействиях для каждого материала используется обширный набор параметров и характеристик, включая кривые упруго-пластического деформирования при различных скоростях деформирования, критерии начала разрушения, модели его развития, модели накопления повреждений в материалах и т.д. Также учитываются сопряжения элементов конструкции кузова между собой посредством сварных точек (до 7000) и швов, клеевых соединений, для каждого из которых характерна своя модель поведения при различных воздействиях. От расположения сварных соединений сильно зависит поведение конструкции кузова (прочность, вибрации, усталость, долговечность, акустика). Кроме того, «умный» цифровой двойник содержит в себе информацию о каждом узле (до 100 элементов) таких механизмов, как двигатель, подвеска, капот и крышка багажника, стеклоподъемники и т.д.), о его кинематических, динамических и прочностных особенностях, позволяя оценить качество функционирования, и вся эта информация представлена в виде отдельных математических моделей, описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных.

Наиболее полной и сложной оценкой качества и безопасности автомобиля является натуральный краш-тест. При этом натурные испытания являются чрезвычайно дорогостоящими, поэтому единственным способом минимизировать затраты и сократить время вывода на рынок автомобиля является проведение виртуальных испытаний. Результаты тысяч и десятков тысяч виртуальных испытаний, выполняемых в автоматизированном режиме, используются при создании «умного» цифрового двойника, что позволяет, например, программировать разрушение 5 000 – 8 000 сварных точек кузова автомобиля при различных вариантах возможных столкновений таким образом, что достигается необходимый высокий уровень пассивной безопасности. Высокий уровень детализации «умного» цифрового двойника позволяет фактически запрограммировать поведение каждого элемента конструкции в эксплуатационных и аварийных условиях. Для проведения виртуальных краш-тестов в «умных» цифровых двойниках используются полные виртуальные аналоги всего испытательного оборудования, всех испытательных стендов, которые применяются при проведении натуральных испытаний. Они составляют виртуальный испытательный полигон, в который входят модели антропоморфных манекенов, содержащие более 10 000 измерительных датчиков травмирования, модели семейства манекенов для мужчин, женщин и детей, более 20 барьеров для проведения различных сертификационных и рейтинговых испытаний, и 20 ударников различных частей тела человека для дополнительных оценок, в том числе безопасности пешеходов при столкновении с автомобилем.

Краш-тест – быстропротекающий динамический процесс, длительность которого составляет порядка 200 – 250 мс. Шаг интегрирования для численного решения возникающих здесь задач составляет 1 мкс. Общее количество шагов интегрирования – более 200000. Вся эта информация образует большие данные (Smart Big Data) «на входе» (более $2 \cdot 10^{12}$ параметров) «умного» цифрового двойника. Проведенные виртуальные испытания дополняют этот массив, получается Smart Big Data «на выходе». При моделировании процесса на суперкомпьютере длительностью 200 мс на выходе получается массив данных, содержащий более 10^{14} параметров. В нескольких десятках миллионов узлов $\sim (1...3) 10^7$ регулярно считываются более 50 параметров, таких как перемещения, скорости, ускорения, деформации, напряжения и др. В итоге получается $5 \cdot 10^8$ кривых, исчерпывающе описывающих поведение «умного» цифрового двойника.

На рис. 3 представлен пример оптимизированного дизайна автомобиля SUV, полученный в системе SPDM CML-Bench за счет замены материалов ряда элементов каркаса кузова на более прочные (51 деталь, рис. 3а) и изменения их толщин (98 деталей, рис.3б). Выбранная стратегия снижения массы после всех циклов оптимизации и выполнения краш-тестов, анализа NVH (шум, вибрации, плавность хода) и анализа прочности (более 1500 симуляций) обеспечила выполнение всех требований заказчика наряду с уменьшением массы на 30 кг (7,5%). Среднее

улучшение результатов краш-тестов с точки зрения смещений внутрь салона составило около 30%.



