Опыт интеграции CAD-технологий и 3D-печати в учебном плане подготовки инженеров

В статье рассматриваются результаты использования технологий трехмерной печати (3D-печати) для обучения студентов основам компоновки космических аппаратов.

Целью методической работы являлось внедрение в учебный процесс технологий быстрого прототипирования для совершенствования навыков студентов по внутренней компоновке бортового оборудования КА.

Кроме основной цели дополнительно достигается и вторая цель – ознакомление студентов с основами САМ-технологий, что позволяет восполнить существующий в учебном плане пробел в образовании студентов в области основ информационной поддержки жизненного цикла изделий ракетно-космической техники.

В рамках учебного курса введены шесть практических занятий, на которых студенты, используя навыки, полученные при изучении соответствующего раздела дисциплины «Инженерная графика» выполняют компоновку КА с использованием пакета геометрического моделирования SolidWorks, а затем печатают на 3D-принтере прототипы элементов компоновки и собирают компоновочный макет. Для создания натурных макетов компоновки используется одна из наиболее доступных технологий быстрого прототипирования: экструзионная технология 3D-печати. Практическое изучение работы 3D принтера позволяет студентам в общих чертах ознакомиться с принципами программирования других станков с числовым программным управлением. Первый опыт интеграции в одном учебном курсе компьютерных технологий геометрического моделирования и трехмерной печати

показал, что работа с физическими макетами существенно повышает интерес студентов к изучаемому курсу.

Поскольку готовый материальный макет «не прощает» ошибок компоновки в отличие от виртуального макета, где интерференция компонентов может остаться незамеченной, работа над проектом потребовала от студентов большей вовлеченности и ответственности.

Коллективная работа над проектом оказалась полезным тренингом групповой работы по решению общей творческой задачи.

В ходе первых испытаний методики были уточнены возможности 3D-принтера и программы слайсера. Стало понятно, что цикл изготовления макета детали составляет в среднем 2–3 часа на один компонент включая 1–1,5 часа работы принтера. Установлено, что крупные блоки необходимо делать сборными (состоящими из корпуса и крышки) для экономии материала. Общий объем пластика, затраченного на проект, составляет примерно 1 кг. Также важной информацией является тот факт, что при покупке 3D-принтера для учебного процесса важнейшей характеристикой является не точность, а скорость печати.

Результаты тестирования методики были признаны успешными и в настоящее время ставится вопрос о приобретении дополнительно принтера с более высокой производительностью.

Ключевые слова: инженерное образование, CAD/CAM/CAE – технологии, геометрическое моделирование, 3D-печать, компетенции.

Vladimir V. Zelentsov, Georgy A. Shcheglov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

CAD and 3D-printing integration experience in the curriculum of engineers education

The paper examines the results of using the 3d-printing educational methodology for training the students in the spacecraft-configuration developing area.

The first purpose of the considered methodology practice is to implement the rapid-prototyping skills into the educational process, to provide perfection of the student knowledge in configuring the internal on-board equipment of the spacecraft. The second purpose – is to habituate the students to the main principles of the available CAM technologies, to fill the available educational gap in the area of information support of the spacecraft life-cycle.

The proposed curriculum includes six training exercises based on a special “Engineering drawing” course unit. The training exercises require using the SolidWorks geometric-simulation software. The preliminary obtained virtual prototypes of the spacecraft configuration elements are subjected to 3d-printing and assembled into a physical configuration model. The physical configuration models are obtained using one of the most accessible rapid-prototyping technologies – 3d-printing of extrusion type. Practicing in 3d-printing provides developing the student skills in managing all other digital-program control devices.

The specified first experience of integrating the computer geometric-simulation methodology and the 3d-printing practices in a single course unit has proved: developing the physical-configuration models heightens the student interest to the configuration training.

A ready-made physical model does not excuse the available configuration mistakes unlike a virtual model where the component interferences may remain undetected. So, developing a physical model requires additional endeavor and responsibility. Developing a project in a team has proved to be an effective means for solving a common creative problem.

The first test of the proposed methodology has shown the importance of perfect adjustment of the available 3d-printing process and the Slicer program. The part-model manufacture cycle requires approximately from 2 to 3 hours per a component (from 1 to 1.5 hours for 3d-printing in that account). Large-scale blocks shall represent an assembly (containing a block body and a lid) to reduce the printing-plastic consumption. Average printing-plastic consumption is about 1 kg per a configuration model. The obtained 3d-printing experience shows that the printing speed is much more important than the printing accuracy for the given educational problem.

The obtained educational-methodology test results are considered to be a success. It is recommended to purchase an additional high-productivity 3d-printer facility providing an effective fascinating spacecraft-configuration process.

Keywords: engineering education, CAD/CAM/CAE – technology, geometric modeling, 3D printing, competence.

Введение

Современные тенденции развития информационных технологий виртуальной разработки изделий требуют воспитания специалистов-инженеров, воспринимающих компьютеризованную среду разработки технических систем как естественную, и единственно возможную в современных условиях жесткой конкуренции. В связи с этим учебный план кафедры, которая ведет подготовку по направлениям проектирования производства и эксплуатации высокотехнологичных изделий, таких как ракеты и космические аппараты (КА), должен строиться на основе сквозного применения указанных технологий в виде системы информационной поддержки курсового и дипломного проектирования [1]. При таком подходе технологии компьютерного проектирования (CAD-технологии) и разработки (CAE-технологии) играют в процессе обучения ту роль, которая раньше отводилась машиностроительному черчению и основанном на нем графоаналитическим методам инженерных расчетов. CAD-компетенции работы с электронными геометрическими моделями (ЭГМ) должны постоянно использоваться в процессе «виртуальной разработки» изделий в учебных проектах. В соответствии с современными тенденциями развития компьютерных технологий значительное внимание должно уделяться освоению компетенций в области CAD-CAE интеграции и так называемых «виртуальных испытаний» изделий при помощи проведения серии вычислительных экспериментов.

Например, в настоящее время учебный процесс на кафедре, выпускающей специалистов в области проектирования аэрокосмических систем построен таким образом, чтобы максимально загрузить студента расчетно-графическими работами, основанными на применении CAD/CAE технологий. К сожалению, при изучении общинженерных проектных дисциплин – теории механизмов и машин, а также деталей машин, где студенты получают общую подготовку по

конструированию, геометрическое моделирование пока применяется отдельными студентами самостоятельно без систематической поддержки, поскольку специализированные кафедры ориентированы на традиционные «чертежные технологии».

Однако уже на 5-ом семестре студент выполняет на профилирующей кафедре курсовую работу по дисциплине «Основы устройства изделий ракетно-космической техники» – это два листа электронных чертежей (элементы конструкций фюзеляжа), которые выполняются с помощью технологий геометрического моделирования. На последующих 7, 8, 10, 11 семестрах изучаются две проектно-конструкторские дисциплины в рамках которых студенты используя ЭГМ выполняют все курсовые проекты и работы.

Первая конструкторско-проектная дисциплина «Проектирование аэрокосмических систем» имеет объем 12 з.е. По дисциплине выполняется два курсовых проекта и две курсовые работы в которых студенты проходят полный курс разработки КА от выбора проектных параметров до разработки компоновки, с выполнением прочностного и динамического расчета силовой конструкции. На 7-ом семестре в рамках данной дисциплины выполняется работа по компоновке КА. Во время работы студенты выполняют ЭГМ приборов бортового оборудования которые затем размещают внутри заданного объема отсека.

Вторая конструкторско-проектная дисциплина «Проектирование корпусов и агрегатов» объемом 5 з.е., освещает вопросы проектирования и конструирования элементов конструкции КА (корпус, панели солнечных батарей, механизмы и др.). Этот курс можно назвать деталями КА.

Конструкторско-проектные дисциплины поддерживаются комплексом дисциплин, описывающих теоретические методы, лежащие в основе CAE-программ виртуальной разработки: «Строительная механика» объемом 10 з.е. с курсовой работой; «Прочность конструкций

ЛА» объемом 5 з.е. с курсовой работой и «Конструирование с учетом случайных факторов» объемом 5 з.е. Изучается комплекс дисциплин по исследованию динамики конструкций: «Теория механических колебаний» объемом 4 з.е., «Динамика неконсервативных систем» объемом 8 з.е. с курсовой работой, «Колебания конструкций КА» объемом 2 з.е. и «Динамика конструкций» объемом 2 з.е. Во всех указанных курсах на базе электронных геометрических моделей строятся электронные расчетные схемы для анализа конструкций распространенными методами: методом конечного элемента, методом конечного объема и др.

