

# Специализированная вычислительная инфраструктура конструкторско-технологического обеспечения наукоемкого производства

**П**олучение и удержание конкурентных преимуществ на рынке сложной наукоемкой продукции предполагает постоянное совершенствование ее технико-экономических характеристик. В свою очередь, необходимым условием, обеспечивающим возможность высокоэффективной работы кооперации разработчиков и производителей сложных изделий, является применение инновационных подходов, значительно расширяющих возможности традиционного производства, в первую очередь – внедрение методов, инструментов и технологий цифрового производства. В понятие цифрового производства входит единый интегрированный комплекс аппаратных и программных вычислительных ресурсов, производственных мощностей и соответствующих компетенций. Подобный комплекс обеспечивает возможность полномасштабного применения цифровых технологий в ходе создания и управления инженерными данными об изделии как минимум на стадиях конструкторско-технологической подготовки производства, а также непосредственно в ходе производства продукции.

## **Возможности цифрового производства**

Традиционно в соответствии с общепринятой идеологией управления жизненным циклом изделия/управления данными об изделии, заложенной в информационные системы класса PLM/PDM, цифровые инженерные данные представляют собой совокупность различных взаимосвязанных между собой электронных составов изделия, содержащих цифровые 3D-модели изделия и входящих в него узлов и деталей, а также различную, связанную с ними атрибутивную инженерную информацию. Кроме того, при должном уровне развития и применения подходов цифрового производства в виде цифровых моделей могут быть представлены не только сами изделия, но и средства производства, а также производственные и иные процессы.

Обладая соответствующим инженерным программным обеспечением и компетенциями, инженеры получают возможность заниматься автоматизированным проектированием не только самих конечных изделий

и их компонентов, но также разрабатывать технологические процессы и операции, проектировать оснастку, управляющие программы для станков с ЧПУ, цеха, линии и участки, создавать интерактивные руководства по эксплуатации изделия и многое другое.

Конечные продукты инженерной деятельности подлежат испытаниям, и зачастую несоответствия выявляются только на этапе проверки работоспособности опытных образцов, что нередко приводит к необходимости осуществления последующей дополнительной ресурсоемкой инженерной деятельности, связанной с реализацией необходимых изменений. Широкие возможности специализированного инженерного программного обеспечения в части виртуальной симуляции работы изделия, технологических процессов, работы специализированного производственного оборудования, цеха и даже моделирования поведения производственного персонала позволяют уже в ходе проектирования изделия, технологических процессов и средств производства избежать принятия некорректных инженерных решений и, соответственно, вынужденных дополнительных затрат для исправления несоответствий.

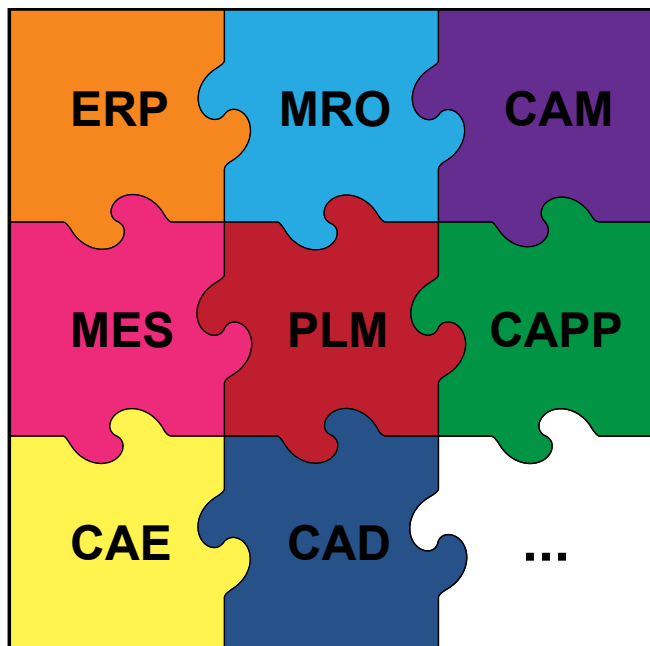
Благодаря использованию цифрового производства инженеры могут уже на ранних этапах проектирования оценивать:

- ▶ возможно ли будет произвести разрабатываемое изделие теми средствами производства, которые сейчас имеются в наличии. Если это невозможно, то чем необходимо доукомплектовать производство и будет ли это экономически выгоднее, чем внести в изделие существенные инженерные изменения;
- ▶ какая модернизация производственной инфраструктуры потребуется для использования новых средств производства;
- ▶ насколько разрабатываемое изделие получается технологично в производственном и эксплуатационном плане и т.д.