а - 51 деталь с заменой материала

б - 98 деталей с измененной толщиной

Рис. 3. Общие изменения в каркасе кузова (BIW)

Применение приведенного подхода оказывается чрезвычайно эффективным при компьютерном инжиниринге концепции дизайна различных конструкций, который может быть реализован только на основе высокопроизводительных вычислительных технологий, как в силу многовариантности, так и в силу большого числа параметров конструкции.

Еще одним примером применения суперкомпьютерных технологий в инженерном анализе и проектировании малоразмерных газотурбинных двигателей, что позволяет учитывать при моделировании всю совокупность аэродинамических, теплофизических процессов и прочностные параметры [11]. При этом анализ существа всех названных физических процессов показывает, что при корректном инженерном анализе их необходимо рассматривать только в совокупности. То есть речь идет о решении связанных задач аэроупругости, термоупругости и аэротермодинамики. И здесь необходимо указать на то обстоятельство, что содержательная оптимизация характеристик рассматриваемого класса машин, как, впрочем, и практически всего того, что разрабатывается современной промышленностью, возможна только на основе мультидисциплинарных (междисциплинарных) постановок инженерных задач. Для малых газотурбинных двигателей проблема оптимального проектирования особенно актуальна. Например, для таких двигателей, ориентированных на авиацию (турбореактивных и турбовинтовых двигателей), важно иметь максимальную тягу и минимальный вес; для двигателей, ориентированных на малую стационарную энергетику, важно иметь максимальную мощность при минимальном потреблении топлива и т.д. Однако оптимизация характеристик, как рассматриваемого класса малых газотурбинных двигателей, так и других классов машин, является трудной проблемой даже на стадии постановки задачи оптимизации. Действительно, их корректная постановка сопряжена с необходимостью рассмотрения задач Лагранжа вариационного исчисления для процессов, описываемых уравнениями с частными производными (уравнения названных выше физических процессов) с разного рода ограничениями, что с математической с точки зрения достаточно проблематично в силу нерешенности многих сугубо математических проблем (существование решений в том или ином классе функций, единственность решений и т.д.), не говоря уже о вычислительной стороне проблем, требующих сверхвысокопроизводительных ресурсов.

Применение суперкомпьютерных технологий при проектировании малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) позволило получить расчетные газодинамические и геометрические параметры узлов, идентичные замеренным на прототипе двигателя с расхождением в среднем не более 10%. Сравнение результатов, полученных с помощью двух методик (общий аэротермодинамический расчет и CFD-расчет), показало незначительное (порядка 3%) расхождение давлений и температур в тракте двигателя. Анализ результатов серии вычислительных экспериментов проточной части двигателя и соплового аппарата показал возможность увеличения тяги на 9,6% и увеличения соотношения тяги к массе на 27,7% (рис.4).

Укажем еще на один проект, где активно используются вычислительные ресурсы СКЦ «Политехнический» при решении целого комплекса задач, связанного с моделированием различных режимов полета самолета-амфибии АС-24. Целью этого проекта является создание нового перс-