Для поддержки курсового проектирования на 8 семестре параллельно с курсовым проектом введена специальная дисциплина «Автоматизированная компоновка аэрокосмических систем» трудоемкостью 3 з.е., в которой преподаются основные сведения о технологиях информационной поддержки жизненного цикла изделия и даются методики автоматизации компоновки КА.

Для поддержки курсового проектирования на 10 семестре введена специальная дисциплина «Основы автоматизированного расчета аэрокосмических конструкций» трудоемкостью 3 з.е., в которой излагаются основы математического моделирования в технике, сведения об архитектуре пакетов инженерного анализа, даются методики построения электронных расчетных схем.

В настоящее время имеется дефицит по подготовке студентов в области технологий автоматизированного производства (CAM-технологиям) и их интеграции в единую CAD/CAM/CAE систему. Технологическая подготовка на 7–9 семестрах включает курс «Технология изделий ракетно-космической техники» трудоемкостью 6 з.е. завершающийся курсовым проектом трудоемкостью 3 з.е. CAD-технологии используются в данном курсе пока только для проектирования на основе ЭГМ деталей ЭГМ оснастки.

В результате освоения учебного плана к моменту начала работ над

дипломным проектом студент проходит один-два полных цикла CAD/CAE моделирования и имеет достаточные компетенции для выполнения квалификационной работы.

Пятнадцатилетний опыт подготовки студентов по описанной выше технологии показал, что в подготовке инженеров нельзя ограничиваться только работой с «виртуальной техникой». В этом случае у выпускников остается дефицит опыта работы с реальными физическими объектами. Программы виртуальной разработки изделий при квалифицированном использовании позволяют студентам выполнять проекты, на высоком уровне, оставаясь полностью «оторванными от реальности». Работа с конструкциями, воплощенными в материале, остро необходима будущему специалисту, для формирования его профессиональных навыков – прежде всего для создания не только высокоэффективных, но и высокотехнологичных изделий.

Решением, позволяющим одновременно дать студентам возможность воплотить «виртуальную реальность» в материале и освоить передовую технологию автоматизированного производства является использование в учебном процессе трехмерной печати. Методические исследования по данному вопросу активно ведутся в российских и зарубежных учебных заведениях на протяжении последнего десятилетия [2]. Известны научные работы, посвященные исследованию потенциала новой технологии [3, 4], организации специализированных лабораторий [5] и внедрению трехмерной печати в курсе инженерной графики [6]. Однако, в силу высокой стоимости оборудования указанные технологии остаются пока еще редким явлением. Как предполагается в работе [4]: «Возможно, следующее поколение учащихся сможет использовать 3D-печать в процессе образования и количество будущих инженеров возрастет в не-сколько раз».

В настоящей статье рассматриваются результаты первого опыта внедрения технологий трехмерной печати (3D-печати) в учебный план кафедры «Аэрокосмические систе-

мы» МГТУ им. Н.Э. Баумана для обучения студентов основам компоновки бортового оборудования космических аппаратов.

1. Обоснование выбора курса для внедрения новых технологий

Анализ существующего учебного плана показал, что для внедрения технологий трехмерной печати наиболее рационально выбрать учебную дисциплину из раздела «Профессиональная подготовка». Данный раздел построен таким образом, что студент непрерывно сталкивается с необходимостью выполнять учебные работы, связанные с формообразованием элементов конструкций. При этом изучение технологий автоматизированного создания материальных прототипов по виртуальным моделям желательно начинать как можно раньше.

Поскольку в настоящее время компетенции в области современных программ CAD, где реализованы методики описания формы и размеров изделий в виде твердотельных параметризованных геометрических моделей, становятся фундаментом инженерной деятельности, наравне с компетенциями в области естественных наук: математикой, физикой, программированием и др. представляется вполне логичным внедрение трехмерной печати в курсе инженерной графики, как описано, например, в работе [6].

На дисциплину «Инженерная графика» при подготовке специалиста-машиностроителя в техническом университете как правило отводится 9 зачетных единиц (324 часа), которые следующим образом распределены по семестрам: 1й семестр – 2 зачетные единицы (з.е.) (72 часа), 2й семестр – 2 з.е. (72 часа), 3й семестр – 3 з.е. (108 часов) и 4й семестр – 2 з.е. (72 часа). Этот объем часов, используемый ранее только для освоения методик проекционного черчения, теперь требуется поделить между черчением и геометрическим моделированием в соответствии с новыми стандартами ЕСКД [7–9].