Применение на предприятии технологий и методов цифрового производства предполагает внедрение у разработчиков и производителей целого ряда программного обеспечения различных классов. И в этом случае предел возможностей развития циф-

рового производства во многом определяется объемами выделяемых предприятием инвестиций на ИТ-развитие данного направления, а также наличием персонала с соответствующими компетенциями для развития направления.

Программная часть комплекса решений цифрового производства может представлять собой совокупность интегрированных между собой информационных систем различных классов (PLM/PDM, CAPP, CAD, CAM, CAE, MES, ERP и др.), образующих единое информационное пространство управления жизненным циклом изделия как минимум в ходе конструкторско-технологической подготовки производства, а также непосредственно на этапе производства продукции. Если же разработчики и производители находятся в тесной взаимосвязи с эксплуатантами их продукции и готовы совместно управлять данными об изделии также и на этапе его эксплуатации, то комплекс решений может быть соответствующим образом расширен за счет внедрения и интеграции программного обеспечения соответствующего класса (MRO и т.п.).



Единое информационное пространство управления жизненным циклом изделия

При наличии должных компетенций у разработчиков и производителей продукции, а также организованной совместной коллективной работе с непротиворечивой, актуальной и корректной информацией, хранящейся в едином информационном пространстве, результатом может стать не только локальное повышение эффективности деятельности отдельных подразделений, но и повышение эффективности деятельности предприятия в целом. Ведь, с одной стороны, у инженерных подразделений появляется возможность использовать виртуальные цифровые технологии для проектирования и симуляции как работы самого изделия, так и большинства сопутствующих его разработке и производству процессов и обеспечивающих систем в виде средств производства. А с другой стороны, при грамотной организации совместной работы и использования едино-

го информационного пространства в отношении взаимосвязанных между собой бизнес-процессов работы конструкторов, технологов и расчетчиков во многом могут быть сокращены трудозатраты и сроки исполнения. Ведь при использовании 3D-моделей в качестве основного электронного документа с данными об изделии и получении доступа технологов и расчетчиков к конструкторским 3D-моделям уже на самых ранних стадиях проектирования они могут использовать эти модели в качестве актуальных исходных инженерных данных для выполнения своих профильных работ. За счет применения такого подхода сроки технологической обработки изделия могут быть существенно сокращены, а количество инженерных изменений, связанных с несогласованной работой подразделений и использованием некорректных и неактуальных инженерных данных может быть значительно снижено.

## Численное моделирование на службе цифрового производства

Численное моделирование все более широко используется в ходе ведения инженерной деятельности. Существует немало областей его применения – проверка функционирования будущих изделий, симуляция работы производственного оборудования, контроль технологичности и ремонтпригодности изделий, привычные всем расчеты конструкции и многие другие области.

В подобной ситуации, с одной стороны, благодаря компетенциям специалистов расчетных подразделений, а также все более функциональному программному обеспечению уровень решаемых задач численного моделирования может значительно усложняться, но с другой стороны, существенно растут риски того, что производительности аппаратной части интегрированного комплекса решений цифрового производства не будет достаточно для оперативного решения многочисленных задач численного моделирования, что в целом может привести к увеличению сроков разработки и производства продукции, снижению ее качества и другим негативным последствиям. Причем риски могут расти как вследствие усложнения самих задач численного моделирования, так и в результате роста их количества.

Если говорить о продукции энергетического машиностроения, то она зачастую представляет собой геометрически сложные и масштабные по размерам изделия. Их эксплуатация нередко осуществляется в специфических условиях, сопровождающихся значительными напряжениями, градиентами температур и т.п. В этом случае в расчетах приходится применять подробные расчетные сетки, что нередко приводит к ужесточению требований к объему необходимой для расчетов оперативной памяти и вычислительных мощностей.

Кроме того, с точки зрения системной инженерии изделия энергомашиностроительной отрасли как системы нередко содержат в себе целый ряд взаимосвязанных между собой разномасштабных подсистем. В ходе осуществления инженерной деятельности возникают не только задачи оценки работоспособности отдельных

подсистем, но и их совокупности как единой системы. При этом важно технически обеспечить возможность масштабируемости используемого программного обеспечения для одновременного решения нескольких задач численного моделирования.

