

## Перечень условных обозначений и сокращений

В данном пособии используются следующие англоязычные и русскоязычные аббревиатуры. Значительно более полный список можно найти на ресурсе «Цикловики»<sup>1</sup>.

CAD – Computer Aided Design – автоматизированное проектирование

CAM – Computer Aided Manufacturing – автоматизированная подготовка производства

FDM – Fused Deposition Modeling – моделирование методом наплавления

DFKit – Digital Fabrication Kit – комплект для цифрового производства

ДСП – древесно-стружечная плита

ЕСКД – единая система конструкторской документации

МДФ – транслитерация от англ. MDF – Medium Density Fibreboard (древесноволокнистая плита средней плотности)

ПО – программное обеспечение

САПР – система автоматизированного проектирования

ТП – технологический процесс

УП – управляющая программа

ЧПУ – числовое программное управление

ЭМИ – электронная модель изделия

Наряду с перечисленными сокращениями в тексте принят ряд обозначений.

1. Имена собственные, относящиеся к рассматриваемый в Пособии предметной области и которые обычно заключаются в кавычки (например, названия фирм, программных продуктов и др.), а также наименования управляющих элементов программных интерфейсов (вкладки, кнопки, команды меню и т.п.) указываются без кавычек курсивом, например: *ООО Фотомеханика*<sup>2</sup>.
2. Важные с точки безопасности аспекты, а также типичные ошибки выделяются в тексте **прямым полужирным** начертанием.
3. Ряд подчиненных или вложенных элементов интерфейса, или команд меню также перечисляется через тире курсивным начертанием, например: *Файл – Сохранить как*.
4. Обозначения элементов интерфейса, относящиеся к работе с системой CAD КОМПАС вынесены в отдельное Приложение 3.
5. Названия отдельных частей настоящего документа (глав и параграфов), а также относящихся к описываемому оборудованию других документов, указываются, как обычно, в кавычках.

## Введение

Инновационные процессы, имеющие место в инженерной области, выдвигают все более серьезные требования к подготовке специалистов этого направления. В настоящее время в нашей стране взят курс на развитие технического образования молодежи и воспитание научно-технических кадров с уровнем подготовки и культурным уровнем, отвечающим мировому. Однако по причине недостаточной оснащенности технической базы учащиеся старших классов школы и студенты инженерных специальностей, как правило, характеризуются слабым знанием новейших технологий и отсутствием достаточной практической подготовки, что ведет к нехватке на рынке труда опытных инженерных кадров в области автоматизиро-

---

<sup>1</sup> Cyclowiki.org. Список аббревиатур. [Электронный ресурс] URL:

<http://cyclowiki.org/wiki/Циклопедия:Списки:Аббревиатуры> (дата обращения 02.08.2017)

<sup>2</sup> Обозначения, относящиеся к интерфейсу CAD *Компас*, вынесены в отдельное Приложение 3

ванного проектирования и производства, трехмерного моделирования, технического дизайна, технологической подготовки производства и т.д.

В качестве решения описанной проблемы современный мировой опыт предлагает оснащение комплексами учебно-производственного оборудования универсальных производственных лабораторий на базе вузов (фаблабов), учебно-производственных комбинатов и даже отдельных производственно-технологических участков образовательных учреждений. С этих позиций актуальной задачей воспитания и обучения молодежи является внедрение в учебную практику комплексов недорогого высокотехнологичного оборудования на базе станков с числовым программным управлением, которые рассматриваются в данном учебно-методическом пособии.

Концепция фаблибов берет начало с 2001 года, когда в Массачусетском технологическом институте была организована первая такая лаборатория как конечный результат проекта «Как изобрести почти все на свете». С тех пор концепция центров молодежного технического творчества и фаблибов получила мощный толчок к развитию во всем мире, в т.ч. и в нашей стране. Появилась всемирная сеть открытых цифровых лабораторий 3D-моделирования и прототипирования, оснащенных самыми современными инструментами цифрового производства для творчества и изобретения, где молодежи предоставлены возможности реализации проектов от идеи до готового продукта.

При воплощении своих проектов учащиеся изучают основы векторного и трехмерного моделирования, инновационные технологии конструирования и производства, получают навыки работы как с традиционным ручным инструментом, так и с современными станками с числовым программным управлением.