Основы методик формообразования последовательно преподаются на специализированной кафедре «Инженерная графика» в виде двух связанных дисциплин «Инженерная графика» и «Геометрическое моделирование». На первом курсе (1,2 семестр) студенты изучают классическое черчение и начертательную геометрию. Это необходимо в связи с тем, что из программы средней школы исключены уроки черчения и студент-первокурсник не умеет воспринимать форму изделия по его проекционным видам, не говоря уже о том, чтобы описать придуманную им форму в виде простейшего эскиза. Так как отображение ЭГМ на экране компьютера есть ее проекция, то обучение CAD-технологиям без начертательной геометрии оказывается неэффективным, поскольку студенты иногда не могут правильно прочесть проекции моделей, которые формируются на мониторе компьютера.

К изучению геометрического моделирования можно приступать только тогда, когда студент овладел не только основами машиностроительного черчения, но и аналитической геометрией, а также основами информатики и программирования. В течении 3-го и 4-го семестров проводится обучение фундаментальным информационным технологиям описания формы изделия в виде граничных геометрических элементов (B-Rep представление каркасных, поверхностных и твердотельных моделей), приемам управления иерархической базой данных геометрических элементов (CSG моделирование, моделирование на основе фичерзов), правилам параметризации ЭГМ деталей и сборочных единиц, а также способам автоматизированного построения электронных чертежей, ассоциативных с геометрической моделью.

В результате детального анализа учебных программ по инженерной графике можно сделать вывод, что изучение трехмерной печати не укладывается в часы указанных дисциплин и либо перегрузит студентов, либо не позволит в полном объеме освоить базовые компетенции.

Изучение методик трехмерной печати в рамках «Вычислительно-графической практики», в результате которой студенты по окончании второго курса закрепляют знания, полученные при изучении CAD-технологий и получают первые навыки по использованию разработанных ЭГМ в инженерных расчетах с помощью технологий САЕ, также оказывается нецелесообразным, поскольку к этому моменту у студентов еще отсутствует значимый технический объект для воплощения в материале.

В то же время одним из важнейших этапов разработки КА является компоновка. От качества ее исполнения зависит эффективность выполнения целевой функции. Компоновка подразделяется на внешнюю и внутреннюю. Внешняя компоновка – это определение облика и размещение оборудования на внешней поверхности аппарата. Внутренняя компоновка – размещение бортовой аппаратуры в корпусе КА.

С целью формирования компетенций студентов в области компоновки, как указано во введении, студентам на 7-м семестре читается курс лекций – «Компоновка бортового оборудования космических аппаратов». Целью курса является передача студентам основных знаний и навыков относительно требований к внешней и внутренней компоновке.

Навыки компоновки затем закрепляются в процессе курсового и дипломного проектирования. При этом в среде твердотельного параметрического моделирования строится ЭГМ КА в транспортной (под обтекателем ракеты-носителя) и в рабочей конфигурациях. В результате при выполнении курсового проекта (курсовой работы), как правило, выполняется внешняя компоновка. Выбирается размещение топливных баков, двигателей, антенн, солнечных батарей и другого оборудования, устанавливаемого на поверхности корпуса КА. С освоением этого навыка, как показывает анализ компоновок, выполненных при дипломном проектировании, все выпускники справляются достаточно хорошо.

Значительно хуже дело обстоит с освоением навыка внутренней компоновки, что требует совершенствования методики обучения.

Внутренняя компоновка намного сложнее внешней, поскольку в ограниченном объеме отсека заданной формы необходимо не только разместить приборы, обеспечить их надежное крепление, в соответствии с требованиями (часто противоречивыми) на установку, но и предусмотреть возможность легкой замены и регулировки, если это будет необходимо.

Научить компоновать приборы в отсеке КА, с учетом выше перечисленных условий, только на бумаге очень сложно. Использование технологий трехмерного твердотельного геометрического моделирования для информационной поддержки внутренней компоновки повышает эффективность обучения, но оказывается недостаточным, поскольку студент не в полной мере получает обратную связь о своих конструкторских решениях. Доступные в учебном процессе виртуальные средства разработки являются лишь визуализированными проекциями трехмерных моделей на плоский экран монитора, и лишены сенсорной составляющей.