Например, для того чтобы выполнить нестационарный расчет турбины жидкостного ракетного двигателя, даже при использовании высокопроизводительной аппаратной части вычислительного комплекса и лучших программных решений может потребоваться более месяца процессорного времени высокопроизводительного вычислительного комплекса.

Безальтернативным гарантом обеспечения эффективного решения сложных и ресурсоемких задач численного моделирования и неотъемлемым элементом комплекса решений цифрового производства является суперкомпьютерный программно-аппаратный вычислительный комплекс, включающий аппаратную суперкомпьютерную часть с установленными прикладными пакетами программного обеспечения для проведения численного моделирования.

Эффективное использование инженерными подразделениями суперкомпьютерного комплекса позволяет при наличии соответствующих инженерных компетенций корректно и оперативно решать задачи численного моделирования и генерировать необходимые инженерные данные, которыми смогут пользоваться и управлять как расчетные, так и конструкторские и технологические подразделения. Расчетчики, получив от конструкторов необходимые цифровые модели, вне зависимости от их сложности будут уверены, что сумеют точно в срок выполнить все необходимые расчеты и выдать результаты конструкторам и технологам. Конструкторские и технологические подразделения получают инструменты, обеспечивающие возможность имитации выполнения технологических процессов, проведения виртуальных испытаний и симуляции работы изделий и средств производства, а также многие другие дополнительные возможности.

Вне зависимости от сложности проверяемых объектов и взаимосвязанных с ними процессов все необходимые отработки и симуляции будет возможно полностью корректно провести в рамках выделенного разумного временного ресурса.

## Аддитивные производственные технологии

До сих пор в статье затрагивались вопросы, в большей степени связанные с поиском возможности повышения эффективности деятельности разработчиков и производителей сложных изделий за счет применения методов, технологий и инструментов цифрового производства, а также активного использования численного моделирования. Но при этом речь шла о традиционном подходе, однако у традиционных производственных технологий есть свои пределы применения, а сложность изделий растет.

Всегда ли технолог может спроектировать технологические процессы, позволяющие получить изделие со сложными криволинейными поверхностями внутренних полостей? А как быть в случае необходимости решения задач локальной оптимизации геометрии и свойств изделия? Всегда ли качество оснастки позволяет осуществлять высокоточное литье? А если есть готовый сторонний образец сложного изделия и необходимо в кратчайшие сроки разработать и произвести его аналог, не обладая возможностью собственного традиционного производства и сторонней поставки всех узлов и деталей изделия? Или сторонний производитель перестал изготавливать и поставлять комплектующие либо они значительно выросли в цене, а альтернативные предложения на рынке отсутствуют?

А ведь еще существуют и текущие политические проблемы. На сегодняшний день под влиянием глобализационных процессов существенно изменилась структура производства, а также географическая концентрация производственных предприятий. В последние

десятилетия доля производимой внутри страны продукции была невысока, а зависимость от международных поставщиков продолжает оставаться существенной. В условиях принятого государственного курса на импортозамещение стимулирование развития отечественной производственной базы является одной из первостепенных задач.

Наряду с совершенствованием традиционных производственных методов, технологий и инструментов в последние годы весьма активно развиваются альтернативные, так называемые аддитивные технологии, которые при успешном внедрении могут весьма су-



щественно повысить эффективность функционирования производственных предприятий.

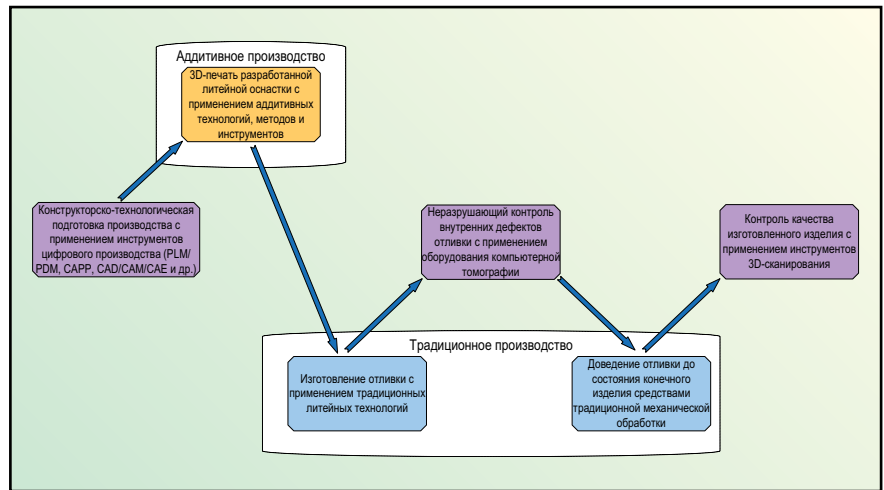
В отличие от традиционных технологий механической обработки, в основе которых лежит принцип удаления “лишнего” материала из заготовки, аддитивные технологии (additive technology) включают в себя комплекс подходов к изготовлению изделия путем “добавления” (addition) материала. В ходе применения аддитивных технологий активно применяется 3D-печать с использованием специализированных 3D-принтеров. Обладая необходимыми цифровыми данными об изделии (3D-моделью изделия и сопутствующей атрибутивной инженерной информацией), а также имея в наличии необходимые специализированные материалы, использующиеся для 3D-печати, производители с использованием соответствующего оборудования могут в короткие сроки локально на своей территории “аддитивно” (накладывая слой за слоем материал) производить требуемые физические изделия.