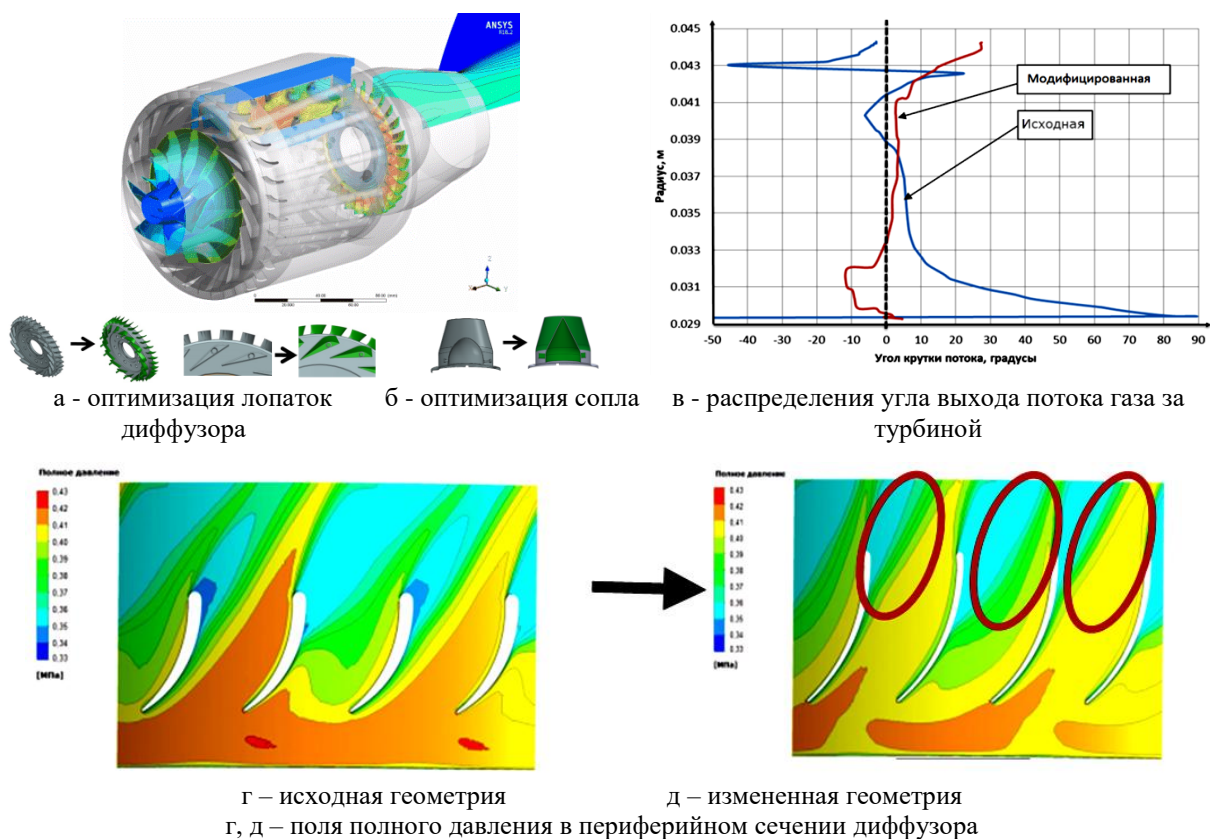


Рис. 4. Оптимизация проточной части двигателя и соплового аппарата МГТД

пективного самолёта-амфибии и серии его модификаций, обеспечивающего устойчивое глиссирование и маневренность на воде. Применение моделирование на основе уравнений Навье-Стокса позволяет провести анализ поведения летательного аппарата при различных режимах полёта, исследовать обтекание самолёта на различных углах атаки в широком диапазоне скоростей без многочисленных натурных экспериментов в аэродинамической трубе. Современный подход к конструированию воздушного судна включает в себя оптимизацию отдельных частей крыла, таких как «законцовки», элероны, закрылки, а также носовой и хвостовой частей фюзеляжа. Анализ влияния каждого аэродинамически значимого элемента самолета и выбор наиболее оптимального варианта по целому ряду целевых показателей, представляется наиболее эффективным при рассмотрении большого количества решений, получение которых без математического моделирования на суперкомпьютерной системе занимает месяцы и даже годы.

В проекте, наряду с классическими задачами аэродинамики решается и сложная сопряженная задача аэрогидродинамики для моделирования посадки и взлёта самолёта-амфибии с поверхности воды. Выбирается подходящая расчетная сетка, модели турбулентности, параметры моделирования границы раздела фаз воздух-вода. В процессе моделирования итерационно вносятся изменения во внешнюю поверхность планера (рис. 5) с целью уменьшения дистанции разбега при взлёте с воды, сохраняя характеристики самолёта на крейсерском режиме. Текущими результатами проекта являются повышение максимальной скорости на 10%, крейсерской скорости (на высоте $h=2\text{км}$) на 15%, снижение взлетной скорости на 15% при прочих характеристиках, как у АС-24 (максимальный взлетный вес – 1600 кг, дальность полета – 2200 км, длина разбега/пробега - 200/250 м, пассажировместимость – 4 чел.).