В промышленности, где внутренние компоновки выполняются высококвалифицированными специалистами с использованием современных технологий быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) [10] изготавливаются натурные макеты компоновок, на которых уточняется размещение приборов их крепление, прокладка кабельных сетей и коммуникаций. Внедрение таких технологий в учебный процесс до недавнего времени было затруднительно из-за дороговизны оборудования. Однако, с появлением на рынке «бытовых» 3D-принтеров, обладающих доступной ценой при приемлемой точности изготовления деталей из пластика порядка 0,1...0,5 мм, стало возможным разработать методику обучения компоновке приборных отсеков с использованием натурных макетов.

Приведенные выше аргументы позволили определить курс для

внедрения новых технологий в существующем учебном плане кафедры.

2. Цели и задачи методической работы

Целью методической работы являлось внедрение в учебный процесс технологий быстрого прототипирования для совершенствования навыков студентов по внутренней компоновке бортового оборудования КА.

Кроме основной цели дополнительно предполагалось достичь и второй цели – ознакомления студентов с основами САМ-технологий, что позволяло восполнить существующий в учебном плане пробел в образовании студентов в области основ информационной поддержки жизненного цикла изделий ракетно-космической техники.

Переход от виртуального геометрического моделирования компоновки к ее прототипированию потребовал решения двух взаимосвязанных задач.

Первой задачей методической работы являлось создание доступной студентам методики подготовки технологических программ для 3D-принтера на основе ЭГМ, разработанных ими в курсовом проекте.

Одной из наиболее распространенных технологий быстрого прототипирования, позволяющей автоматизировать создание натуральных макетов, является экструзионная технология 3D-печати, которая основана на методе послойного формирования объемных деталей выдавливаемой струей расплавленного пластика. 3D-принтер, фактически является станком с числовым программным управлением, у которого вместо фрезы или резца имеется экструдер. Программирование принтера проводится на индустриальном языке G-code, который поддерживается большинством обрабатывающих центров. Практическое изучение студентами работы такого принтера позволяет им в общих чертах ознакомиться с принципами программирования других станков с числовым программным управлением.

Для 3D-принтера программы печати формируются при помощи специальных программ-слайсеров. Название этих САМ-систем происходит от английского термина *slicing* – нарезка по слоям. Исходными данными для таких программ являются ЭГМ элементов конструкции, а выходными данными – технологические программы на языке G-code.

При создании программ для 3D-принтера студенты сталкиваются с технологическими ограничениями послойной печати, накладываемыми на изготовление деталей различной формы. Слишком мелкие детали и тонкие стенки в разработанной ЭГМ могут привести к получению бракованной детали. Неправильный выбор базовой плоскости приведет к повышенному расходу материала на выполнение поддерживающих стенок для наращивания элементов, лишенных опоры (висящих в воздухе). Эти поддерживающие элементы должны быть удалены вручную и увеличивают стоимость и время печати детали. Также оказывается чрезвычайно важным учитывать термическую усадку материала, возникающую в процессе охлаждения нагретого пластика. Внутренние напряжения в неправильно напечатанной детали могут приводить к ее короблению и растрескиванию слоев. Таким образом, студентам необходимо научиться рационально выбирать базовую плоскость детали и масштаб модели, чтобы экономить расход пластика, уменьшать время печати и избегать вредного влияния усадки материала. Фактически, в ходе подобной учебной работы косвенно решается задача практического знакомства студентов с проблемами технологической подготовки производства, что позволяет студентам более осмысленно воспринимать затем курсы, читаемые технологическими кафедрами.

Второй задачей методической работы являлось закрепление навыков проектирования деталей машин при создании документации для сборки компоновочных макетов. Макеты блоков аппаратуры должны быть установлены на ма-

кетах силовых элементов, которые для наглядности внутреннего размещения блоков выполняются из прозрачного листового пластика. Поскольку напечатанные детали в результате усадки изменяют свои размеры относительно разработанной ЭГМ проблемы выбора зазоров в крепежных отверстиях и назначение допусков в размерных цепях оказываются весьма актуальными, поскольку имеется реальная опасность испортить макет силового элемента. Таким образом, студенты должны в ходе компоновки решить вопросы базирования деталей при сборке, создать чертеж крепежных отверстий на силовых элементах и назначить допуски на все установочные размеры.

Особенно важно, что критерием правильности проделанной работы будет не субъективная оценка преподавателя, а объективные показатели качества собранного макета.

3. Описание методики

Для совершенствования обучения внутренней компоновке в рамках вышеуказанного курса были введены практические занятия, на которых студенты, используя навыки, полученные при изучении соответствующего раздела дисциплины «Геометрическое моделирование» выполняют компоновку КА с использованием программного комплекса SolidWorks, а затем печатают на 3D-принтере прототипы элементов компоновки и собирают компоновочный макет. Методические занятия проводятся следующим образом.

