



КОМПЬЮТЕРНАЯ МЕХАНИКА

УДК 004.9

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.

генеральный директор¹

E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

А.В. ШМЕЛЕВ, канд. техн. наук, доц.

директор Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

E-mail: shmeliiov.alexiei@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 08.11.2016.

ЦИФРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО: ОСНОВЫ И ТЕНДЕНЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Сделан информационно-аналитический обзор основ и тенденций формирования цифрового производства. Приведены варианты определения термину цифровое производство. Выделены и описаны такие глобальные технологические концепции формирования цифрового производства как аддитивные технологии (производство), промышленный интернет вещей, «большие данные» и облачные вычисления. Обозначены экономические показатели развития данных технологий. В качестве наиболее значимых основ цифрового производства выделены такие технологии компьютерного инжиниринга как компьютерное конструирование и инженерный анализ, непосредственно отвечающие за выполнение НИОКР.

Ключевые слова: цифровое производство, аддитивные технологии, аддитивное производство, промышленный интернет вещей, большие данные, облачные вычисления, компьютерный инжиниринг, CAD, CAE, PLM

Введение. Одной из важных прикладных задач науки механики, безусловно, является обеспечение эффективного и инновационного пути развития производства. Учитывая современные тенденции изменения производственных процессов, характеризующиеся активным применением цифровых технологий и их всесторонней интеграцией уже практически во все производственные цепочки, актуальным является анализ основных направлений развития цифровых технологий для однозначного определения ключевых наборов компетенций, в том числе из области механики, обеспечивающих наиболее эффективные и устойчивые пути развития предприятий машиностроительной отрасли.

Особенности развития современной мировой экономики, проявляющиеся в периодических кризисных явлениях и, как следствие, обострении конкурентной борьбы, как на местных, так и мировых рынках реализации продукции, застав-

ляют производителей вести активный поиск резервов и путей повышения эффективности всех бизнес-процессов. При этом традиционные подходы практически исчерпали возможности роста и не позволяют достичь существенных результатов. Поэтому одним из наиболее перспективных путей решения данной проблемы является переход к так называемым цифровым технологиям производства или же — цифровому производству (Digital Manufacturing).

Для начала посмотрим, какие определения цифрового производства сформировались на сегодняшний день. Наиболее динамично развивающейся и применяющей современные технологии и подходы промышленного производства отраслью является автомобилестроение. В ходе форума автопроизводителей, проходившем в июне 2015 года в Детройте (США) [1], среди наиболее обсуждаемых тем было и цифровое

производство. В процессе дискуссий участники дали следующее определение термину цифрового производства: *ряд процессов, способных охватить весь производственный и жизненный цикл, начиная с самых ранних работ по разработке дизайна продукта с использованием виртуального моделирования, прототипирования и моделирования, включая процессы автоматизированного производства и сборки, а также эксплуатации.*

Джефф Холл (Jeff Hall), ведущий менеджер фирмы Сименс (Siemens) по взаимодействию с автокомпанией Форд (Ford), в ходе данного мероприятия дал следующее определение [1]: *цифровое производство означает использование новых технологий, таких как анализ данных, облачные сервисы и Интернет вещей, с целью объединения виртуального и реального мира. Все это позволяет предприятиям повысить производительность по всей цепочке создания стоимости, от проектирования и производства до сбыта и эксплуатации. В конкретном плане это означает более быстрое время выхода на рынок, большую гибкость и повышенную доступность управления системами конкретного производства.*

Более ранние отечественные работы описывают цифровое производство как концепцию технологической подготовки производства в единой виртуальной среде с помощью инструментов планирования, проверки и моделирования производственных процессов [2].

Согласно ряду других источников цифровое производство это:

- результат воплощения стратегии управления жизненным циклом (Product Lifecycle Management, PLM) изделия, позволяющий в разы снизить время и стоимость разработки и вывода на рынок новых продуктов [3];
- способ предоставить инженерам компании средства для планирования, разработки, численного моделирования и передачи технологических процессов, реализованные в виде комплекта программ для поддержки конструкторско-технологической подготовки производства [4];
- интегрированная среда PLM решений, направленных на моделирование производственных процессов, на основе возможностей трехмерной визуализации, аналитики и различных инструментов взаимодействия с целью создания продукции и производственного процесса одновременно [5].

Обобщая приведенные определения, можно дать следующую формулировку термину: *цифровое производство — это способ организации эффективного производства на основе комплексного применения высокоинтегрированных компьютерных технологий автоматизации, моделирования и обработки информации на всех стадиях планирования, разработки, изготовления, обеспечения качества, эксплуатации и вплоть до утилизации, т. е. на всем жизненном*

цикле изделия. Ключевыми особенностями такого вида производства является всесторонний обмен информацией между всеми стадиями процесса организованный исключительно в цифровом виде. Основным преимуществом цифрового производства является минимизация материальных издержек и времени выхода на рынок новой, индивидуализированной (персоно-ориентированной) продукции.

В данном обзоре процесс формирования цифрового производства представлен состоящим из двух частей: 1 — глобальные технологии и направления формирования цифрового производства, т. е. то, что начинает делаться и должно быть сделано в ближайшей и отдаленной перспективе; 2 — процессы и технологии, лежащие в основе создания цифрового производства, т. е. то, что уже сделано и активно делается сейчас.