Рис. 5. Исходная (а, б) и оптимизированная (в) конструкция самолёта-амфибии на базе АС-24

Еще одним важным направлением работы Инжинирингового центра является создание Виртуального аэродинамического испытательного полигона (ВАИП), который предназначен для тестирования цифровых прототипов беспилотных летательных аппаратов в широких диапазонах реальных условий окружающей среды и сценариев полета [12]. ВАИП предназначен для моделирования аэродинамических воздействий на проектируемые летательные аппараты и позволяет сокращать практически на 90% количество натуральных испытаний за счет использования универсальных технологий математического моделирования. Вообще же, под ВАИП нами понимается высокопроизводительный программно-аппаратный комплекс, реализующий на основе технологий математического моделирования всю совокупность работ по инженерному анализу и проектированию изделий, а также всех случаев, соответствующих типовым испытаниям и условиям их эксплуатации.

Разрабатываемый полигон в рассматриваемом случае летательных аппаратов моделирует аэродинамические процессы на основе прямых решений уравнений аэродинамики с учетом всех особенностей протекающих процессов (нестационарности, аэроупругости и др.). Подчеркнем, что использование высокопроизводительных вычислений позволяет получить необходимые данные существенно быстрее в сравнение даже с использованием мощных рабочих станций. ВАИП более гибок к спектру решаемых задач, нежели проведение дорогостоящих стендовых испытаний прототипов беспилотных воздушных судов (БВС). Более того укажем на то, что в ряде случаев сами стендовые испытания принципиально невозможны. В результате использования ВАИП заказчик получает облако откликов конструкции БВС на изменения параметров, что позволяет сократить число циклов «изменение – прототип – тестирование». ВАИП, включает в себя цифровые двойники (Digital Twin) испытательного оборудования традиционных аэродинамических испытательных лабораторий и позволяет создавать цифровые двойники изделий (БВС). Таким образом, ВАИП является универсальным средством моделирования типовых ситуаций непосредственного применения разрабатываемой техники. В ближайшей перспективе использование аналогичных виртуальных полигонов должно стать неотъемлемой частью цифрового жизненного цикла изделия.

Для рассматриваемого класса задач, связанных с летательными аппаратами, ВАИП будет включать цифровые модели посадочных площадок (в том числе внеаэродромного базирования), учитывающих рельеф, угол наклона усредненной поверхности, качание и пр.; модели навесного оборудования (видеокамеры, микрофоны, приборы ночного видения, различные датчики и пр.); модели перевозимых грузов. В ВАИП будет реализована возможность моделирования различных климатических и погодных условий (например, порывы ветра), максимально приближенных к реальным. В состав ВАИП будет также входить комплекс программного обеспечения для моделирования аварийных ситуаций и модернизации конструкций с целью обеспечения безопасности, маневренности и устойчивости к внешним воздействиям.

Средства разрабатываемого виртуального полигона позволяют автоматизировать не только постановку задачи на расчет, но и рассматривать полный цикл от загрузки геометрии БВС до получения результатов численных расчетов. Реализуется возможность автоматизированной генерации расчетной области на базе вычисленных размеров испытываемой модели БВС, начальных и граничных условий. Круговая продувка БВС выполняется полностью автоматически, без участия инженера, также в автоматическом режиме возможна обработка результатов расчетов, на основании выбранных пользователем целей численного моделирования. При моделировании используются современные программные комплексы мирового уровня для решения задач аэродинамики, механики твердого деформируемого тела и мультидисциплинарных задач. В нашем проекте модели ВАИП валидируются с помощью проведения стендовых испытаний в аэродинамической трубе. ВАИП позволяет производить автоматизированную обработку результатов виртуальных испытаний в требуемых итоговых конфигурациях. По требованию пользователя могут быть выведены только аэродинамические коэффициенты или в графическом виде представлены распределения давлений по поверхности БВС, поле скоростей вблизи исследуемого объекта (линии тока) (рис.6).

Основным преимуществом разрабатываемых ресурсов ВАИП является способность с высокой точностью решать практические задачи аэродинамики и управления специально для разработки БЛА без необходимости привлечения высокоспециализированных и дорогостоящих

материальных ресурсов (аэродинамические трубы, прототипы изделий, суперкомпьютеры и специализированное ПО) и специалистов.