Если на заре применения аддитивных технологий 3D-печать в первую очередь применялась для изготовления функциональных и демонстрационных прототипов, то сейчас ведутся активные экспериментальные работы в части производства непосредственно конечных изделий различных отраслей промышленности. Аддитивные технологии активно применяются для производства высококачественных литейных форм, которые могут быть отпечатаны из подготовленного песка, зерна которого обработаны специальной смолой.

Существующее на рынке промышленное оборудование позволяет использовать широкую линейку материалов, начиная от фотополимеров и заканчивая металлическими сплавами, а также прочными и жаростойкими пластиками.

Применяемые материалы позволяют создавать даже конечные функционирующие системы, а с точки зрения конструктивных особенностей с помощью послойного создания объекта можно сформировать внутри него криволинейные полости практически произвольной формы, как имеющие выходы на внешнюю поверхность, так и обладающие полностью замкнутым объемом.

Кроме того, для создания изделия на 3D-принтере не требуется разработка дорогостоящих литейных форм, матриц, пуансонов и другой оснастки. В результате штучные изделия зачастую получаются дешевле, а время их производства значительно сокращается по сравнению с традиционными способами изготовления. В ходе аддитивного производства возможно достижение высокой точности, ведь точность большинства современных промышленных 3D-принтеров находится на уровне нескольких десятков микрон. Следует также выделить возможности производства монолитных изделий с вариацией механических, термических и магнитных свойств в различных частях изделия.



Синтезированный аддитивно-традиционный производственный подход

Надо отметить, что технологии аддитивного производства не преследуют цели полного замещения традиционного производства и должны использоваться там, где они являются в технико-экономическом отношении эффективнее традиционных производственных технологий. Зачастую при организации разработки и производства сложной продукции оптимальным решением выглядит применение как традиционных, так и аддитивных технологий.

Например, при организации работы по технологии точного литья на первом этапе инженерными подразделениями может быть разработана цифровая модель изделия. Далее на основе полученной цифровой 3D-модели при использовании аддитивных технологий на 3D-принтере методом послойного отверждения будут “распечатаны” песчаные формы для гравитационного литья и литья под давлением. На следующем этапе, уже с применением традиционных технологий, на участке литья будут изготавливаться отливки методом литья под низким давлением или методом гравитационного литья в ранее изготовленные на 3D-принтере песчаные формы. Изготовленные отливки должны будут пройти неразрушающий контроль на наличие внутренних дефектов с применением оборудования компьютерной томографии. После чего посредством фрезерной и токарной обработки отливки будут доведены до состояния конечного изделия. На завершающем этапе происходит 3D-сканирование готового изделия, построение его фактической цифровой модели и проведение контроля технологических операций на предмет несоответствий и брака.

Применение подобных синтезированных производственных подходов позволяет существенно сократить время изготовления изделий, добиться максимальной точности и качества изготовления при соответствующей оптимизации производственных затрат.

Для подтверждения того, что аддитивные технологии действительно позволяют выпускать продукцию, как минимум не уступающую по техническим характеристикам изделиям, изготовленным традиционными способами, проще всего привести конкретные факты.

Так, компания SpaceX установила отпечатанный на 3D-принтере главный клапан подачи окислителя в один



из девяти двигателей Merlin 1D ракеты Falcon 9, впоследствии успешно запущенной 6 января 2014 года. При этом изготовление детали заняло менее двух дней, в то время как применение технологий традиционного производства позволяет выпускать подобные изделия только в течение нескольких месяцев. Благодаря применению аддитивных технологий компания BAE Systems разработала и изготовила ряд деталей для истребителей Tornado, включая валы отбора мощности с двигателей.