Глобальные технологии и направления формирования цифрового производства. В ходе анализа [6–22] в качестве наиболее значимых для машиностроения нами были выделены следующие глобальные технологии и направления формирования цифрового производства:

- аддитивные технологии (производство);
- промышленный интернет вещей;
- «большие данные»;
- облачные вычисления.

Дадим краткие определения и описания названных технологий и направлений.

Аддитивные технологии (производство) — процесс объединения материала с целью создания изделия на основе данных 3D-модели, как правило, слой за слоем [6].

Данная технология включает развитие следующих новых направлений:

- непосредственно технологии изготовления изделий;
- оборудование;
- материалы;
- методы проектирования;
- алгоритмы и программное обеспечение.

В контексте общего процесса формирования цифрового производства аддитивные технологии представляют собой совокупность новых технологий и средств производства, позволяющих в кратчайшее время изготавливать уникальные изделия, что, безусловно, является основным преимуществом данной технологии. При этом можно выделить следующие основные отличительные особенности аддитивных технологий:

- исходная информация для изготовления изделия — 3D-модель;
- изготовление путем последовательного добавления материала;
- возможность изготовления изделия любой геометрии;
- отсутствие или минимальная необходимость специальной технологической проработки.

Примеры изготовленных промышленным способом с применением аддитивных технологий деталей и конструкций приведены на рисунке 1.

Приведем некоторые экономические показатели развития аддитивных технологий.

По прогнозам аналитической компании Велерс (Wohlers) с 2015 по 2019 год объем аддитивного производства в мире может вырасти с 4,25 до 8 млрд долл. США, т. е. практически вдвое [9].

Сопоставление объемов продаж 3D принтеров показывает: «в 2013 году было продано немногим меньше 100 тыс. штук. В 2014 было поставлено 133 тыс. принтеров (+33 % к показателю 2013-го), в 2015 году почти 218 тыс. Т. е. за три года рост продаж свыше 100 %» [10].

Согласно прогнозам компании Контекст (Context), рынок 3D-принтеров в период 2016–2020 годы увеличится с 1,8 до 6,4 млрд долл. США, т. е. в среднем на 30–40 % ежегодно [11].

Промышленный интернет вещей. Промышленный интернет вещей, как ясно из термина, является промышленным приложением уже традиционного понятия интернета вещей, который можно определить как: концепцию вычислительной сети физических объектов («вещей»), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой [12]. При этом взаимодействие будет происходить как с участием человека, так и без такового.

Преимущества, которые дает промышленный интернет вещей, заключаются в возможности



а



б

Рисунок 1 — Детали и конструкции, изготовленные методом 3D-печати: а — кронштейн крепления узла самолета A350 Airbus [7]; б — мотоцикл компании APWORKS (Airbus Group) [8]

оптимизации всех производственных процессов, повышении производительности труда, снижении целого комплекса издержек за счет автоматизации таких функций как мониторинг и контроль, а также наделяния машин и систем широкими возможностями автономной работы. «Умные вещи (машины, оборудование и т. п.)», взаимодействуя между собой, изучают, анализируют текущие производственные показатели и данные и таким образом могут прогнозировать их развитие. На основании чего может осуществляться оптимизация бизнес и производственных процессов.

Некоторые экономические показатели развития технологии промышленного интернета вещей.

Согласно прогнозам компании Дженерал Электрик (General Electric), мировой ВВП к 2030 году благодаря развитию технологий промышленного интернета вещей, может увеличиться на 15,3 трлн долл. США, т. е. на 16,5 % [13]. Эти данные, а также информация по отдельным регионам приведены на рисунке 2.

По прогнозам консалтинговой компании Гартнер (Gartner) уже к 2020 году порядка 250 млн машин будут соединены с интернетом [14], а по оценкам агентства ПрайсВотерхусКупер (PriceWaterhouseCooper) рынок «подключенных» автомобилей к этому году составит около 149 млрд долл. США [15].

«Большие данные». Большие объемы данных или как уже сложился термин — «большие данные» сегодня определяются как совокупность наборов данных настолько больших объемов и сложной структуры, что они не поддаются анализу с помощью методов традиционной обработки данных [16]. Таким образом, обработка, структурирование, систематизация и анализ больших массивов принципиально отличающейся информации формирует одно из актуальных и передовых направлений развития цифрового производства — аналитики «больших данных».

Производители и ранее, и сегодня критически анализировали и анализируют всю доступную информацию о своей продукции. Например, проводят оценку отказов, эксплуатационных, гарантийных, проектных данных и т. п., чтобы понять и выделить ключевые сочетания данных,

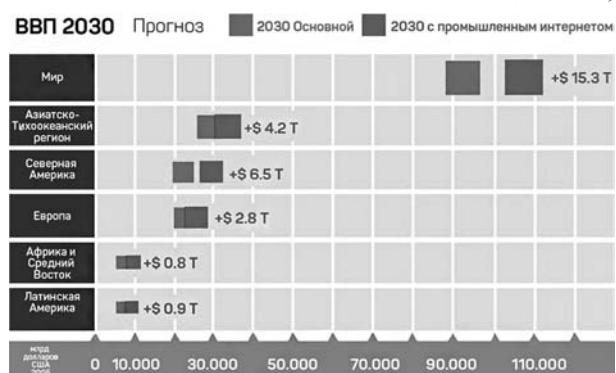


Рисунок 2 — Тенденции развития промышленного интернета вещей [13]