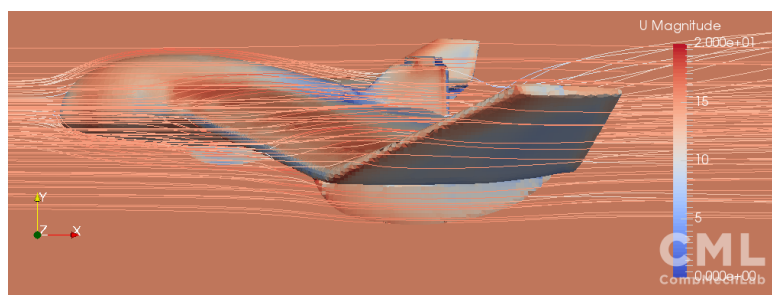


Рис. 6. Распределение давления по поверхности БВС и линии тока

Весьма близким к только что рассмотренному направлению являются работы Инжинирингового центра по созданию Виртуального полигона (ВП) для проектирования высотных воздушных винтов, предназначенного для сокращения количества итераций изготовления опытных образцов воздушных винтов и натурных испытаний [13]¹. Применяемый в ВП подход к разработке, основанный на математическом моделировании (model-driven design), позволяет оптимизировать конструкцию лопасти воздушного винта и моделировать работу всей конструкции в заданных техническим заданием режимах работы. Исследуются эксплуатационные характеристики винта, такие как тяга, потребляемая мощность, шум на местности, прочность и устойчивость к внешним воздействующим факторам, устойчивость к удару птицы и града, ресурс механизма изменения шага. Виртуальные испытательные стенды будут верифицированы по результатам натурных испытаний и открытым данным.

Аэродинамические виртуальные испытания в ВП будут включать испытания профилей лопасти винта, полной конструкции винта в 3D-постановке, испытания на флаттер. Результаты газодинамических расчетов, включающие силы давления, силы трения, скорости и температуры потоков будут использованы как входные данные для виртуальных испытательных стендов прочности, устойчивости, ресурса. Использование суперкомпьютерных технологий для расчетов газодинамических задач позволит сократить время исследования конструкции винта и ускорить его разработку. Программное обеспечение, входящее в состав части виртуальных испытательных стендов виртуального полигона, позволяет понизить «уровень входа» оператора полигона за счет инкапсуляции параметров решателей и постпроцессоров, упрощения интерфейса и подготовки заранее заданных профилей расчета.

На текущем этапе проекта разработана архитектура ВП, виртуальный испытательный стенд профилей лопасти воздушного винта, методика виртуальных испытаний профиля лопасти, методика оптимизации профиля лопасти, созданы модели импакторов для виртуальных стендов птицестойкости и исследования устойчивости воздушного винта к воздействию града и предметов аэродромной засоренности, выбран и исследован винт-аналог для верификации ВП.

Разрабатываемый виртуальный полигон станет важным шагом к созданию в будущем полноценных цифровых двойников воздушного винта, цифровой сертификации изделий авиационной техники.

Заключение о роли суперкомпьютерных технологий в инженерном деле. Центральной проблемой, обуславливающей трудности, встречающиеся на пути широкого внедрения суперкомпьютерных технологий в инженерное дело, да и в инженерное образование, является их универсальный и всеобъемлющий характер. Сущность этой универсальности заключается в том, что суперкомпьютерные технологии позволяют нам в максимальном объеме реализовать технологии математического моделирования реальных объектов самого сложного вида. А это, в свою очередь, дает возможность ставить и решать во всей полноте междисциплинарные задачи, которые, как указывалось, дают возможность весьма близко подойти к описанию реального физического мира в формате цифровых двойников. При этом реализуется вся универсальная цепочка от постановки задачи, выбора эффективных вычислительных схем, обеспечивается требуемая быстрота получения результата и, что особенно важно, инженер и исследователь по-

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках Соглашения № 14.578.21.0244 от 26.09.2017 г.

лучают возможность полномасштабной визуализации результатов вычислений.