Активное использование аддитивных и синтезированных аддитивно-традиционных производственных подходов может существенно сократить технологическое отставание в темпах вывода новых образцов продукции различных отраслей промышленности, а также уменьшить разрыв между наукой, опытным и массовым производствами.

## **Возможности применения суперкомпьютерных технологий при использовании аддитивных принципов производства**

Нередко возникающие задачи, связанные с реверс-инжинирингом, локальной оптимизацией геометрии или свойств изделия предполагают оцифровку исходного физического прототипа изделия с применением технологии 3D-сканирования. В результате этого формируется специфическая электронная модель изделия — так называемое “облако точек”, представляющее собой множество точек с конкретными пространственными координатами. Чем выше разрешение сканирования, тем точнее возможно передать геометрическую особенность изделия, но тем больше оперативной памяти и вычислительных ядер требуется. Актуальные требования к точности оцифровки изделия уже не позволяют осуществить этот процесс на обычных мощных персональных компьютерах.

“Облако точек” может быть импортировано в CAD/CAM/CAE-системы, и на его основе может быть построена “привычная” цифровая 3D-модель для ее последующей оптимизации, инженерной доработки и взаимной адаптации модели и технологических процессов аддитивного и традиционного производства. Эти процедуры связаны с цепочкой расчетов, сложность которых быстро возрастает при увеличении размеров сканируемой детали, повышении сложности ее формы, а также увеличении разрешения сканирования, что в качестве инструмента расчета требует суперкомпьютер.

Аддитивные технологии, методы и инструменты предполагают не только активное внедрение и использование их текущих возможностей, но и дальнейшее их развитие. При этом в ходе решения задач по совершенствованию аддитивных производственных подходов нередко возникает необходимость заниматься численным моделированием.

Совершенствование методов получения исходного сырья для аддитивного производства в виде мелкодисперсных порошков различного состава, зерен различных форм предполагает проведение детальных

исследований и численных экспериментов в области материаловедения. Не менее актуальными являются работы, направленные на совершенствование механизмов управления свойствами производимых изделий. Подобные задачи требуют применения точных и ресурсоемких физико-математических моделей, которые описывали бы процессы, происходящие при спекании в единое целое гранул порошков, в том числе представляющих собой многокомпонентные смеси. Эти исследования тоже невозможно представить себе без значительных численных экспериментов с применением суперкомпьютерного оборудования и соответствующего программного обеспечения.

Кроме того использование численного моделирования и суперкомпьютерных технологий позволяет активно развивать непосредственно и сами производственные методы, технологии и инструменты для перевода их на еще более высокий уровень эффективности. А значит, все большее значение приобретает культура численного моделирования и уровень суперкомпьютерного программно-аппаратного обеспечения.

## **Дополнительные возможности повышения эффективности работы вычислительной суперкомпьютерной инфраструктуры**

Использование вычислительной суперкомпьютерной инфраструктуры в составе комплекса решений цифрового производства далеко не всегда означает, что задачи численного моделирования будут решаться компетентными специалистами и максимально эффективно. Попробуем выделить ряд типичных проблем в этой области и предложить возможные способы их решения.

Эффективность работы суперкомпьютерной вычислительной инфраструктуры в составе интегрированного комплекса решений цифрового производства определяется не только наличием в составе комплекса необходимой суперкомпьютерной программно-аппаратной части, интегрированной со смежными решениями в составе комплекса. Немаловажное значение имеет уровень совместимости применяемых программных расчетных пакетов и аппаратного суперкомпьютерного обеспечения. Эффективность управления обозначенной совместимостью во многом определяется качеством используемых инструментов и методов оптимизации массивно-параллельных прикладных расчетов и программно-аппаратных вычислительных устройств, а также возможностями специализированных инструментов управления совместимостью программной и аппаратной частей. Используемые в настоящее время суперкомпьютерные программно-аппаратные комплексы с предустановленными прикладными пакетами инженерного анализа зачастую не обладают гибкими возможностями в части настройки и ограничиваются управлением только рядом универсальных параметров.

Образно говоря, специалисты расчетных подразделений получают в свое распоряжение качественный и функциональный “автомобиль”, не обладающий доста-

точными возможностями гибкой адаптации его использования: кресла не регулируются, подвеска не адаптирована под условия эксплуатации и т.д. То есть, вроде бы все на месте, ездить можно, но езда получается не совсем удобная и практичная, а инструментов регулировки не хватает, и оптимально настроить автомобиль не получается.