которые могут быть использованы при разработке и изготовлении более эффективного и ожидаемого на рынке продукта. В случае, когда связь между изделием и изготовителем, а также просто между изделиями будет на протяжении длительного времени осуществляться посредством интернета вещей, становится экономически эффективным и целесообразным сбор и обработка всей полезной информации. Эти данные обрабатываются и анализируются с использованием специальных алгоритмов, позволяющих оценить работоспособность изделия, выделить данные о производительности, инициировать обновление продукта и т. п. Очевидно, такая взаимосвязь позволяет создавать новые услуги, более детальное изучение клиентов на потребительских и промышленных рынках. Таким образом, процессы обработки «больших данных» начинают оказывать значительное влияние на разработку продукции со всех сторон, начиная с самого начала — при сборе требований из социальных сетей, используемых потребителем, а также непосредственно из отзывов покупателей или даже напрямую от самих изделий.

Значимость развития технологий «больших данных» ярко продемонстрируют следующие цифры. Общий объем цифровой информации, созданный человечеством в 2006 году, составил 0,16 зеттабайт, в 2012 создано — 2,8 зеттабайт, а в 2020 году ожидается, что созданный за год объем цифровой информации достигнет 40 зеттабайт, т. е. за 15 лет объем ежегодно создаваемых данных увеличится в 250 раз [17]. Это, безусловно, требует качественного изменения всех технологий и средств обращения с информацией.

На рисунке 3 образно проиллюстрирован тот объем данных, который сейчас доступен традиционному производству и объем полезных данных, который может быть получен и использован для оптимизации бизнес-процессов благодаря развитию цифровых технологий, например, промышленному интернету вещей.

Таким образом, основные преимущества данной технологии заключаются в обеспечении производства необходимым объемом достоверной информации для принятия эффективных решений и, соответственно, возможности оптимизации всех стадий жизненного цикла продукта. Начиная от формирования его концепции, определения конкретных характеристик, уточнения производственных и технологических процессов, формирования системы сбыта, технической поддержки и заканчивая утилизацией.

Кратко об экономических показателях развития технологии «больших данных».

Наибольшее получение прибыли от внедрения технологий «больших данных» к 2019 году прогнозируется для дискретных производств, к которым относится классическое машиностроение, — 22,8 млрд долл. США; для банковской сферы — 22,1



Рисунок 3 — «Большие данные»

млрд долл. США и для процессных производств (к которым относятся фармацевтические, химические, ресурсодобывающие предприятия) — 16,4 млрд долл. США [18].

Ожидается, что мировой рынок технологий «больших данных» вырастет с 18,3 млрд долл. США в 2014 году до 92,2 млрд долл. США к 2026 году, со средним ежегодным темпом роста в 14,4 % [19]. На рисунке 4 приведены тенденции роста рынка по направлениям: аппаратное, программное обеспечение и услуги. При этом наибольший темп роста, в среднем 20 % в год, прогнозируется для рынка программного обеспечения.

Облачные вычисления — информационно-технологическая концепция, заключающаяся в обеспечении повсеместного и удобного сетевого доступа по требованию к общему набору конфигурируемых вычислительных ресурсов (например, сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам — как вместе, так и по отдельности), которые могут быть оперативно предоставлены и освобождены с минимальными эксплуатационными затратами или обращениями к провайдеру [20]. Таким образом, облачные технологии — это технологии и решения по предоставлению различного рода услуг, среди которых можно отметить:

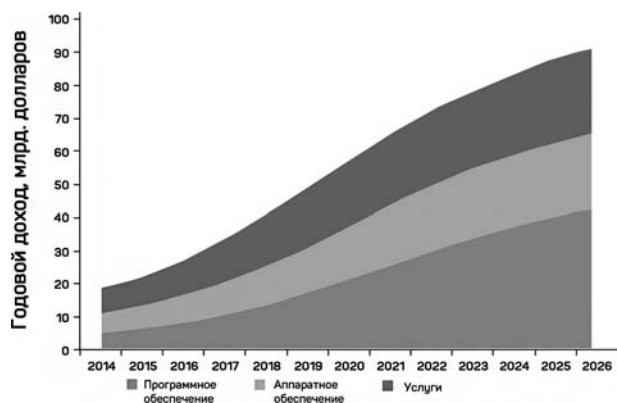


Рисунок 4 — Тенденции развития мирового рынка технологий «больших данных» [19]

- программное обеспечение как услуга;
- аппаратное обеспечение как услуга;
- данные как услуга;
- безопасность как сервис и т. п.

Облачные вычисления возможны благодаря развитию:

- интернета, в первую очередь росту его пропускной способности;
- технологий многоядерных процессоров;
- технологий виртуализации;
- технологии многопоточного программирования;
- увеличению емкостей носителей информации.