В настоящем пособии описаны принципы работы и особенности использования 3D-принтера DF-Print, производимого компанией «Фотомеханика» в рамках проекта «Комплект для цифрового производства» (*Digital Fabrication Kit, DFKit*). Устройство предназначено для обучения, а также может быть использовано в условиях лаборатории прототипирования для получения по цифровой модели реальных изделий из пластмассы методом трехмерной печати.

После небольшого теоретического введения следует блок практических работ, которые учащимся предлагается сделать самостоятельно с целью усвоения принципов функционирования принтера и получения навыков работы с ним.

Пособие предназначено как для учащихся, так и для учителей школ, техникумов, преподавателей средних специальных и высших учебных заведений, центров молодежного инновационного творчества, реализующих программы основного и дополнительного обучения по дисциплинам «Технология», «Технология машиностроения», «САПР технологических процессов», «Компьютерные технологии в дизайне», «Технологии 3D-моделирования» и др.

После изучения материала пособия учащиеся

должны иметь представление:

- о современных концепциях и технологиях в области автоматизированного проектирования и производства, трехмерного моделирования, технического дизайна, технологической подготовки производства, ориентированных на применение станков с числовым управлением;
- о типах и назначении электронных моделей изделия и их использовании на различных этапах производства изделия;
- о составе и основных возможностях комплекта станков DFKit;
- о назначении, характеристиках и возможностях программных приложений для трехмерного моделирования, дизайна, конструирования и производства;

должны знать:

- правила техники безопасности при работе с ЧПУ-станком;
- основную терминологию в предметной области 3D-моделирования и дизайна;
- назначение и область применения 3D-принтеров;
- основные элементы конструкции 3D-принтеров;

- основные характеристики и свойства материалов, применяемых для 3D –печати;
- назначение, возможности и особенности использования программных приложений для конструирования и печати 3D-моделей, а также типичные ошибки печати и причины их возникновения;

должны уметь:

- создавать несложные модели в среде САД-системы Компас и сохранять их в нужных форматах для дальнейшей печати на 3D-принтере;
- правильно выбирать и настраивать режимы работы программы-слайсера *CURA*;
- формировать выходной G-код для 3D-принтера в среде программы-слайсера с учетом особенностей конструкции детали и типа применяемого материала;
- грамотно настраивать параметры с пульта оператора в режиме ручного управления при подготовке к работе и в процессе печати изделия на 3D-принтере.

# 1. Технические характеристики комплекта

## 1.1. Состав и назначение комплекта

Комплект учебно-производственного оборудования с числовым-программным управлением (ЧПУ) «Digital Fabrication Kit (DFKit)» предназначен для использования в учебных целях в школах, колледжах, вузах, центрах молодежного творчества и других образовательных учреждениях. Внедрение этого комплекта в учебный процесс позволяет учащимся на простых примерах изучить основные практические аспекты организации сквозного проектирования и изготовления изделий на современном машиностроительном предприятии.

В состав комплекта входят устройства трехмерного цифрового производства (так называемые 3D-устройства), т.е. станки с числовым программным управлением (ЧПУ-станки). Аббревиатура 3D (3 dimensions) означает, что обработка информации выполняется по трем координатам, т.е. в реальном трехмерном пространстве. Комплект включает 4 станка<sup>3</sup>:

- 3D-принтер DF-Print;
- лазерный станок DF-Laser;
- фрезерный станок DF-Mill;
- 3D-сканер DF-Scan.

В рамках комплекта поставляется также техническая документация на станки, учебно-методическое обеспечение и программные средства создания и редактирования цифровых моделей и управления оборудованием (CAD/CAM-системы) учебного назначения.

Возможности комплекта позволяют использовать входящие в его состав оборудование и программно-методическое обеспечение для:

- изучения принципов работы современного оборудования автоматизированных производств;
- изучения методов разработки и преобразования компьютерных моделей изделий в процессе их изготовления;
- разработки трехмерных компьютерных моделей деталей, требующих выполнения многокоординатных видов обработки;
- применения программных средств трехмерного моделирования для генерации и верификации управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ;
- изготовления деталей на станках комплекта по управляющим программам из библиотеки готовых моделей и на основе моделей, спроектированных учащимися самостоятельно;
- единичного и мелкосерийного производства деталей и узлов в условиях учебных классов, исследовательских лабораторий или производственных участков прототипирования.

В качестве отличительных потребительских свойств оборудования следует назвать относительную безопасность для обслуживающего персонала (операторов станков, учащихся), простоту освоения, использования и обслуживания, единый стиль дизайна и оформления.

Поставляемое программное обеспечение может быть подразделено на следующие группы:

1. Программные системы типа CAD<sup>4</sup> для поддержки двух- и трехмерного компьютерного конструирования и моделирования, формирующие файлы цифровых моделей

---

<sup>3</sup> Несмотря на то, что принтер и сканер согласно сложившейся классификации относятся к периферийным устройствам, далее они будут также называться станками вместе с другим оборудованием DFKit.

<sup>4</sup> CAD –Computer Aided Design – автоматизированное проектирование

для последующей обработки в программах типа САМ<sup>5</sup>. Из множества распространенных программ трехмерного твердотельного моделирования инженерного назначения (AutoCAD, FreeCAD, nanoCAD, SolidWorks, T-Flex, КОМПАС и др.) в качестве базовой выбрана последняя из упомянутых, отечественная система, отвечающая критериям универсальности, локализованности, доступности и распространенности.

2. Программы/системы типа САМ, предназначенные для формирования управляющих кодов для ЧПУ-станков: CURA (для 3D –принтера), ArtCAM-2017 (для фрезерного станка) и InkScape с дополнительным модулем (плагином) для лазерного станка.

3. Интегрированные программные среды, предназначенные для специальной обработки. К ним относятся:

- система Photo3D Studio в комплексе с дополнительными утилитами для поддержки трехмерного сканирования и формирования цифровой модели в STL-формате;
- приложение DFKit Studio или Photoscan для реконструирования трехмерной модели по результатам сканирования объекта.

Для успешного овладения работой на ЧПУ-станках комплекта в его состав входят техническая документация и учебно-методические пособия для учащихся и преподавателей, в которых описаны особенности отдельных станков и ряд лабораторных работ по изготовлению реальных изделий. Выполняя эти работы, учащиеся смогут детально познакомиться с этапами технологического процесса производства продукции и самостоятельно реализовать основные типовые операции по работе с САД/САМ-системами и ЧПУ-станками. Таким образом учащиеся знакомятся со всем циклом инженерных работ, характерных для современного производства, начиная от конструирования трехмерной модели и заканчивая получением реального образца изделия.

## 1.2. Технические характеристики оборудования

### *Общая схема компоновки станков*

Три станка комплекта (принтер, фрезерный и лазерный) построены по однотипной схеме. На жестком основании закреплен горизонтальный рабочий стол, размеры которого определяют максимальную величину обрабатываемой заготовки. По периметру стола укреплена рама с направляющими, по которым перемещается основной узел станка – так называемая головка. Она представляет собой корпус, в котором и помещен инструмент: сопло принтера, шпиндель фрезерного или излучатель лазерного станка. В зависимости от типа инструмента получает название и сама головка: экструзионная, шпиндельная или лазерная.

Таким образом направляющие задают перемещение головки в плоскости, параллельной столу, т. е. по координатным осям X и Y. В необходимых случаях предусматриваются и направляющие для перемещения инструмента (или заготовки) по вертикальной оси Z.

Важным моментом является тот, что перед запуском программы оператор станка должен обязательно задать так называемую «нулевую точку», т. е. начальную позицию, от которой будут отсчитываться координаты при последующем перемещении рабочего органа (головки). Ведь дальнейшее движение головки осуществляется по командам программы, предписывающим смещение в точку с конкретными числовыми значениями координат по X, Y (а иногда и по Z). Эти команды поступают на двигатели приводов по соответствующим осям из блока числового управления (контроллера ЧПУ).

---

<sup>5</sup> САМ – Computer Aided Manufacturing – автоматизированная подготовка производства

С электронного блока по отдельному кабелю управляющие сигналы поступают и к головке, задавая необходимый режим работы инструмента. На станках обычно имеется и панель ручного управления и контроля, на которой находится разъем (слот) для карты памяти с управляющей программой (SD-карты) и табло индикации. В отдельных случаях там же размещена, и рукоятка управления для установки и изменения режимов работы станка.

В зависимости от типа станка рабочий стол также имеет конструктивные особенности, зависящие от вида обработки. Так, для принтера используется перемещаемый и подогреваемый стол (рабочая платформа), для лазера – металлический ячеистый, препятствующий сильному нагреву зоны резания, обеспечивающий минимальное отражение лазерного луча и удаление продуктов горения, а рабочая поверхность стола фрезерного станка должна иметь продольные Т-образные пазы для закрепления заготовки.