Но такое высокое, и все более нарастающее в своих возможностях качество описания явлений природы и мира техники, требует и все более высокого уровня освоения инженерным сообществом самих фундаментальных основ инженерного знания! При этом сами эти основы становятся малоразличимыми со знанием естественнонаучным. Именно здесь, как нам видится и «кроется» проблема слабого внедрения суперкомпьютерных технологий в инженерное образование, - высшая техническая школа, в своем подавляющем большинстве, все еще не готова и во многих случаях принципиально не способна к радикальной и быстрой перестройке учебного процесса на такие технологии [14].

Работа выполняется по госзаданию Минобрнауки, проект 9.4081.2017/ПЧ

Литература

1. А.И. Боровков, Ю.Я. Болдырев. Суперкомпьютерный инжиниринг – стратегическая платформа развития инженерного образования//Материалы Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах». 5-7 июня 2014 года. Санкт-Петербург - Том 6. Пленарные доклады. - СПб. Издательство политехнического университета. 2014. С.87-92.
2. Ю.Я. Болдырев А.И.Боровков, В.С. Заборовский. Компьютерный инжиниринг - платформа модернизации отечественной промышленности. Международной суперкомпьютерной конференции Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров. Направление 1: Параллельные вычисления и их приложения. Г. Новороссийск, 22-27 сентября 2014 г. Изд-во МГУ, 2014. Электронное издание, стр. 152-153.
3. Э.Р. Абдулбариева, Ю.Я. Болдырев, А.И. Боровков, В.И. Жигалов, К.А. Иванова, А.А. Кузнецов и др. «Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий». РФЯЦ ВНИИЭФ, СПбГПУ, Центр Стратегических Разработок «Северо-Запад», Минпромторг РФ. Доклад. Санкт – Петербург. 2014 г. 106 с.
4. Design with Confidence: CIMdata Commentary. January 29, 2015. – URL: <https://www.cimdata.com/en/resources/complimentary-reports-research/commentaries/item/3345-design-with-confidence-commentary> (18.09.2017).
5. Stackpole B. Digital Twins Land a Role In Product Design. – URL: <http://www.deskeng.com/de/digital-twins-land-a-role-in-product-design> (18.09.2017).
6. Department of Energy High-End Computing Revitalization Act of 2004. – URL: https://www.nsf.gov/mps/ast/aaac/p_1_108-423_doe_high-end_computing_revitalization_act_of_2004.pdf (18.09.2017)
7. Компьютерный инжиниринг / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
8. Бионический дизайн / А.И. Боровков, В.М. Марусева, Ю.А. Рябов, Л.А. Щербина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 92 с.
9. Validation of EuroNCAP frontal impact of frame off-road vehicle: road traffic accident simulation /S. Alekseev, A. Tarasov, A. Borovkov, M. Aleshin, O. Klyavin // Materials Physics and Mechanics, Vol. 34, No. 1, 2017. – p. 59-69
10. NVH analysis of offroad vehicle frame. Evaluation of mutual influence of body-frame system components /S. Alekseev, A. Tarasov, A. Borovkov, M. Aleshin, O. Klyavin // Materials Physics and Mechanics, Vol. 34, No. 1, 2017. – p. 70-75
11. Тихонов А.С., Тамм А.Ю. Перспективные пути развития малоразмерных ГТД // Тезисы Международного форума двигателестроения «Научно-технический конгресс

по двигателестроению (НТКД-2018)». 4-6 апреля 2018 года. Москва – Том 1. - Москва. Изд-во «Ваш Успех. 2018. С. 63 – 65.

12. URL: <http://fea.ru/article/virtualnyj-aerodinamicheskij-poligon-dlya-testirovaniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (10.04.2018).
13. URL: <http://fea.ru/article/razrabotka-i-primenenie-virtualnogo-ispytatelnogo-poligona-dlya-proektirovaniya-i-sozdaniya-klassa-vysotnyh-vozdushnyh-vintov> (10.04.2018).
14. Болдырев Ю.Я. Роль суперкомпьютерных технологий в инженерном образовании. Научно-технические ведомости СПбГПУ Информатика. Телекоммуникации. Управление № 162 2012 СПб., Изд-во Политехнического ун-та, С.9-15. ISSN: 1994-2354