К основным преимуществам облачных вычислений можно отнести [21]:

- доступность — облака доступны всем, из любой точки, где есть Интернет, с любого устройства, где есть браузер;
- относительно низкую стоимость — оплата фактического использования ресурсов, исключение расходов на закупку дорогостоящего оборудования, программного обеспечения и т. п.
- гибкость, которая заключается в условной неограниченности вычислительных ресурсов;
- надежность, достигаемую благодаря тому, что в дата-центрах расположения основных ресурсов облаков, обеспечивается: наличие резервных источников питания, охрана, профессиональное обслуживание, регулярное резервирование данных, высокая пропускную способность интернет канала.

Развитие концепции облачных вычислений характеризуется следующими экономическими показателями. Аналитическая компания Форестер Ресеч (Forrester Research) прогнозирует, что с 2011 по 2020 год объем мирового рынка облачных вычислений вырастет в шесть раз — с 40,7 до более 241 млрд долл. США. При этом среднегодовой прирост на рынке облачных вычислений и услуг составит более 20 % (рисунок 5)[22].

Сейчас были озвучены глобальные направления развития технологий высокого уровня, позволяющих существенно повысить эффективность производственных процессов. Нетрудно заметить, что из выделенных нами направлений только одно — аддитивные технологии непосредственно связано с изготовлением продукции. Остальные же относятся к информационным



Рисунок 5 — Тенденции развития мирового рынка технологий облачных вычислений [22]

технологиям передачи, хранения, обработки, анализа, защиты и т. п. информации.

Теперь перейдем ко второй части обзора. Какими же конкретными базовыми компетенциями и технологиями должны обладать современные предприятия для успешного формирования основ цифрового производства?

Основы цифрового производства. Средства реализации подходов (методов) цифрового производства базируются на развитии имеющихся компьютерных технологий. Таким образом, цифровое производство в наиболее общем виде базируется на двух основных составляющих: аппаратной и программной (информационной).

Аппаратную составляющую, в свою очередь, можно условно разделить на две части: производственное оборудование, непосредственно используемое в технологических процессах изготовления продукции (станки, обрабатывающие центры, промышленные роботы, автоматические линии, 3D-принтеры и т. п.), и всю компьютерную и орг-технику (электронно-вычислительные машины, средства связи, обработки информации и т. п.), обеспечивающую непосредственное функционирование программной составляющей, а также ее взаимодействие с производственным оборудованием.

Программная составляющая включает комплекс программного обеспечения реализующего алгоритмы формирования и управления всеми информационными потоками и процессами производства, а также процессами, создания, передачи и хранения создаваемой информации и т. п.

Конечно же, важное значение имеют обе составляющие средств реализации цифрового производства, так как наличие и свойства каждой из них является необходимым условием эффективного функционирования всей системы. Однако, наиболее активное развитие, как это будет показано ниже, на данный момент имеет именно программная. Это обусловлено, прежде всего тем, что из всех отраслей экономики именно производство характеризуется наибольшими объемами создаваемой информации [23].

Данные исследований широко известной консалтинговой компании Маккинзи (McKinsey) показывают, что порядка 80 % стоимости продукта формируется именно на стадии его разработки [24]. В связи с чем, ведущие мировые компании вкладывают в НИОКР до 30 % своей выручки [25].

Анализ компании Делойт (Deloitte) [26] процессов формирования цифрового производства в рамках инициативы Промышленность 4.0 (Industrie 4.0), созданной немецким правительством для ускорения формирования в Германии новых цифровых производств, показали, что именно технологии связанные с выполнением НИОКР претерпят значительные изменения и окажут наибольший вклад в формирование производства будущего.

Как нам известно, за разработку и производство продукции на основе интегрированных решений систем автоматизации отвечают PLM-технологии управления жизненным циклом изделия. В рамках концепции PLM основные функции выполнения НИОКР определены за CAD/CAE-системами. CAD-система отвечает за конструирование или же, как часто говорят, 3D-моделирование, а CAE — за расчеты и инженерный анализ.

Комплекс CAD/CAE, а также других компьютерных средств и технологий для работы с цифровой информацией о разрабатываемом и производимом изделии, сегодня также называют технологиями компьютерного инжиниринга [25].

На сегодняшний день именно CAD-системы являются наиболее сформировавшимися. CAE-системы сейчас находятся в фазе активного развития [8].

Учитывая особую важность и трудоемкость стадии НИОКР, приведем сложившиеся на сегодня компоненты CAE-системы, отвечающей за это направление. Базовыми компонентами CAE-системы в традиционном машиностроении сегодня являются технологии и средства:

- FEA (Final Element Analysis — конечно-элементный анализ; КЭ анализ) — расчеты и исследования в области механики деформируемого твердого тела, теплообмена, газо- и гидродинамики, электродинамики;
- CFD (Computational Fluid Dynamics — вычислительная гидродинамика) — расчеты и исследования в области газо и гидродинамики;
- MBD (MultiBody Dynamics — динамика многокомпонентных систем) — решают задачи механики многокомпонентных систем;
- SE (Systems Engineering — разработка систем) — моделирование, исследование и оптимизация различного рода систем (алгоритмов и законов управления ими) от простейших до многоуровневых, сочетающих компоненты их различных физических областей, включая системы управления.