Такой подход нередко приводит к значительному снижению производительности вычислительного комплекса в ходе решения отдельных частных расчетных задач. В подобных ситуациях падение производительности используемого программно-аппаратного комплекса может достигать 30%, что при значительно масштабируемых задачах может вести к ощутимым перерасходам, связанным с энергопотреблением, одновременной загрузкой вычислительных ресурсов, увеличенным временем расчетов, и в результате – к повышению трудоемкости решения вычислительных задач для конечных пользователей – сотрудников инженерных расчетных подразделений. Наличие и использование инструментов тонкой настройки аппаратных средств, операционной системы и прикладного программного обеспечения могут существенно повысить эффективность использования масштабных вычислительных ресурсов.

Существует и еще один “подводный камень”, зачастую существенно влияющий на эффективность работы суперкомпьютерной вычислительной инфраструктуры.

Нередко основой формирования требований к аппаратной части суперкомпьютерного вычислительного комплекса, а также к его подбору и настройке являются требования, связанные с используемым программным обеспечением. Другими словами, аппаратная часть вычислительного комплекса формируется под выбранное программное обеспечение. Однако в целом гораздо большее внимание следует уделять особенностям применяемых математических моделей, а также способам их реализации.

Если опять же говорить языком аналогий, специалистам расчетных подразделений необходим автомобиль с дизельным двигателем для езды по бездорожью. Основным требованием является возможность ездить в условиях пересеченной местности. Но в реальности при выборе и приобретении автомобиля на первое место выходит наличие дизеля (или конкретного расчетного программного обеспечения), а будет ли дизельный автомобиль внедорожником, выясняется зачастую уже только после его поставки и начала эксплуатации. Конечно, и на дизельном седане как-то по бездорожью перемещаться можно, другой вопрос, какова эффективность такой его эксплуатации.

Функциональность целого ряда прикладных расчетных коммерческих продуктов позволяет частично модифицировать математические модели, а собственные разработки обеспечивают доступ к информации об особенностях их полноценной программной реализации. За счет наличия подобной функциональности появляется возможность предлагать конечному пользователю обоснованную конфигурацию программно-аппаратных суперкомпьютерных вычислительных средств для решения его конкретных расчетных задач, в том числе возни-

кающих в контексте реализации принципов цифрового производства.

Использование такого подхода позволяет: повысить эффективность, снизить ресурсоемкость, повысить сложность решаемых задач, а также зачастую приводит к снижению стоимости самого вычислительного программно-аппаратного комплекса.

## Выводы

Возможность выпуска сложных наукоемких изделий, обладающих конкурентными для рынка технико-экономическими характеристиками во многом определяется уровнем развития методов, инструментов и технологий, используемых при разработке и производстве изделий.

Внедрение и использование методов, инструментов и технологий цифрового производства является значительным рычагом, способствующим переходу кооперации разработчиков и производителей продукции на качественно иной уровень работы.

Наряду с совершенствованием принципов работы на основе традиционных производственных подходов следует активно развивать область применения инновационных аддитивных производственных подходов, способных выступать в качестве дополнения, а в некоторых случаях и замещения методов, принципов и технологий традиционного производства.

Осуществление производственной деятельности в соответствии с аддитивными и синтезированными аддитивно-традиционными принципами практически невозможно без использования комплекса интегрированных решений цифрового производства. Совершенствование традиционных и аддитивных производственных методов, инструментов и технологий, а также их активное применение предполагает необходимость решения широкого спектра сложных задач численного моделирования.

Безальтернативным инструментом решения сложных задач численного моделирования является суперкомпьютерный вычислительный программно-аппаратный комплекс, по своим характеристикам соответствующий уровню решаемых задач.

Наличие суперкомпьютерного вычислительного программно-аппаратного комплекса в составе решений цифрового производства является необходимым, но не всегда достаточным условием обеспечения максимально эффективного решения задач численного моделирования. Еще на этапе построения необходимо уделять должное внимание корректному выбору конфигурации вычислительного комплекса, возможности которого будут не только позволять использовать необходимое программное обеспечение, но и максимально соответствовать спектру конкретных специфических задач численного моделирования, возникающих у его пользователей. Кроме того, при выборе комплекса крайне желательно предусмотреть наличие тонких настроек для возможности гибкого управления совместимостью применяемых программных расчетных пакетов и аппаратного суперкомпьютерного обеспечения.

Сергей Сережин, компания “Т-Платформы”