Четвертый станок комплекта (3D-сканер) содержит в своем составе поворотный предметный стол, осветительные лампы и цифровую фотокамеру. К устройству по кабелю подключается компьютер, который осуществляет прием и обработку зафиксированных фотокамерой изображений предметов, размещаемых на поворотном столе. Таким образом, сканер фотографирует объект со всех сторон (т.е. в диапазоне 360 градусов), а в результате компьютерной обработки из плоских двумерных снимков реконструируется (восстанавливается) трехмерная цифровая модель объекта. В дальнейшем построенный файл модели может быть передан для обработки на другие станки комплекта или же предварительно модифицирован в среде CAD-системы.

Все станки размещаются на массивной металлической тумбе-опоре. Тумба не оказывает влияния на работу самого станка, но обеспечивает нужную устойчивость и жесткость всей конструкции, необходимые для получения требуемой точности обработки. Кроме того, она позволяет разместить рабочую зону станка на нужной высоте по отношению к оператору, а также является местом хранения материалов, деталей, оснастки, документации и др. Для защиты персонала станок закрывается сверху прозрачным колпаком (купол), выполненным в форме куба.

Органы управления станком выведены на лицевые и боковые стенки корпуса. Обязательным элементом каждого станка является кнопка экстренного выключения, продублированная с двух сторон корпуса. Учитывая особенности эксплуатации в образовательных учреждениях, предусмотрены запоры для того, чтобы воспрепятствовать несанкционированному удалению или перемещению отдельных составных частей (колпак, тумба). Для достижения наилучшего обзора все четыре стороны колпака сделаны из стекла, причем с двух сторон установлены оснащенные замками стеклянные дверцы, обеспечивающие удобный доступ к рабочей зоне для установки и обслуживания заготовки и приспособлений.

Обслуживание и ремонт станка производятся после снятия купола. Для этого на нем предусмотрены четыре откидных ручки, по две с каждой стороны. Купол прикрепляется к корпусу замком, ключ от которого находится у ответственного за эксплуатацию оборудования.

Для исключения нештатных ситуаций при работе оборудования в каждом станке предусмотрены концевые выключатели, которые в случае некорректной работы программы или ошибки пользователя, предотвращают травмирование оператора и повреждения устройства, отключая двигатели приводов движущихся частей станка при выходе каретки с инструментом из рабочей зоны.

### ***3D-принтер DF-Print***

3D-принтер – это устройство, использующее метод послойного создания физического объекта на основе цифровой модели изделия. Технология изготовления деталей путем трехмерной печати на сегодняшний день является одной из самых распространенных и применяется в мелкосерийном производстве, исследовательских лабораториях, учебных заведениях, дизайн-студиях и др.

Основным элементом устройства помимо нагреваемой рабочей платформы, на которой формируется деталь, является экструзионная печатающая головка, движение которой по направляющим и обеспечивает «наращивание» детали слоями расплавленного пластика (технология Fused Filament Fabrication – «производство способом наплавления нитей»).

Таким образом, каждый слой изделия формируется путём выдавливания на нагреваемую для лучшего прилипания платформу через нагретое сопло головки (фильеру) рабочего материала – тонкой пластиковой нити, иначе называемой филаментом. Затем платформа опускается на толщину одного слоя и процесс повторяется.

Управление движением печатающей головки и платформы осуществляется с помощью встроенного микроконтроллера, выдающего управляющие команды для установки текущих координат головки. Этот же контроллер управляет и температурой нагрева как головки, так и платформы, на которой послойно формируется изделие.

Отметим, что одной из наиболее важных характеристик принтера является точность позиционирования головки, от которой зависит и точность печати в целом. Поэтому перед печатью необходимо настроить принтер, в частности, задать положение нулевой точки. А так как качество печати зависит и от точности расположения рабочей платформы, то ее плоскость также должна быть выставлена строго горизонтально. Поэтому операция по настройке платформы должна выполняться регулярно в рамках сервисного обслуживания оборудования.

Основные параметры принтера DF-Print: размер рабочей области – 300x300x270 мм, скорость печати – до 120 мм/сек, разрешение по вертикали – до 0.05 мм, максимальная температура экструдера – 280°C. Остальные технические характеристики принтера указаны в Приложении 1.

### **Фрезерный станок DF-Mill**

Фрезерные станки, широко применяемые в промышленности, используют для обработки наружных и внутренних поверхностей, для фрезерования зубьев колес, винтовых канавок, резьб и других видов работ. Поставляемый в комплекте DFKit трехосевой вертикально-фрезерный станок с числовым программным управлением портального типа DF-Mill предназначен для обработки пластика, доски, ДСП, МДФ, фанеры и других древесных материалов. Он может использоваться также и для обработки мягкого металла, например, алюминиевых и латунных деталей. К наиболее распространенным видам обработки относится раскрой листового материала (вырезание деталей по контуру), сверление, удаление части материала заготовки на заданную глубину (выборка карманов) и др.

Основным элементом станка является шпиндельная головка. Шпиндель – это приводимый во вращение электродвигателем вал, имеющий специальное приспособление для установки на нем режущего инструмента (фрезы) – цанговый зажим. Шпиндель размещен вертикально, т. е. перпендикулярно к поверхности рабочего стола. Именно поэтому станок и называется вертикально-фрезерным. Для крепления заготовки к рабочему столу используется комплект зажимов. Скоростью вращения шпинделя, а также перемещением шпиндельной головки в горизонтальной плоскости и по вертикали управляет контроллер. В него с карты памяти загружается программа, после чего оператор станка запускает ее на выполнение ручкой, расположенной на панели управления станком.

Для фрезерного станка так же, как и для 3D-принтера, необходимо задать нулевую точку, соответствующую началу координат в файле цифровой модели в процессе проектирования изделия. Дополнительно в программе должна быть заранее определена так называемая «плоскость безопасности», положение которой согласуется как с размером и положением зажимных приспособлений, крепящих деталь, так и конструктивных элементов заготовки.

Плоскость безопасности – это расположенная параллельно поверхности рабочего стола воображаемая плоскость, которая определяет нижнюю границу положения инструмента при его холостых перемещениях. Ее высота над столом обычно задается в управляющей про-

грамме станка так, чтобы на 2–3 см превышать наибольшую высоту фиксирующих заготовку зажимов. Тем самым гарантируется безопасное перемещение шпиндельной головки и снижается риск поломки оборудования.

Основные параметры станка: размер рабочей области – 400x470x100 мм, максимальная скорость перемещения головки – 5000 мм/мин, точность позиционирования – 0.01 мм, максимальная скорость вращения шпинделя – 24000 об./мин.

### ***Лазерный станок DF-Laser***

Лазерные станки с ЧПУ производят бесконтактную обработку материалов путем воздействия на поверхность заготовки лазерным лучом высокой энергии. Поскольку его толщина в среднем составляет 0,1 мм, то шов реза на поверхности заготовки получается очень тонким и аккуратным. Эти качества особенно важны при обработке таких непрочных материалов как картон или бумага.

Кроме высокой скорости и большой точности лазерная обработка характеризуется полным отсутствием твердых отходов – абразива, пыли или стружки. Ведь под действием энергии луча лазера материал поверхности заготовки в зоне обработки мгновенно нагревается и испаряется, а вытяжная система станка отводит газообразные продукты горения за пределы рабочей зоны.

Таким образом, в отличие от механической обработки резанием, на заготовку оказывает воздействие температура лазерного луча. При этом нагрев производится локально, в очень небольшой зоне, и даже при сквозном резании высокая температура влияет лишь на слои, непосредственно прилегающие к зоне обработки. Эти особенности позволяют обрабатывать на лазерном станке самые различные материалы, а кроме того отпадает необходимость крепления заготовок на рабочем столе станка, потому что они удерживаются на нем под действием собственного веса.

Лазерный станок комплекта DFKit предназначен для гравировки и раскроя таких мягких материалов, как картон, фанера, шпон, пластик. Внутри лазерной головки помещен твердолоконный лазер, а ее перемещение выполняется как в горизонтальной плоскости, так и в небольших пределах в вертикальной для обеспечения автоматической фокусировки. Рабочий стол сделан ячеистым для улучшения отвода тепла, избыток которого может привести к ухудшению качества обработки (например, оплавлению краев материала заготовки).

Перемещением головки и мощностью импульса лазера управляет специальный электронный блок – контроллер. Как и для других станков, управляющая программа загружается в этот блок с карты памяти, после чего оператор станка может запустить ее выполнение с панели управления.

Основные параметры станка: размер рабочего поля – 430x350x135 мм, максимальная скорость перемещения головки – 12000 мм/мин, точность обработки – 0,05мм.

### ***3D-сканер DF-Scan***

3D-сканер – это периферийное устройство, формирующее графическое изображение физического объекта и создающее на основе полученных данных его трехмерную электронную модель. Сканер может применяться в научных исследованиях, производстве и обучении для различных целей, в т. ч. для оцифровки предметов, контроля качества изделий, обратной разработки<sup>6</sup> и др.

Сканер комплекта DFKit работает по методу бесконтактного пассивного сканирования при вращении объекта по кругу относительно его вертикальной оси, т. е. в диапазоне от 0 до

---

<sup>6</sup>Обратная разработка (англ. reverse engineering) – исследование некоторого готового устройства или программы целью изучения его конструкции, принципов и логики работы.



360 градусов. При этом осуществляется анализ отраженного от объекта видимого света и формируется ряд цифровых фотографий. Полученные фотоснимки обрабатываются на подключенном к сканеру компьютере в специальной программе, на выходе которой получается твердотельная модель изделия, которая в дальнейшем может быть передана в CAD/CAM-систему с целью модификации конструкции и последующего ее изготовления на станках с ЧПУ. Такая технология сканирования называется «фотограмметрической».

Основные параметры сканера: время, требуемое для сканирования предмета с разрешением исходного кадра 12 МПикс, составляет не более 5 минут; диаметр поворотного стола – 330 мм.

### ***Установка и безопасное использование оборудования***

Монтаж оборудования комплекта «DFKit производится, как правило, специалистами фирмы-производителя в подготовленном заказчиком помещении. Следует предусмотреть наличие заземленных розеток электропитания из расчета суммарной потребляемой мощности 3,0 Квт (при одновременной работе всех станков комплекта).

Установка оборудования производится в учебных помещениях, удовлетворяющих санитарно-гигиеническим требованиям к кабинетам и мастерским образовательной области «Технология»<sup>7</sup>.

Регулировка станков для выполнения учебно-производственных работ рекомендуется производить заблаговременно до начала учебных занятий руководителем (учителем, мастером) или уполномоченным им лицом. Текущая настройка оборудования проводится также под руководством учителя непосредственно перед его использованием на занятии.

По сравнению с обычными универсальными станками оборудование с ЧПУ для обеспечения безотказной и точной работы требует более тщательного ухода и строгого соблюдения правил эксплуатации. Безотказную работу станка обеспечивают поддержанием чистоты всех его узлов, панелей и механизмов, а также строгим соблюдением сроков профилактических проверок, осмотров и регулировок. В процессе эксплуатации основным требованием является предохранение механизмов станка от перегрузки и неквалифицированных действий персонала (учащихся).

Периодически проводимые регулировки и внеплановый ремонт осуществляются, как правило, специалистами фирмы-производителя. Регулировку подверженных износу механизмов производят при плановых осмотрах, но не реже 1 раза в шесть месяцев.

Кроме того, для обеспечения эффективного использования станков настоятельно рекомендуется вести журнал учета работы каждого станка, где учитывают продолжительность использования станка в течение учебного занятия, время выполнения подготовительно-заключительных операций, а при необходимости – и ремонта станка.

**С целью обеспечения безопасности в процессе работы станка учащимся запрещается открывать дверцы защитного купола, дотрагиваться до нагреваемых или движущихся частей оборудования или пытаться самостоятельно исправить возникшие неполадки. Наблюдать за работой устройства в автоматическом режиме следует через прозрачные стенки защитного купола.**

При необходимости проведения подготовительно-заключительных операций станок должен быть выключен, а перед началом непосредственного выполнения этих действий (регулировки, установки модели или заготовки, очистки рабочего стола, инструмента и т.д.) следует обратиться за разрешением к руководителю (мастеру производственного обучения, лицу, ответственному за эксплуатацию оборудования и т.п.).

---

<sup>7</sup> Учебно-материальная база образовательного учреждения общего среднего образования. Часть II. Нормы и требования к учебным кабинетам и подразделениям. НД УМБ РАО-2-2000. Институт общего среднего образования РАО, Центр средств обучения, 2000.