В зависимости от количества студентов, группа разбивается на 2...3 подгруппы (желательно не более 6 человек в подгруппе). В каждой группе назначается «Главный конструктор».

Группам выдаются задания на проектирование. Задание состоит из комплекта габаритных чертежей компоновочных приборов, (8...10 штук).

Проводится шесть практических занятий:

Занятие 1. Проводится контроль знаний и навыков, полученных студентами при изучении

геометрического моделирования. Студенты выполняют ЭГМ сложной детали и сборочной единицы одного из механизмов КА (например, раскрывающейся солнечной батареи).

Занятие 2. Студент получает габаритные чертежи от двух до четырех приборов, входящих в проектируемый КА, по которым должен выполнить ЭГМ и провести в программе-слайсере подготовку G-code программ для выполнения полученных моделей на 3D-принтере.

Занятие 3. Выбирается тип корпуса отсека (герметичный, не герметичный) и форма, определяется объем, необходимый для размещения приборов. Проводится размещение заданных приборов на силовых элементах конструкции в соответствии с требованиями, указанными на габаритных чертежах. При этом осуществляется разработка способов крепления приборов и конструирование соединений. В случае необходимости выполняются ЭГМ узлов крепления. При компоновке необходимо обеспечить заданное положение центра масс отсека.

Занятия 4 и 5. Выполнение внутренней компоновки отсека КА. Изготовление на 3D-принтере моделей приборов и узлов крепления.

Занятие 6. Сборка компоновочного макета разработанного КА.

4. Результаты внедрения методики

Впервые практические занятия по изложенной выше методике проводились в 2014–15 учебном году. За основу был выбран один из малых КА дистанционного зондирования. Малый КА такого типа имеет один негерметичный отсек кубической формы в котором все приборы монтируются на панелях, образующих стенки корпуса. Было принято, что крепление приборов осуществляется непосредственно на панелях, без кронштейнов и т.п.

Занятия проводились в группе, состоящей из 10 человек и было принято решение изготовить один компоновочный макет. Каждый студент выполнил 2...3 твердотельные модели приборов. Габаритные

Рис. 1. Габаритные макеты приборов, выполненные на 3D-принтере

Рис. 2. Пример компоновочного макета панели корпуса КА

Рис. 3. Пример результата работы студентов: компоновочный макет КА:
1 – контакт блоков вследствие компоновочной ошибки; 2 – кронштейн для соединения панелей

макеты приборов были напечатаны на 3D-принтере BFB-3000 из ABS-пластика [11]. Вид макетов показан на рис. 1. При печати макетов потребовалось найти компромисс между масштабом моделей, степенью их детализации и скоростью печати для того чтобы напечатать все модели в течение семестра с учетом неизбежных работ над ошибками. Недостаточный опыт подготовки моделей привел к тому, что некоторые блоки были выполнены с погрешностями формы (см. конические поверхности на рис. 1).

Одновременно с изготовлением моделей приборов выполнялась компоновка панелей. После выполнения компоновки панелей проводилась компоновка всего аппарата в сборе, которая требовала коррекции компоновки панелей. После изготовления макетов блоков производился их обмер. В результате вводилась коррекция компоновки панелей с учетом термической усадки моделей. Окончательно выпускались чертежи панелей из оргстекла с указанием расположения отверстий для крепежа блоков, которые передавались учебному мастеру для изготовления их из листа оргстекла. После изготовления панелей осуществлялся их входной контроль и сборка макетов панелей. На рис. 2 приведен пример готового компоновочного макета одной из панелей.

После изготовления полного комплекта панелей была проведена сборка аппарата в целом. Общий вид компоновочного макета, полученный в результате семестровой работы группы показан на рис. 3.

В ходе работы над проектом студенты неизбежно допустили некоторые компоновочные ошибки. Например, на рис. 3 видно, что правильной установке звездного датчика (черный элемент слева вверх) мешает блок аппаратуры (серый блок). Кроме того, дефицит времени не позволил проработать подробно узлы крепления панелей и эти элементы были спроектированы и напечатаны упрощенно в виде угловых кронштейнов (см. позиция 2 на рис. 3).

Однако все обнаруженные ошибки явились полезной обратной

связью для студентов и полученный макет стал основанием для получения студентами зачета по курсу «Компоновка бортового оборудования космических аппаратов».

