

Применение аддитивных технологий в аналитической химии

Д. А. Трофимов¹, А. А. Ушкарев¹

УДК 543.07

Сегодняшний день отмечен активным внедрением в различные сферы науки и производства аддитивных технологий, позволяющих создавать устройства, функциональные прототипы и конструкции со сложной геометрией. Использование аддитивных технологий в аналитической химии открывает новые возможности перед исследователями: существенно сокращаются временные и экономические затраты на разработку и изготовление новых устройств, реакторов, специализированной химической посуды и т. п. Одно из наиболее перспективных направлений связано с применением 3D-печати для создания нового оборудования и выпуска деталей со сложной внутренней пространственной конфигурацией, в том числе для ремонта аналитического оборудования. В статье приведено описание оборудования и материалов, используемых в аддитивных технологиях, и примеры успешного их применения для решения задач аналитической химии.

Ключевые слова: аналитическая химия, аддитивные технологии, 3D-печать, анализ, микрореактор, аналитическое оборудование

Введение

Технологии производства, которые позволяют создавать и печатать изделия по данным 3D-модели путем последовательного нанесения материала, получили название аддитивных (от английского слова add – добавлять). Они отличаются разнообразием и классифицируются в зависимости от способа физического и химического воздействия на материал [1]. Среди них фотополимеризация, экструзия материалов, струйное моделирование, плавка порошков, плавка материала лазером и др.

Одно из ключевых преимуществ аддитивных технологий заключается в возможности создания деталей сложной формы, в частности с замкнутой структурой, в короткие сроки, что ранее требовало выполнения множества операций и применения различных станков [2]. С помощью аддитивных

технологий становится возможным получать изделия с заданными физико-механическими и химическими свойствами, применяя разнообразные материалы печати и комбинируя их. Это позволяет улучшить характеристики готовых изделий, такие как теплопроводность, электропроводность и химическая стойкость, снизить массу, повысить точность воспроизведения и их прочность. Аддитивные технологии также способствуют автоматизации производственных процессов и уменьшению доли человеческого участия. Для работы с пятью-десятью принтерами достаточно одного оператора. 3D-печать позволяет воспроизводить модель, разработанную в системе автоматизированного проектирования с требуемой точностью, зависящей от технологии. Благодаря сокращению количества используемого оборудования, времени на его перенастройку, затрат энергии и материалов, а также повышению скорости [3] и уменьшению доли брака, технологии 3D-печати приобретают особую значимость в различных областях науки и техники.

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН.

Принтеры и материалы

Известно несколько методов 3D-печати, которые различаются по типу используемого материала и способу его нанесения [4]. Среди наиболее популярных и распространенных можно выделить следующие технологии печати: FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) и EBM (Electron Beam Melting).

FDM-технология – наиболее распространенный и доступный вид 3D-печати [5], основанный на экструзии, то есть нанесении материала в жидком или расплавленном состоянии с последовательным формированием слоев. Термопластик проходит через горячее сопло, плавится и сразу застывает. Экструдер и стол приводится в движение шаговыми двигателями, в процессе передвижения оставляя за собой пластик, слой за слоем, снизу вверх, воссоздавая 3D-модель. Расхождение с 3D-моделью обычно не более 0,1 мм. Это значение зависит от механики принтера и от характеристик материала. Для обычных шестеренок и бытовых нужд такой точности вполне достаточно. Но в некоторых отраслях точность готовой модели должна быть выше. На FDM 3D-принтере невозможно получить идеально гладкую поверхность. Слои на модели можно сгладить шлифовкой, шпатлеванием или обработав растворителем.

SLS и SLM – это технологии выборочного лазерного спекания и плавления порошковых материалов соответственно [6]. В этих процессах используются металл, керамика и порошковый высокотемпературный пластик. Порошковый материал наносится на поверхность рабочего стола и подвергается воздействию лазерного луча, в результате чего образуется твердый слой, соответствующий сечению 3D-модели. Процесс повторяется до получения готового изделия. Это одна из самых перспективных технологий 3D-печати. Она используется для создания прототипов и интеграции в небольшие производственные циклы, когда быстро требуется получить трудоемкое изделие для существующей приборной базы. SLM предлагает полную свободу проектирования, высокую точность и хорошие механические свойства, в отличие от FDM или SLA, поскольку может использоваться для печати также металл. Детали хорошо подходят для мелкосерийного производства функциональных и полufункциональных изделий и прототипов и могут использоваться в авиакосмической, энергетической, нефтегазовой, машиностроительной отраслях, в металлообработке, медицине, конструкторских бюро. К сожалению, на сегодняшний момент этот тип печати требует достаточно боль-

ших начальных вложений и, в связи с этим, при всех своих плюсах мало распространен в лабораторной практике.

Стереолитография, или SLA, представляет собой вторую по распространенности технологию 3D-печати после FDM [5], основанную на фотополимеризации материала под воздействием излучения с длиной волны 355–405 нм. Материал после химической реакции становится твердым, приобретая необходимую форму изделия. После того как засвеченный тонкий слой фотополимера затвердевает, ванна с материалом опускается вниз на расстояние от 0,01 до 0,10 мм. Эта операция повторяется до тех пор, пока изделие не будет готово. Первоначально источником УФ-излучения был лазер, что делало метод очень дорогим и мало распространенным. Но начиная с 2017 года появились две вариации этой технологии: DLP и LCD [4]. В DLP вместо лазера используется специальный проектор, а в LCD – монохромный дисплей высокого разрешения. DLP- и LCD-технологии 3D-печати предназначены для создания объектов с высокой степенью детализации, достигающей порядка 10–100 мкм, в зависимости от характеристик принтера. Основными недостатками фотополимерной печати являются: работа с жидкостью, необходимость в перерасходе материала на объемные поддерживающие структуры, промывки готового изделия от неотвержденной смолы, сушка и дополнительная засветка для отверждения, сложность печати одного изделия различными типами смол одновременно, а также невозможность печати замкнутых объемов без технологических отверстий. В результате процесса после удаления поддерживающих конструкций (рис. 1) и постобработки, получается изделие из твердого материала, которое легко склеивается, обрабатывается и окрашивается.



Рис. 1. Постобработка готового изделия, удаление «поддержек» [5]

Таблица 1. Основные характеристики разных технологий печати

Тип печати	Материалы	Разрешение	Достоинства	Недостатки
SLA	Фотополимерная смола: акрилонитрилбутадиен-стирол (АБС), полипропилен (ПП), нейлон, эластичные полимеры	10–100 мкм	Возможность использовать разнообразные фотополимерные материалы. Простота, высокое разрешение	Постобработка, удаление (промывка) не прореагировавшего материала, необходимость вентиляции при использовании некоторых видов смол
SLS / SLM	Порошки поливинилхлорид (ПВХ), поликарбонат (ПК), акрилонитрилбутадиен-стирол (АБС), металлов (Ti, Cu, Ag,.), керамические	10–100 мкм	Гибкость в выборе полимерных материалов, печать без поддержек. SLM предпочтительна для высокопрочных металлических деталей с точными геометрическими характеристиками	В некоторых случаях необходима постобработка. Ограниченное количество порошков металлов, подходящих для печати. Дороговизна изделий
FDM	Термопластичные полимеры, например, акрилонитрилбутадиен-стирол (АБС), полилактид (ПЛА), полиэтилентерефталат гликоль (ПЭТГ), термопластичные полиуретаны (ТПУ), полиамиды (ПА) и производные композиты (включения в материал различных металлов, керамики)	От 100 мкм	Хорошо изученные материалы. