

DOI: <https://doi.org/10.22263/2312-4156.2023.2.80>

## Использование 3D-технологий для проектирования элементов аналитического оборудования и его обслуживания

А.Я. Ефремова, М.Л. Пивовар, М.Н. Сабодина

Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, г. Витебск, Республика Беларусь

Вестник ВГМУ. – 2023. – Том 22, №2. – С. 80-89.

## Using 3D technologies to design the elements of analytical equipment and its maintenance

A.Ya. Efremova, M.L. Pivavar, M.N. Sabodina

Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Vitebsk, Republic of Belarus

Vestnik VGMU. 2023;22(2):80-89.

---

### Резюме.

Цель – оценить возможность изготовления отдельных запасных частей, расходных материалов и инструментов для аналитического оборудования стереолитографическим методом 3D-печати.

Материал и методы. В качестве 3D-принтера был выбран фотополимерный принтер Anycubic Photon для обеспечения высокой точности и прочности напечатанных моделей. Для создания моделей, их доработки и печати использовали CAD-программу Autodesk Fusion 360, программу-редактор Meshmixer и программу-слайсер Photon Workshop. Для печати использовали универсальные смолы Anycubic Basic и Voxelab Standard Photopolymer Resin, уретан-акрилатную смолу eSUN Hard-Tough Resin с повышенной жесткостью и гибкую уретан-акрилатную смолу eSUN eResin-Flex.

Результаты. С помощью аддитивных технологий были напечатаны инструмент для установки фитингов хроматографа, крышки со вставками для емкости с подвижной фазой, переходники шприц-капилляр с резьбой 10-32 и ¼-28, переходники для стеклянного фильтра, фильтры для подвижной фазы, заглушки для хроматографических колонок, заглушки на шприцы, переходники для измерения давления в газовых магистралях низкого давления, инструмент для установки высоковольтных проводов системы капиллярного электрофореза.

Заключение. Разработаны цифровые модели и выполнена печать запасных частей и расходных материалов для различного аналитического оборудования. Структура поверхности полученных образцов была достаточно ровной для обеспечения герметичности соединений и не требовала постобработки. Вместе с тем, было выявлено, что при контакте с метанолом и ацетонитрилом у изделий из использованных пластиков достаточно быстро появлялась хрупкость или происходило заметное набухание, затруднявшее или делавшее невозможным использование распечатанных изделий. Данный факт указывает на необходимость проведения дополнительных исследований свойств фотополимерных смол перед использованием полученных из них деталей в конкретном аналитическом оборудовании.

*Ключевые слова:* 3D-печать, аддитивные технологии, параметрическое моделирование, жидкостная хроматография, ИСР-МС, капиллярный электрофорез.

### Abstract.

Objectives. To evaluate the possibility of manufacturing individual spare parts, consumables and tools for analytical equipment by stereolithographic 3D printing.

Material and methods. The photopolymer printer Anycubic Photon was chosen as a 3D printer to ensure high accuracy and durability of the printed models. To create, refine and print the models, Autodesk Fusion 360 CAD program, Meshmixer editor program and Photon Workshop slicer program were used. For printing we used universal resins Anycubic Basic

and Voxelab Standard Photopolymer Resin, urethane-acrylate resin eSUN Hard-Tough Resin with increased toughness and flexible urethane-acrylate resin eSUN eResin-Flex.

Results. Development and printing of objects passed the following stages: creation of three-dimensional digital model of the object using CAD-sofwares; export of the created 3D model in STL-format, and its revision in editor software; choice of printing method and materials; creation of a set of instructions for 3D printer in slicer software, the selection of printing conditions; preparation of 3D printer for work; post-processing of the product. Chromatograph fittings installation tool, covers with inserts for the mobile phase tank, 10-32 and ¼-28 threaded syringe-capillary adapters, glass filter adapters, mobile phase filters, chromatography column plugs, syringe plugs, adapters for measuring pressure in low pressure gas lines, tool for installing high-voltage wires of the capillary electrophoresis system were printed using additive technologies. Conclusions. Digital models were developed and spare parts and consumables for various analytical equipment were printed. The surface structure of the obtained samples was smooth enough to ensure tightness of the joints and did not require post-processing. At the same time, it was found that in contact with methanol and acetonitrile, in products made of the used plastics quickly enough brittleness appeared or there was a noticeable swelling, making it difficult or impossible to use the printed products. This fact indicates the need for additional research on the properties of photopolymer resins before using the parts obtained from them in a particular analytical equipment.

*Keywords: 3D printing, additive technologies, parametric modeling, liquid chromatography, ICP-MS, capillary electrophoresis.*

## Введение

На сегодняшний день одним из бурно развивающихся и перспективных направлений является 3D-печать. В основе данной технологии лежит принцип послойного создания физической модели, в то время как в классических методах производства используется удаление лишнего материала за счет механической обработки готового объекта [1]. В зависимости от процесса нанесения слоев и используемых для печати материалов выделяют 5 основных методов 3D-печати: экструзионный, порошковый, стереолитографический, струйный и метод ламинирования [2].

Основные достоинства аддитивных технологий – создание структур крайне высокой сложности, с минимальной возможностью ошибки во время процесса изготовления, высокая точность получаемых объектов, относительная простота в использовании и дешевизна, доступность широкому кругу людей (нет необходимости в специальном образовании) [3].

В фармации 3D-технологии применяются с целью быстрого создания виртуальной модели уникальных изделий со сложной геометрией поверхностей, а также создания лекарственных средств с контролируемыми профилями высвобождения и персонализированными свойствами [4]. В медицине актуальными направлениями являются изготовление протезов и их элементов с учётом индивидуальных анатомических особенностей пациента [5] и печать живых органов и тканей как с целью изучения на них фармако-

логических свойств лекарственных средств, отработки навыков оперативных вмешательств, так и их трансплантации [6-8]. В стоматологии аддитивные технологии используются для создания демонстрационных моделей, зубных слепков и сверильных хирургических шаблонов. Также из материалов 3D-печати изготавливают коронки, съёмные протезы, виниры, элайнеры [9, 10].

Быстрое прототипирование позволяет оперативно оценить соответствие цифровых моделей их функциональному назначению и, при необходимости, скорректировать их. Это ускоряет работу на этапе проектирования, снижает затраты материалов [11, 12]. Себестоимость деталей, напечатанных с применением аддитивных технологий, является достаточно низкой, в частности, из-за минимизации отходов по сравнению с традиционными методами производства и большей доступности 3D-оборудования с соответствующими материалами, что связано с окончанием сроков действия патентов на данную технологию [13].

В настоящее время функционирование аналитических лабораторий невозможно без использования инструментальных методов анализа, которые требуют дорогостоящего аналитического оборудования. Обслуживание такого оборудования может быть затруднено ввиду невозможности закупки отдельных инструментов или расходных материалов, вышедших из строя в результате длительной эксплуатации. Кроме того, ряд рутинных операций по обслуживанию аналитического оборудования может быть облегчен благодаря изготовлению уникальных инструментов,

необходимых для оптимизации ряда манипуляций в процессе решения узконаправленных задач по обслуживанию аналитического оборудования. Таким образом, для удовлетворения потребностей в запасных частях и расходных материалах для обслуживания аналитического оборудования нами впервые предложено использование технологии 3D-печати.

Цель исследования – оценить возможность изготовления отдельных запасных частей, расходных материалов и инструментов для аналитического оборудования стереолитографическим методом 3D-печати.

### Материал и методы

В качестве 3D-принтера был выбран фотополимерный принтер Anycubic Photon ввиду его высокой разрешающей способности и свойств используемых для печати материалов. В основе работы данного типа принтеров лежит инициализируемая УФ-излучением свободно-радикальная полимеризация акрилатных мономеров и олигомеров, позволяющая получить достаточно устойчивый сверхсшитый материал [3].

Выбор фотополимерных смол в качестве материалов для печати был обусловлен их физико-химическими свойствами, указанными производителем. Для печати большинства вышеуказанных расходных материалов и запасных частей использовали фотополимерную смолу Anycubic Basic с универсальным набором свойств (достаточная механическая прочность, химическая устойчивость к части органических и большинству неорганических растворителей, растворам с широким диапазоном значений pH). Для печати инструмента для установки фитингов и переходников для присоединения стеклянного фильтра к капилляру была использована смола повышенной прочности eSUN Hard-Tough Resin, что связано с необходимостью обеспечения устойчивости моделей к приложению изгибающих и сдвигающих сил, а также обеспечения структурной целостности тонкостенных объектов. Смолу Voxelab Standard Photopolymer Resin использовали для печати прозрачных объектов (фильтров и крышек для емкостей с подвижной фазой). Для печати моделей переходников для измерения давления в газовых магистральных низкого давления и вставок для крышек для емкостей с подвижной фазой использовали гибкую смолу eSUN Flex в связи с необходимостью наличия свойств упру-

гой деформации у готовых изделий. При необходимости, детали подвергали дополнительному облучению ультрафиолетовым светом с длиной волны 405 нм для завершения процессов полимеризации смолы.

При разработке трехмерных моделей в качестве прототипов использовали оригинальные детали оборудования: коннекторы жидкостного хроматографа Agilent 1260 с дюймовыми резьбами 1/4-28 и 10-32, заглушки для колонок, фильтр для подвижной фазы, комплектные крышки для емкостей с подвижной фазой, манометр с метрической резьбой, магистрали блока газораспределения масс-спектрометра Varian 810/820MS, систему подключения высоковольтных проводов к кассете системы капиллярного электрофореза Капель-205. Измерения производили штангенциркулем с точностью 0,05 мм.

В качестве программного обеспечения использовали: CAD-программу Autodesk Fusion 360 (создание трехмерной цифровой модели с помощью параметрического моделирования), программу-редактор Meshmixer (доработка и подготовка модели, исправление дефектов, при необходимости), программу-слайсер Photon Workshop (создание набора инструкций для 3D-принтера).

После печати проводили оценку готовых изделий на соответствие полученных функциональных свойств ожидаемым. Для деталей, предназначенных для соединений различных расходных материалов с элементами оборудования, определяющим фактором являлась герметичность, их устойчивость к воздействию растворов с различными значениями pH и действию метанола и ацетонитрила. Модели с резьбовым типом соединения оценивали по фактически полученным размерам, качеству поверхности и устойчивости резьбы к многократному использованию. Герметичность соединений напечатанных изделий оценивали путем подачи жидкости под давлением (до 5 атмосфер).

Дополнительно у всех полученных изделий осуществлялась оценка соответствия линейным размерам (с помощью штангенциркуля ШЦ-1 с ценой деления 0,05 мм) и проверка всех полученных объектов на их устойчивость к изгибающим и сдвигающим силам.

### Результаты и обсуждение

При создании объектов с использованием аддитивных технологий нами были использованы

различные подходы, но наиболее рациональным, с практической точки зрения, являлся следующий алгоритм моделирования и печати:

– Создание трёхмерной цифровой модели объекта (Autodesk Fusion 360).

Основа для модели представляла собой плоскостную проекцию с указанием размеров, которая основывалась на прототипе или создавалась исключительно с применением параметрического моделирования ввиду отсутствия аналога.

– Экспорт созданной 3D-модели в STL-формат, и, при необходимости, ее доработка (Autodesk Fusion 360, Meshmixer).

В полученных файлах формата stl модель была представлена совокупностью координат вершин треугольников различной формы и размеров (полигонов), которые и составляли модель. Цифровая модель просматривалась на наличие дефектов (например, вывернутых полигонов). Такие дефекты могут возникать при некорректном переносе файла между программами. При их обнаружении исправление проводили с помощью инструментов программы-редактора.

– Выбор метода печати и материалов.

В связи с необходимостью получения химически устойчивых (по отношению к компонентам подвижной фазы, используемой в обращенно-фазовой хроматографии) малоразмерных объектов с большим количеством функционально значимых деталей был выбран фотополимерный принтер и соответствующие смолы для печати.

– Создание набора инструкций для 3D-принтера, выбор условий печати (Photon Workshop).

Для превращения файла формата \*.stl, содержащего информацию о трёхмерной структуре объекта, в файл формата \*.photon, представляющий набор инструкций для 3D-принтера, использовали специальную программу-слайсер. Выбор условий печати включал в себя установление оптимальных времени экспозиции и толщины слоя, влияющих на достижение требуемой прочности и детализации структуры, и осуществлялся индивидуально для конкретной модели. Например, уменьшение толщины слоя по оси Z с 0,05 мм на 0,025 мм позволяло увеличить разрешающую способность в 2 раза при печати вертикальных структур, что имело принципиальное значение при воспроизведении дюймовых резб на объектах малого размера.

Не менее значимым параметром для увеличения точности печати и прочности получаемых моделей являлось их расположение на рабочем

столе принтера. Выбор правильной ориентации моделей обеспечивал не только надежную фиксацию объектов на рабочем столе принтера (без использования структур поддержки), но и устойчивость распечатанных изделий к механическим нагрузкам по соответствующим осям, что, соответственно, улучшало эксплуатационные свойства моделей.

– Подготовка 3D-принтера к работе.

Специальную емкость заполняли фотополимерной смолой, в принтер загружали файлы и запускали печать.

– Постобработка (финишная обработка) изделия.

Готовую деталь отделяли от платформы принтера, отмывали изопропанолом от незатвердевших остатков фотополимера. При необходимости (недостаточная жесткость изделия, липкость (после отмывки) поверхности изделия), проводили дополнительную фотополимеризацию. Для этого использовали полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм.

В результате проведенной работы, с помощью аддитивных технологий было напечатано 11 объектов в требуемых количествах, необходимых для технического обслуживания и ремонтных работ аналитического оборудования (жидкостные хроматографы Agilent 1100-1260, система капиллярного электрофореза Капель-205, система ICP-MS 810/820MS):

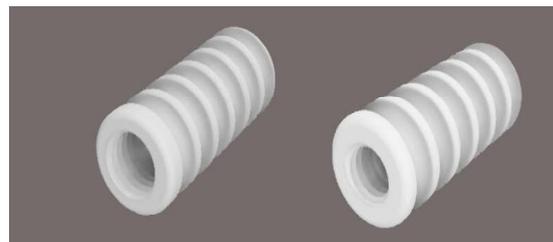
– Инструмент для установки фитингов гидравлических систем жидкостного хроматографа в труднодоступных местах.

Эксплуатация жидкостных хроматографов компании Agilent Technologies требует специальных инструментов и наличия запасных частей, приобретение которых может быть затруднено невозможностью их приобретения в единичных экземплярах либо наличием только в составе комплексных, и, как следствие, дорогостоящих наборов для проведения технического обслуживания.

С помощью параметрического моделирования был разработан оптимальный по форме инструмент (рис. 1), обеспечивающий удобное обслуживание блоков жидкостного хроматографа. Для создания инструмента с характерной геометрией внутренней поверхности были измерены фитинги блоков дегазации и смешивания компонентов подвижной фазы. Наружную поверхность инструмента проектировали из соображений обеспечения удобства удержания в руке.



Рисунок 1 – Цифровая модель и внешний вид инструмента для установки фитингов



a

b

a

b

Рисунок 2 – Цифровая модель и внешний вид переходников шприц-капилляр:  
a – переходник с резьбой ¼-28, b – переходник с резьбой 10-32

Установлено, что конструкция обладала достаточной жесткостью и являлась эргономичной. При периодическом использовании в течение 6 месяцев дефекты (трещины, сколы) не обнаружены.

– Переходники шприц-капилляр под фитинги двух типов с дюймовыми резьбами 10-32 и ¼-28.

Для удаления пузырьков воздуха из гидравлических магистралей низкого давления, заполненных компонентами подвижной фазы, и обеспечения бесперебойной работы жидкостного хроматографа в наборе для пусконаладочных работ раньше предусматривался специальный переходник для подключения и прокачки вручную магистралей медицинским шприцом. При разработке моделей переходников (рис. 2) для подключения медицинских шприцов к капиллярам были использованы фитинги от жидкостного хроматографа Agilent 1100 с размерами дюймовых резьб ¼-28 и 10-32 и носики шприцов типа Луер.

Соединения обладали достаточной герметичностью в условиях проведения регламентных работ. Стоит отметить: в результате эксплуатации таких деталей при непрерывной прокачке подвижной фазы с высоким содержанием метанола и ацетонитрила через час наблюдали появление трещин и повышение хрупкости изделия. Таким образом, данные переходники можно рекомендо-

вать использовать только в условиях кратковременного контакта с метанолом и ацетонитрилом.

– Переходники для присоединения стеклянного фильтра к капилляру.

Имеющиеся в продаже фильтры предусматривают установку на входные капилляры через специальные пластиковые переходники, не входящие в комплект и доступные для приобретения только в составе полного комплекта входных капилляров блока дегазации подвижной фазы. Переходники (рис. 3) с капилляра на фильтры необходимы для подключения фильтров для очистки компонентов подвижной фазы перед поступлением в гидравлические магистрали жидкостного хроматографа.

Функциональные свойства переходников подтверждены в ходе эксплуатации (деталь соответствовала размерам, имела достаточную жесткость, соединение было герметичным). Однако ограничением для использования данных переходников являлся контакт с подвижными фазами, содержащими большое количество метанола и ацетонитрила, значительно повышавшего хрупкость изделий.

– Фильтры для подвижной фазы.

Благодаря 3D-технологии созданы фильтры оригинальной конструкции для подвижной фазы



Рисунок 3 – Цифровая модель и внешний вид переходника стеклянный фильтр-капилляр



Рисунок 4 – Цифровая модель и внешний вид фильтров для подвижной фазы

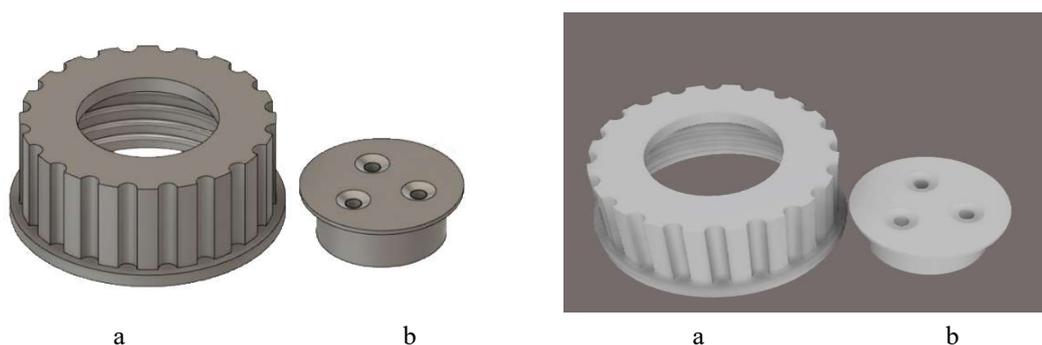


Рисунок 5 – Цифровая модель и внешний вид крышки со вставкой для ёмкости с подвижной фазой:  
а – крышка, б – вставка

(рис. 4), не уступающие по эксплуатационным свойствам оригинальным, но содержащие меньшее количество деталей и более удобные для 3D-печати. После печати, к нижней части корпуса фильтров приклеивали (фотополимерной смолой) фильтрующий элемент в виде сетки из гидрофилизированного полипропилена.

Благодаря прозрачности фильтра визуально фиксировали наличие пузырей воздуха и очистку подвижной фазы от грубодисперсных частиц. Полученные фильтры не бьются (в отличие от оригинальных стеклянных фильтров), но допускают использование только в среде неорганических растворителей (во избежание преждевременного разрушения пластика из-за набухания полимера). Изготовленные таким способом фильтры исполь-

зуются в качестве временной замены оригинальных фильтров.

– Крышки со вставками для емкости с подвижной фазой.

В случае утраты эксплуатационных свойств оригинальных крышек или вставок для емкостей с подвижной фазой отдельное их приобретение невозможно. Разработанные вставки в крышки (рис. 5) имеют специальную конструкцию, предусматривающую фиксацию капилляров в емкости, уравнивание атмосферного давления внутри и снаружи сосуда, а также минимизацию испарения органических компонентов подвижных фаз.

При эксплуатации изделий подтверждена герметичность конструкции. Однако вставка, на-

печатанная из гибкой смолы, при использовании в емкости с метанолом и ацетонитрилом в течение первых суток резко увеличилась в объёме и потеряла прочность. Данный факт можно объяснить интенсивным поглощением паров органических растворителей данным конкретным видом фотополимерной смолы, т.к. с крышкой (из фотополимерной смолы повышенной жесткости) видимых изменений и ухудшение прочностных характеристик в контакте с парами метанола отмечено не было.

– Заглушки для хроматографических колонок.

После завершения работы на жидкостном хроматографе, с целью обеспечения долговременного хранения хроматографических колонок и сохранения свойств сорбента, колонки заполняют консервирующим раствором и герметично закрывают специальными заглушками. В случае утраты комплектных заглушек их приобретение возможно только в больших количествах, что нецелесообразно ввиду малой потребности в данных элементах. В качестве прототипа для заглушки (рис. 6) был использован оригинальный образец типовой дюймовой резьбой 10-32 UNF.

Стоит отметить, что при хранении хроматографических колонок в качестве консервирующего раствора используется метанол или ацетонитрил в соотношении с водой 8:1 или 9:1, для предотвращения загрязнения колонок остатками низкомолекулярных фрагментов фотополимерных смол такие заглушки можно рекомендовать лишь в качестве временной замены оригинальным.

– Заглушки на шприцы с техническими жидкостями.

Для удобства дозирования консистентной смазки для узлов аналитического оборудования (варипипетки, блок насоса жидкостного хроматографа и др.) зачастую их из больших емко-

стей переносят в одноразовые шприцы. Однако в стандартной комплектации медицинских шприцов отсутствуют заглушки. В связи с чем возникла необходимость в печати заглушек (рис. 6), позволяющих хранить небольшие количества смазки для удобного и точечного нанесения. Выбор фотополимерной смолы Anycubic Basic с универсальным набором свойств обеспечивает химическую устойчивость разработанных заглушек по отношению к различным составам консистентных смазок, а также их относительно низкую стоимость.

Соответствие заглушек на шприцы функциональным свойствам полностью подтверждено экспериментально.

– Переходники для измерения давления в газовых магистралях низкого давления.

При выполнении работ по проверке работоспособности системы газораспределения газовых хроматографов, масс-спектрометров, ICP-MS систем и иного оборудования требуется периодический мониторинг низкого давления в магистралях с помощью специальных манометров с подходящими рабочими диапазонами измерения. Для этой цели требуются переходники с резьбами, которые могут отличаться по типу, диаметру и направлению: одна резьба для присоединения самого манометра, другая – для подключения к магистрали. Стоит отметить, что различные манометры зачастую имеют различные посадочные гнезда, в связи с этим при смене манометров подбор переходника для конкретной цели с необходимой комбинацией двух типов резьб затрудняется, а закупка большого количества переходников нецелесообразна.

С помощью инструментов 3D-моделирования был разработан переходник с одним типом резьбы (для манометра), который с противоположной

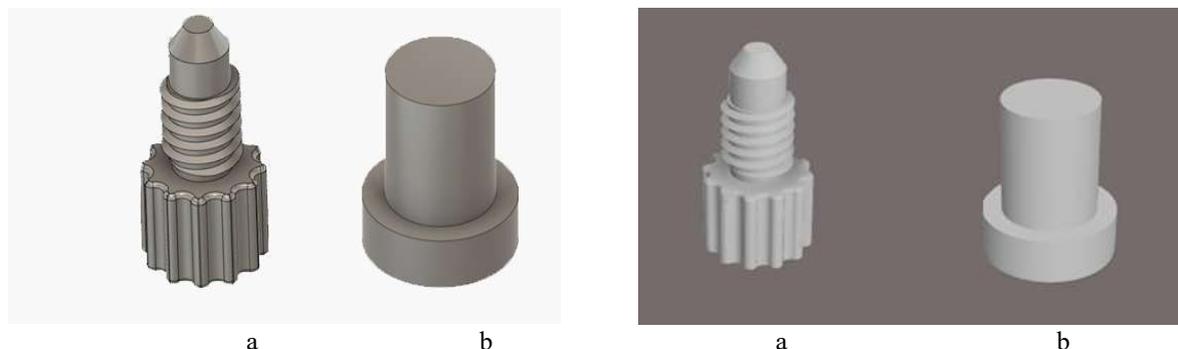


Рисунок 6 – Цифровая модель и внешний вид заглушек:  
а – заглушка для хроматографических колонок, б – заглушка на шприцы

стороны напрямую сообщается и самоуплотняется в магистрали благодаря конусности (рис. 7). Такая конструкция позволяет быстро измерять давление различными типами манометров без использования дополнительных переходников, что облегчает пусконаладочные работы и текущее обслуживание аналитических приборов.

Стоит отметить, что со временем переходники потеряли эластичность, в результате чего ухудшалось самоуплотнение, что напрямую влияло на их эксплуатационные свойства.

– Инструмент для установки высоковольтных проводов коммуникаций системы капиллярного электрофореза.

При работе системы капиллярного электрофореза Капель-205 высоковольтный блок обеспечивает регулируемую подачу напряжения во входную и выходную ячейки. При проведении текущего обслуживания или ремонтных работ может возникать необходимость очистки входной ячейки, что требует демонтажа высоковольтного провода, подключаемого в труднодоступном месте. Для облегчения указанных работ разработан инструмент (рис. 8) специальной формы, обеспечивающей легкий доступ к элементам крепления высоковольтного провода. При проектировании внутренней части модели измерены параметры оригинальной гайки размером 10 мм. Разрез по всей длине инструмента обеспечивает свободное вхождение провода для сохранения его целостно-

сти. Модель полностью соответствует ключевым параметрам оценки свойств готового изделия (устойчивость к изгибающим силам, отсутствие хрупкости, сохранение жесткости конструкции при закручивании и откручивании).

Стоит отметить, что при оценке соответствия всех описанных выше изделий линейным размерам цифровой модели отклонение не превышало 2,7%, что не повлияло на их эксплуатационные свойства.

## Заключение

Разработаны цифровые модели и выполнена печать запасных частей и расходных материалов для различного аналитического оборудования. Современные стереолитографические 3D-принтеры (даже простые, типа Anycubic Photon) позволяют воспроизводить форму и размеры цифровых моделей с достаточной точностью для непосредственного практического применения распечатанных изделий. Структура поверхности полученных образцов была достаточно ровной для обеспечения герметичности соединений и не требовала постобработки. Вместе с тем, было выявлено, что при контакте с метанолом и ацетонитрилом у изделий из использованных пластиков достаточно быстро появлялись хрупкость или заметное набухание, затруднявшие или делавшие невозможным использование

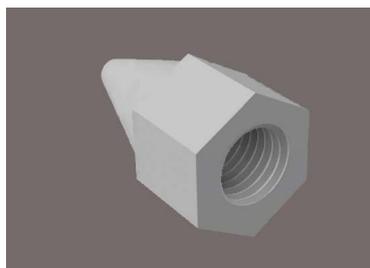
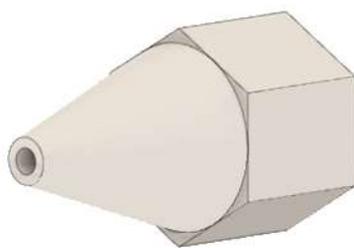


Рисунок 7 – Цифровая модель и внешний вид переходников для измерения давления в газовых магистралях низкого давления

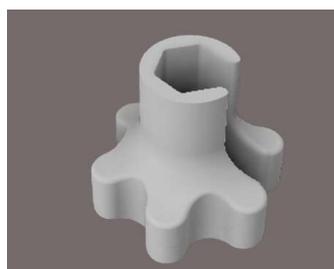
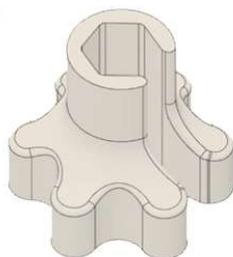


Рисунок 8 – Цифровая модель и внешний вид инструмента для снятия и установки высоковольтного провода системы капиллярного электрофореза

распечатанных изделий. Данный факт указывает на необходимость проведения дополнительных исследований свойств фотополимерных смол перед использованием полученных из них деталей в конкретном аналитическом оборудовании.

### Литература

1. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Загл. с экрана. То же. Режим доступа: <http://clar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6617/1/Shkuro.pdf>. Дата доступа: 20.03.2023.
2. Малаев, И. А. Аддитивные технологии: применение в медицине и фармации / И. А. Малаев, М. Л. Пивовар // Вестн. фармации. 2019. № 2. С. 98–107.
3. Бабкин, О. Э. 3D макетирование: технологии, оборудование, материалы / О. Э. Бабкин. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУКиТ, 2013. 97 с.
4. Модификации аддитивных технологий для получения лекарственных форм / К. В. Алексеев [и др.] // Рос. биотерапевт. журн. 2020. Т. 19, № 1. С. 13–21.
5. Сергеев, Г. К. Разработка пластикового протеза сустава и костно-замещающего материала, изготовленного методом 3D-печати / Г. К. Сергеев // Актуальные проблемы теоретической, экспериментальной, клинической медицины и фармации : материалы 52-й ежегод. всерос. конф. студентов и молодых ученых, Тюмень, 12 апр. 2018 г. / Тюмен. гос. мед. ун-т ; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. Тюмень, 2018. С. 347.
6. Implementation of 3D Printing Technology in the Field of

- Prosthetics: Past, Present, and Future / A. Manero [et al.] // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019 May. Vol. 16, N 9. Apr. 1641.
7. In vivo and ex vivo methods of growing a liver bud through tissue connection / Y. Yanagi [et al.] // Sci.c Rep. 2017 Oct. Vol. 7, N 1. Art. 14085.
8. Albritton, J. L. 3D bioprinting: improving in vitro models of metastasis with heterogeneous tumor microenvironments / J. L. Albritton, J. S. Miller // Dis. Models Mech. 2017 Jan. Vol. 10, N 1. P. 3–14.
9. Эртесян, А. Р. Обзор технологий 3D-печати в стоматологии / А. Р. Эртесян, М. И. Садыков, А. М. Нестеров // Мед.-фармацевт. журн. «Пuls». 2020. Т. 22, № 10. С. 15–18.
10. Ли, Ф. С. Использование 3D-технологий в стоматологии / Ф. С. Ли // Достижения и перспективы развития молодежной науки : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 25 дек. 2019 г. / под общ. ред. А. Б. Черемисина. Петрозаводск : МЦНП «Новая наука», 2019. С. 440–444.
11. Рощин, В. С. Методы 3D моделирования с применением современных компьютерных технологий / В. С. Рощин, А. В. Канатов, В. В. Сторожев // Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности (ИНТЕКС-2015) : всерос. науч. студенч. конф., 14-16 апр. 2015 г. : сб. материалов. Ч. 2 / Моск. гос. ун-т дизайна и технологии ; редкол.: М. Г. Балыхин [и др.]. Москва, 2015. С. 61–62.
12. Полонцов, С. М. Технологии быстрого прототипирования в современном производстве / С. М. Полонцов // Науч. альм. 2020. № 4-1. С. 58–59.
13. Мальцева, О. В. Развитие мирового рынка 3D-принтеров / О. В. Мальцева // Рос. внешнеэконом. вестн. 2018. № 9. С. 88–97.

Поступила 14.02.2023 г.

Принята в печать 17.04.2023 г.

### References

1. Shkuro AE, Krivonogov PS. 3D printing technologies and materials: ucheb posobie. Ekaterinburg, RF: Ural gos lesotekh un-t; 2017. 1 elektron opt disk (CD-ROM). Zagl s ekrana. To zhe. Rezhim dostupa: <http://clar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6617/1/Shkuro.pdf>. Data dostupa: 20.03.2023. (In Russ.)
2. Malaev IA, Pivovar ML. Additive Technologies: Applications in Medicine and Pharmacy. Vestn Farmatsii. 2019;(2):98-107. (In Russ.)
3. Babkin OE. 3D modeling: technology, equipment, materials. St. Petersburg, RF: Izd-vo SPbGUKiT; 2013. 97 p. (In Russ.)
4. Alekseev KV, Blynskaya EV, Tishkov SV, Alekseev VK, Ivanov AA. Modifications of additive technologies for the production of dosage forms. Ros Bioterapevt Zhurn. 2020;19(1):13-21. (In Russ.)
5. Sergeev GK. Development of a 3D-printed plastic joint prosthesis and bone substitute material. V: Tyumen gos med un-t; Medvedeva IV, Petrov IM, Solov'ev GS, Panteleev SM, red. Aktual'nye problemy teoreticheskoi, eksperimental'noi, klinicheskoi meditsiny i farmatsii: materialy 52-i ezhegod

- vseros konf studentov i molodykh uchenykh, Tyumen', 12 apr 2018 g. Tyumen, RF; 2018. P. 347. (In Russ.)
6. Manero A, Smith P, Sparkman J, Dombrowski M, Courbin D, Kester A, et al. Implementation of 3D Printing Technology in the Field of Prosthetics: Past, Present, and Future. Int J Environ Res Public Health. 2019 May;16(9):1641. doi: 10.3390/ijerph16091641
7. Yanagi Y, Nakayama K, Taguchi T, Enosawa S, Tamura T, Yoshimaru K, et al. In vivo and ex vivo methods of growing a liver bud through tissue connection. Sci Rep. 2017 Oct 26;7(1):14085. doi: 10.1038/s41598-017-14542-2
8. Albritton JL, Miller JS. 3D bioprinting: improving in vitro models of metastasis with heterogeneous tumor microenvironments. Dis Model Mech. 2017 Jan;10(1):3-14. doi: 10.1242/dmm.025049
9. Ertesyan AR, Sadykov MI, Nesterov AM. Overview of 3D printing technologies in dentistry. Med-farmatsevt Zhurn Pul's. 2020;22(10):15-8. (In Russ.)
10. Li FS. Using 3D technology in dentistry. V: Cheremisin AB, red. Dostizheniya i perspektivy razvitiya molodezhnoi nauki: sb st Mezhdunar nauch-prakt konf, Petrozavodsk, 25 dek 2019 g. Petrozavodsk, RF: MTsNP Novaya nauka; 2019. P. 440-4. (In Russ.)

11. Roshchin VS, Kanatov AV, Storozhev VV. 3D modeling methods using modern computer technology. V: Mosk gos un-t dizaina i tekhnologii; Balykhin MG, Oleneva OS, Vinogradova YuV, Rybaulina IV, Razumeev KE, Kirsanova EA, red. Innovatsionnoe razvitie legkoi i tekstil'noi promyshlennosti (INTEKS-2015): vseros nauch studench konf, 14-16 apr 2015 g: sb materialov. Ch 2. Moscow, RF; 2015. P. 61-2. (In Russ.)
12. Polontsov SM. Rapid prototyping technologies in modern manufacturing. Nauch AI'm. 2020;(4-1):58-9. (In Russ.)
13. Maltseva OV. Development of the global 3D printer market. Ros Vneshneekonom Vestn. 2018;(9):88-97. (In Russ.)

*Submitted 14.02.2023*

*Accepted 17.04.2023*

**Сведения об авторах:**

А.Я. Ефремова – студентка 5 курса фармацевтического факультета, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, <https://orcid.org/0000-0002-3302-1794>,

e-mail: [anna2013efr@gmail.com](mailto:anna2013efr@gmail.com) – Ефремова Анна Ярославовна;

М.Л. Пивовар – к.ф.н., доцент кафедры токсикологической и аналитической химии, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, <https://orcid.org/0000-0003-4287-813X>;

М.Н. Сабодина – к.х.н., доцент кафедры токсикологической и аналитической химии, Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, <https://orcid.org/0000-0002-2678-4523>.

**Information about authors:**

A.Ya. Efremova – the fifth-year pharmaceutical student, Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, <https://orcid.org/0000-0002-3302-1794>,

e-mail: [anna2013efr@gmail.com](mailto:anna2013efr@gmail.com) – Anna Ya. Efremova;

M.L. Pivavar – Candidate of Pharmaceutical Sciences, associate professor of the Chair of Toxicological & Analytical Chemistry, Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, <https://orcid.org/0000-0003-4287-813X>;

M.N. Sabodina – Candidate of Chemical Sciences, associate professor of the Chair of Toxicological and Analytical Chemistry, Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, <https://orcid.org/0000-0002-2678-4523>.