В 2015–2016 учебном году занятия проводились в группе, состоящей из 14 человек и было принято решение изготовить два компоновочных макета отсеков в форме цилиндра и параллелепипеда. Каждой группе было выдано задание, включавшее около 25 приборов. В процессе разработки программ для печати в целях экономии материала многие приборы были выполнены в виде сборочных единиц, состоящих из 2...4 деталей. Это значительно уменьшило объем пластика, но существенно увеличило количество печатаемых элементов. В результате за семестр удалось напечатать и изготовить только один макет цилиндрического отсека, состоящий из 51 детали. Общий вид макета показан на рис. 4. Суммарное время работы 3D-принтера составило 52ч 41мин, что явилось практически пределом его работы в семестре. Среднее время печати одной детали составило около 1ч 2 мин; минимальное – 8 мин, а максимальное – 4ч 19 мин.

Не взирая на то, что был создан один макет обе группы студентов получили заслуженный зачет, однако полученная информация о предельной производительности принтера послужила основанием для коррекции заданий следующего курсу.

Рис. 4. Компоновочный макет КА цилиндрической формы

Заключение

Первый опыт интеграции в одном учебном курсе компьютерных технологий геометрического моделирования и трехмерной печати показал, что работа с физическими макетами существенно повышает интерес студентов к изучаемому курсу.

Поскольку готовый материальный макет «не прощает» ошибок компоновки в отличие от виртуального макета, где интерференция компонентов может остаться незамеченной, работа над проектом потребовала от студентов большей вовлеченности и ответственности.

Коллективная работа над проектом оказалась полезным тренингом групповой работы по решению общей творческой задачи.

В ходе первых испытаний методики были уточнены возмож-

ности 3D-принтера и программы слайсера [12]. Стало понятно, что цикл изготовления макета детали составляет в среднем 2..3 часа на один компонент включая 1..1,5 часа работы принтера. Установлено, что крупные блоки необходимо делать сборными (состоящими из корпуса и крышки) для экономии материала. Общий объем пластика, затраченного на проект, составляет примерно 1кг. Также важной информацией является тот факт, что при покупке 3D-принтера для учебного процесса важнейшей характеристикой является не точность, а скорость печати.

Результаты тестирования методики были признаны успешными и в настоящее время ставится вопрос о приобретении дополнительного принтера с более высокой производительностью.

Литература

1. Г.А. Щеглов. SolidWorks в учебном проектировании аэрокосмических систем. Военный парад. 2009. №2 (92). С.18–19
2. Заседатель В.С. Образовательный потенциал технологий быстрого прототипирования // Интернет-журнал «Науковедение», 2015. Т.7. №5. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/220PVN515.pdf>.
3. Толкачева Е. 3D-принтеры в образовании. Наступающее будущее. 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://newtonew.com/overview/3d-printer-in-school>
4. Сябренко А.П. Использование технологии 3D-печати в образовательном процессе вуза [Текст] / А.П. Сябренко, В. С. Тынченко // Развитие современ-

References

1. G.A. Shcheglov. SolidWorks v uchebnom proektirovani aeri kosmicheskikh sistem. Voennyi parad. 2009. №2 (92). Pp.18–19 (in Russ.)
2. Zasedatel' V.S. Obrazovatel'nyi potentsial tekhnologii bystrogo prototipirovaniya // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2015. Part 7. №5. [Electronic resource] Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/220PVN515.pdf>. (in Russ.)
3. Tolkacheva E. 3D-printery v obrazovanii. Nastupayushchee budushchee. 2015. [Electronic resource]. – Available at: <https://newtonew.com/overview/3d-printer-in-school> (in Russ.)
4. Syabrenko A.P. Ispol'zovanie tekhnologii 3D-pechati v obrazovatel'nom protsesse vuza [Tekst] / A.P. Syabrenko, V.S. Tynchenko // Razvitie sovremennogo obrazovaniya:

ного образования: теория, методика и практика : материалы VII Междунар. науч. практ. конф. (Чебоксары, 29 мая 2016 г.) / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – № 1 (7). – С. 244–247. – ISSN 2413-4007.

5. Чернышов Е.А., Решетов В.А., Романов А.Д. Внедрение в учебный процесс подготовки кадров технологий быстрого прототипирования // Международный журнал экспериментального образования. 2013. №10-2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-v-uchebnyy-protsess-podgotovki-kadrov-tehnologiy-bystrygo-prototipirovaniya> (дата обращения: 06.10.2016).

6. Бощенко Т.В., Чепур П.В. Опыт внедрения технологий прототипирования изделий на основе 3d печати в образовательный процесс высшего учебного заведения // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22481> (дата обращения: 06.10.2016).

7. ГОСТ 2.052-2006 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ; 2007: 15 с.

8. ГОСТ 2.056-2014 Единая система конструкторской документации. Электронная модель детали. Общие положения. М.: Стандартинформ; 2015: 21 с.

9. ГОСТ 2.057-2014 Единая система конструкторской документации. Электронная модель сборочной единицы. Общие положения. М.: Стандартинформ; 2014: 19 с.

10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. Springer; 2015: 498 p. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3

11. 3D-принтер BFB-3000. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://cubify.s3.amazonaws.com/public/bfb/d100253_bfb-3000_set_up_and_operations_manual_v3-0.pdf (дата обновления 25.11.2015)

12. Axon 2. User manual. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fablabbergenopzoom.nl/wp-content/uploads/2014/04/AXON-User-manual.pdf> (дата обновления 25.11.2015)

teoriya, metodika i praktika : materialy VII Mezhdunar. nauch. prakt. konf. (Cheboksary, 29 may 2016) / redkol.: O. N. Shirokov [i dr.]. – Cheboksary: TsNS «Interaktiv plus», 2016. – № 1 (7). – Pp. 244–247. – ISSN 2413-4007. (in Russ.)

5. Chernyshov E.A., Reshetov V.A., Romanov A.D. Vnedrenie v uchebnyi protsess podgotovki kadrov tekhnologii bystrygo prototipirovaniya // Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. 2013. №10-2. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-v-uchebnyy-protsess-podgotovki-kadrov-tehnologiy-bystrygo-prototipirovaniya> (Accessed: 06.10.2016). (in Russ.)

6. Boshchenko T.V., Chepur P.V. Opyt vnedreniya tekhnologii prototipirovaniya izdelii na osnove 3d pechati v obrazovatel'nyi protsess vysshego uchebnogo zavedeniya // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2015. – № 5. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22481> (Accessed: 06.10.2016). (in Russ.)

7. GOST 2.052-2006 Edinaya sistema konstruktorskoi dokumentatsii. Elektronnaya model' izdeliya. Obshchie polozheniya. M.: Standartinform; 2007: 15 P. (in Russ.)

8. GOST 2.056-2014 Edinaya sistema konstruktorskoi dokumentatsii. Elektronnaya model' detali. Obshchie polozheniya. M.: Standartinform; 2015: 21 P. (in Russ.)

9. GOST 2.057-2014 Edinaya sistema konstruktorskoi dokumentatsii. Elektronnaya model' sborochnoi edinitsy. Obshchie polozheniya. M.: Standartinform; 2014: 19 P. (in Russ.)

10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. Springer; 2015: 498 P. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3

11. 3D-printer BFB-3000. Rukovodstvo pol'zovatelya. [Electronic resource]. Available at: http://cubify.s3.amazonaws.com/public/bfb/d100253_bfb-3000_set_up_and_operations_manual_v3-0.pdf (Accessed: 25.11.2015) (in Russ.)

12. Axon 2. User manual. [Electronic resource]. Available at: <http://www.fablabbergenopzoom.nl/wp-content/uploads/2014/04/AXON-User-manual.pdf> (Accessed: 25.11.2015).

Сведения об авторах

Владимир Викторович Зеленцов,

кандидат технических наук, доцент, зам. зав. кафедры «Аэрокосмические системы» по методической работе Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
Эл. почта: zelentsov33@gmail.com
Тел.: (499) 263-63-10

Георгий Александрович Щеглов,

доктор технических наук, профессор, зам. зав. кафедры «Аэрокосмические системы» по научной работе Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
Эл. почта: shcheglov_ga@bmstu.ru
Тел.: (499) 263-63-10

Information about the authors

Vladimir V. Zelentsov

Candidate of Engineering Sciences,
Deputy Head of Methodical work of the Department of Aerospace Systems
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
E-mail: zelentsov33@gmail.com
Tel.: (499) 263-63-10

Georgy A. Shcheglov

Doctorate of Engineering Science,
Deputy Head of Science of the Department of Aerospace Systems
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
E-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru
Tel.: (499) 263-63-10