Приведенные базовые системы активно развиваются и интегрируются между собой, дополняются системами анализа результатов и т. п. Примерами активно развивающихся направлений являются:

- расчеты показателей напряженно-деформированного состояния;
- оценка работоспособности по критериям усталости, износа, устойчивости и т.п.;
- гидрогазодинамика;
- многокритериальная, параметрическая, топологическая оптимизация;
- математические вычисления, анализ и обработка сигналов;
- моделирование быстропротекающих динамических процессов (краш-тесты);
- акустика и виброакустика;
- оценка надежности систем;
- электронные библиотеки материалов и др.

Также формируются технологии и средства направленные на решения узкоспециализированных задач:

- моделирование технологических процессов;
- моделирование двигателя внутреннего сгорания;
- исследование трансмиссий и их компонентов и др.

Проявление интеграции CAD/CAE-систем, мы видим, в наличии у крупных CAD-систем встроенных CAE-модулей, так и с другой стороны — наличие у тяжелых CAE-систем встроенных CAD-модулей. В последнее время с целью обеспечения потребителя наиболее полным комплексом инструментов инженерной разработки идет еще большая интеграция тяжелых CAD/CAE-систем. Примером этого процесса может служить поглощение в 2014 году компанией ЭНСИС (ANSYS Inc (США)), ведущим мировым разработчиком CAE-систем для моделирования и инженерного анализа, компании СпэйсКлэйм Корпорэйшн (SpaceClaim Corporation (США)), выпускающей программное обеспечение СпэйсКлэйм (SpaceClaim), лидирующего в области реализации технологий прямого геометрического моделирования [27]. Другим примером активизации интеграции CAD/CAE-систем может служить приобретение в 2012 году подразделением Индустри Аутомэйшн (Industry Automation) концерна Сименс АГ (Siemens AG (США)), являющимся одним из крупнейших разработчиков PLM-систем и наиболее известным своей CAD-системой Сименс ЭНИкс (SIEMENS NX), компании ЛМС Интернэшнл (LMS International (Бельгия)), занимающей, по оценкам аналитиков, пятое место рынка CAE [28].

По данным Симдата (CIMdata) [29] технологии компьютерного моделирования являются на сегодня одной из наиболее быстро растущих компонент PLM. При этом формирование комплексных PLM-решений, в том числе в области инженерного анализа, все еще продолжается. Подтверждением этому служит заключение Симдата (CIMdata) [30], что в краткосрочной и среднесрочной перспективе ни один поставщик программного обеспечения PLM не будет в состоянии обеспечить все необходимые для предприятия функциональные инновационные возможности. Таким образом, поставщики платформ моделирования должны иметь открытую стратегию партнерства с используемыми PLM-системами и средствами инженерных расчетов и моделирования.

О распространении и значимости именно средств компьютерного моделирования и инженерного анализа свидетельствуют данные опроса Российских компаний, использующих инженерное программное обеспечение [25]. Как видим из рисунка 6, потребление программных средств группы CAD/CAE составляет 57 % от общего объема потребления респондентов. При этом расчеты по исследованию прочности, тепловых

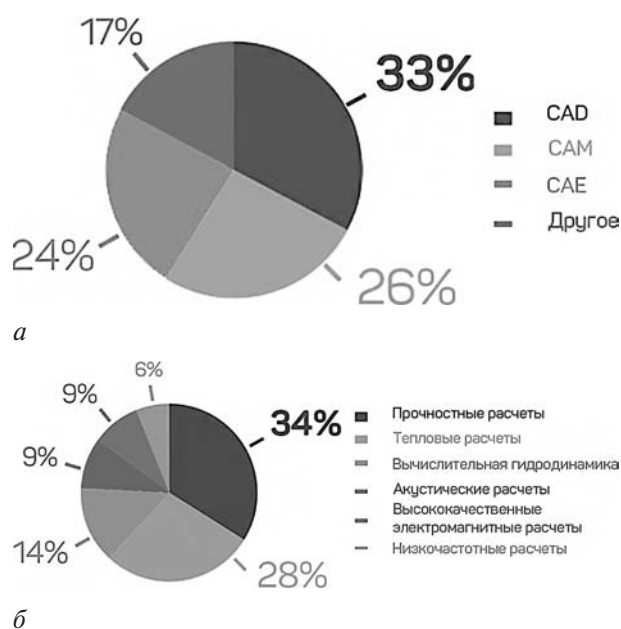


Рисунок 6 — Данные по применению инженерного программного обеспечения Российскими предприятиями [25]: а — типы используемых программ; б — типы расчетов (САЕ), по доле опрошенных организаций, %

процессов и гидрогазодинамики являются основным типом решаемых инженерных задач. Их доля составляет 76 %.

Особый интерес также представляют оценки эффективности применения программного обеспечения компьютерного инжиниринга. Данные работы [25] показывают сокращение:

- цикла разработки от 14 до 30 %;
- стоимости разработки 11–23 %;
- времени внедрения инженерных решений 9–18 %.

Меньшие значения характеризуют средний уровень владения технологиями компьютерного инжиниринга, наибольшие соответствуют технологическим лидерам. Что же говорят эти цифры? Во-первых, что даже средний уровень владения технологиями позволяет существенно оптимизировать производственные процессы. Во-вторых, возможность двукратного превышения средних показателей при наличии высококвалифицированных специалистов, что, безусловно, должно отражаться на программах подготовки инженерных кадров, готовящихся для предприятий.

Заключение. Нами рассмотрены глобальные технологические направления формирования концепции цифрового производства. В качестве наиболее значимых выделены такие технологические концепции как:

- аддитивные технологии (производство);
- промышленный интернет вещей;
- «большие данные»;
- облачные вычисления.

Как уже было отмечено, из представленных направлений только одно, аддитивные технологии, непосредственно связано с изготовлением продукции. Остальные же относятся к инфор-

мационным технологиям передачи, хранения, обработки, анализа, защиты и т. п. информации. В совокупности эти информационные технологии представляют, по сути, новые бизнес-подходы, дающие широкие возможности оптимизации и управления всеми стадиями жизненного цикла продукта. Начиная от формирования его концепции, определения конкретных характеристик, уточнения производственных и технологических процессов, формирования системы сбыта, технической поддержки и заканчивая утилизацией. Поэтому отечественной промышленности уже сегодня необходимо определять наиболее эффективные планы и мероприятия по реализации и внедрению данных технологий.

С другой стороны, формирование названных концептуальных технологий невозможно без наличия на предприятиях действующих базовых средств и подходов для работы и управления цифровой информацией о разрабатываемом продукте, процессах его изготовления, эксплуатации и т. п., т. е. наличия функционирующей PLM-системы. Как показано в ходе обзора, наиболее значимыми и активно развивающимися элементами PLM сегодня являются CAD/CAE-системы, отвечающие за выполнение НИОКР.

Ярким подтверждением значимости развития на предприятиях технологий компьютерного инжиниринга являются возможности оптимизации отдельных стадий производственных процессов до 30 %.

И в заключение, результаты исследований компании ЭНСИС (ANSYS), одного из лидеров рынка инженерного программного обеспечения. Данные, получены в ходе анализа передовых компаний-пользователей программного обеспечения данной компании, показывают:

- в 2005 году 1 из 22 (5 %) инженеров-разработчиков использовал расчеты и инженерный анализ;
- в 2015 году это соотношение составляет 1 из 6 (17 %);
- прогнозируется, что в 2020 году все инженеры-разработчики будут использовать компьютерное моделирование и анализ при разработке продукции.

Список литературы

1. Beyond the Hype — Additive Manufacturing and 3D Printing Worldwide, A Summary of Terry Wholers' Thoughts [Electronic resource]. — August 18, 2015. — Mode of access: <http://www.totallyintegratedautomation.com/2015/08/digital-manufacturing/>. — Date of access: 18.10.2016.
2. Голдовский, А. Цифровое производство — ключ к успеху / Антон Голдовский // Автоматизация проектирования. — 2009. — № 4. — С. 54–56.
3. Гапотченко, Д. Промышленность в «цифре» / Дмитрий Гапотченко // Открытые системы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.osp.ru/news/articles/2013/15/13035026/> — Дата доступа: 18.10.2016.
4. Баккер, М. Цифровые технологии улучшают принципы бережливого производства / Мирко Баккер // САПР и графика. — 2012. — № 7. — С. 42–43.
5. Digital Manufacturing (DM) [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.ideal.fi/en/products/manufacturing-process-management/>. — Date of access: 18.10.2016.

6. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies: ASTM F2792-12a. — Mode of access: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/WITHDRAWN/F2792.htm>. — Date of access: 18.10.2016.
7. Beyond the Hype — Additive Manufacturing and 3D Printing Worldwide, A Summary of Terry Wholers' Thoughts. — Mode of access: <http://www.padtinc.com/blog/news/page/3>. — Date of access: 18.10.2016.
8. Light Rider. World's first 3D printed motorcycle. — Mode of access: <http://www.lightrider.apworks.de/#!len/dkqv3>. — Date of access: 18.10.2016.
9. Ермак, С. Напечатай мне 3D-барашка / С. Ермак // Интернет-журнал «Эксперт Урал». — 2014. — № 7. — С. 588. — Режим доступа: <http://expert.ru/ural/2014/07/napechataj-mne-3d-barashka/>. — Дата доступа: 18.10.2016.
10. Токарев, Б.Е. Анализ технологий рынка 3D печати: два года спустя / Б.Е. Токарев, Р.Б. Токарев // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». — 2016. — Т. 8, № 1. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/28EVN116.pdf>. — Дата доступа: 18.10.2016.
11. Блинкова, О. Context: 3D-принтеры по металлу внедряются в промышленное производство / О. Блинкова. — Режим доступа: <http://www.it-weekly.ru/it-news/it/100843.html>. — Дата доступа: 18.10.2016.
12. Интернет вещей // Сайт ru.wikipedia.org [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9. — Дата доступа: 18.10.2016.
13. Peter C. Evans Pushing the Boundaries of Minds and Machines / Peter C. Evans and Marco Annunziata // Annunziata Industrial Internet [Electronic resource]. — 2012. — November 26. — С. 37. — Mode of access: https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf. — Date of access: 18.10.2016.
14. Gartner Says By 2020, a Quarter Billion Connected Vehicles Will Enable New In-Vehicle Services and Automated Driving Capabilities: Press Release. — 2015, January 26. — Mode of access: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2970017>. — Date of access: 18.10.2016.
15. Klein, G. Where is the market potential for 'connected transport'? / Grant Klein. — Mode of access: <http://pwcmeatrends.co.uk/mylifeconnected/transport.html>. — Date of access: 18.10.2016.
16. Big data // en.wikipedia.org. — Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Big_data. — Date of access: 18.10.2016.
17. Data Growth, Business Opportunities, and the IT Imperatives: Executive Summary. — Mode of access: <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm>. — Date of access: 18.10.2016.
18. Louis Columbus, Roundup Of Analytics, Big Data & BI Forecasts And Market Estimates, 2016. — Mode of access: <http://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2016/08/20/roundup-of-analytics-big-data-bi-forecasts-and-market-estimates-2016/#188d221d49c5>. — Date of access: 18.10.2016.
19. Wheatley, M. Wikibon forecasts Big Data market to hit \$92.2B by 2026 / M. Wheatley. — Mar 30, 2016. — Mode of access: <http://siliconangle.com/blog/2016/03/30/wikibon-forecasts-big-data-market-to-hit-92-2bn-by-2026/>. — Date of access: 18.10.2016.
20. Облачные вычисления // ru.wikipedia.org. — Mode of access: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F. — Date of access: 18.10.2016.
21. Облачные вычисления, краткий обзор или статья для начальника. — Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/111274/>.
22. Облачные вычисления (мировой рынок). — Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F_%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_\(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA\)](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F_%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA)). — Дата доступа: 18.10.2016.
23. 10 Ways Analytics Are Accelerating Digital Manufacturing // Tech / Louis Columbus. — Sep 6, 2015. — Mode of access: <http://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2015/09/06/10-ways-analytics-are-accelerating-digital-manufacturing/#392fbc336ad4>. — Date of access: 18.10.2016.
24. Gold, S. The Power of Going Digital: Q&A With Siemens' Raj Batra / Stephen Gold. — Mode of access: <https://www.mapin.net/blog/2016/04/power-going-digital-qa-siemens-raj-batra>.
25. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий / науч. ред. К.В. Дорофеев, рук. группы В.Н. Княгинин. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — 110 с.
26. Industrie 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies // Deloitte. — P. 28. — Mode of access: <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>.
27. ANSYS acquires SpaceClaim // The SpaceClaim Blog. Marking the expansion of 3D modeling software to all engineers. — Thursday, May 01, 2014. — Mode of access: http://www.spaceclaim.com/en/blog/14-05-01/ANSYS_acquires_SpaceClaim.aspx.
28. Гореткина, Е. Siemens покупает LMS [Электронный ресурс] / Елена Гореткина. — Режим доступа: <https://www.pweek.ru/business/article/detail.php?ID=144266>.
29. Simulation & Analysis Governance. A Strategy to Advance the Value of S&A. — April 23, 2014. — Mode of access: <http://www.cimdata.com/en/news/item/1165-simulation-analysis-governance>.
30. ANSYS 17.0: An Innovation Platform to Achieve Simulation-Driven Product Development — CIMdata Commentary. — Tuesday, February 09, 2016. — Mode of access: <http://www.cimdata.com/en/news/item/5585-ansys-17-0-an-innovation-platform-to-achieve-simulation-driven-product-development-commentary>.

PODDUBKO Sergei N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
General Director¹
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

SHMELYEV Aleksey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
Director of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹
E-mail: shmeliiov.alexei@gmail.com

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 08 November 2016.

DIGITAL PRODUCTION: FUNDAMENTALS AND TRENDS DEVELOPMENT. INFORMATIONAL-ANALYTICAL REVIEW

An informational and analytical review of the fundamentals and trends development of digital production is made. The variants of terms of digital production are indicated. The global technological concepts of digital production development such as additive technologies (manufacturing), Industrial Internet of Things, “big data” and cloud computing are marked and described. The economic indicators of development of these technologies are represented. The computer engineering technologies of the most important fundamentals of digital production such as computer-aided design and engineering analysis, directly responsible for implementation of research and development, are distinguished.

Keywords: digital production, additive technologies, additive manufacturing, Industrial Internet of Things, big data, cloud computing, computing engineering, CAD, CAE, PLM

References

1. *Beyond the Hype – Additive Manufacturing and 3D Printing Worldwide, A Summary of Terry Wholers’ Thoughts*. Available at: <http://www.totallyintegratedautomation.com/2015/08/digital-manufacturing/> (accessed 18 October 2016).
2. Goldovskiy A. Cifrovoye proizvodstvo — ključ k uspehu [Digital production — the key to success]. *Avtomatizacija proektirovaniya* [Computer-Aided Design], 2009, no. 4, pp. 54–56.
3. Gapotchenko D. *Promyshlennost’ v «cifre»* [Industry in “digital”]. Available at: <http://www.osp.ru/news/articles/2013/15/13035026/> (accessed 18 October 2016).
4. Baeker M. Cifrovye tehnologii uluchshajut principy berezhlivogo proizvodstva [Digital technology improves the principles of lean manufacturing]. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2012, no. 7, pp. 42–43.
5. *Digital Manufacturing*. Available at: <http://www.ideal.fi/en/products/manufacturing-process-management/> (accessed 18 October 2016).
6. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies: ASTM F2792-12a*. Available at: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/WITHDRAWN/F2792.html/> (accessed 18 October 2016).
7. *Beyond the Hype – Additive Manufacturing and 3D Printing Worldwide, A Summary of Terry Wholers’ Thoughts*. Available at: <http://www.padtinc.com/blog/news/page/3/> (accessed 18 October 2016).
8. Light Rider. *World’s first 3D printed motorcycle*. Available at: <http://www.lightrider.apworks.de/#len/dkqv3/> (accessed 18 October 2016).
9. Ermak S. Napechataj mne 3D-barashka [Print me 3D-lamb]. *Jekspert Ural* [Expert Ural], 2014, no. 7. 588 p. Available at: <http://expert.ru/ural/2014/07/napechataj-mne-3d-barashka/> (accessed 18 October 2016).
10. Tokarev B.E., Tokarev R.B. Analiz tehnologij rynka 3D pechati: dva goda spustja [Analysis of the 3D printing technology market: two years later]. *Naukovedenie* [Science studies], 2016, vol. 8, no. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/28EVN116.pdf/> (accessed 18 October 2016).
11. Blinkova O. *3D-printery po metallu vnedrajajutsja v promyshlennoe proizvodstvo* [3D-printers for metal are implemented in industrial production]. Available at: <http://www.it-weekly.ru/it-news/it/100843.html/> (accessed 18 October 2016).
12. *Internet veshhej* [Internet of Things]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9/ (accessed 18 October 2016).
13. Peter C. Evans, Annunziata M. *Pushing the Boundaries of Minds and Machines*. Available at: https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf/ (accessed 18 October 2016).
14. *Gartner Says By 2020, a Quarter Billion Connected Vehicles Will Enable New In-Vehicle Services and Automated Driving Capabilities*. Available at: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2970017/> (accessed 18 October 2016).
15. Klein G. *Where is the market potential for ‘connected transport’?* Available at: <http://pwc-megatrends.co.uk/mylifecommunicated/transport.html/> (accessed 18 October 2016).
16. *Big data*. https://en.wikipedia.org/wiki/Big_data/ (accessed 18 October 2016).
17. *Data Growth, Business Opportunities, and the IT Imperatives: Executive Summary*. Available at: <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014view/executive-summary.html/> (accessed 18 October 2016).
18. Columbus L. *Roundup Of Analytics, Big Data & BI Forecasts And Market Estimates*. Available at: <http://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2016/08/20/roundup-of-analytics-big-data-bi-forecasts-and-market-estimates-2016/#188d221d49c5/> (accessed 18 October 2016).
19. Wheatley M. *Wikibon forecasts Big Data market to hit \$92.2B by 2026*. Available at: <http://siliconangle.com/blog/2016/03/30/wikibon-forecasts-big-data-market-to-hit-92-2bn-by-2026/> (accessed 18 October 2016).
20. *Oblachnye vychislenija* [Cloud computing]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F/ (accessed 18 October 2016).
21. *Oblachnye vychislenija, kratkij obzor ili stat’ja dlja nachal’nika* [Cloud computing, an overview or an article for a chief]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/111274/> (accessed 18 October 2016).
22. *Oblachnye vychislenija (mirovoy rynek)* [Cloud computing (world market)]. Available at: [http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%82%D1%8C%D1%8F_%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_\(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA\)/](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%82%D1%8C%D1%8F_%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA)/) (accessed 18 October 2016).
23. Columbus L. *10 Ways Analytics Are Accelerating Digital Manufacturing*. Available at: <http://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2015/09/06/10-ways-analytics-are-accelerating-digital-manufacturing/#392fbc336ad4/> (accessed 18 October 2016).
24. Gold S., Batra R. *The Power of Going Digital: Q&A With Siemens*. Available at: <https://www.mapi.net/blog/2016/04/power-going-digital-qa-siemens-raj-batra/> (accessed 18 October 2016).
25. Dorofeev K.V., Knyagin V.N. *Vysokotekhnologichnyj komp’juternyj inzhiniring: obzor ryнков i tehnologij* [High-tech computer engineering: a review of markets and technologies]. St. Petersburg, Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. 110 p.
26. *Industrie 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. Available at: <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf/> (accessed 18 October 2016).
27. ANSYS acquires SpaceClaim. The SpaceClaim Blog. Marking the expansion of 3D modeling software to all engineers, 2014. Available at: http://www.spaceclaim.com/en/blog/14-05-01/ANSYS_acquires_SpaceClaim.aspx/ (accessed 18 October 2016).
28. Goretkina E. *Siemens pokupaet LMS* [Siemens buys LMS]. Available at: <https://www.pcweek.ru/business/article/detail.php?ID=144266/> (accessed 18 October 2016).
29. *Simulation & Analysis Governance. A Strategy to Advance the Value of S&A*. Available at: <http://www.cimdata.com/en/news/item/1165-simulation-analysis-governance/> (accessed 18 October 2016).
30. ANSYS 17.0: An Innovation Platform to Achieve Simulation-Driven Product Development. *CIMdata Commentary*, 2016. Available at: <http://www.cimdata.com/en/news/item/5585-ansys-17-0-an-innovation-platform-to-achieve-simulation-driven-product-development-commentary/> (accessed 18 October 2016).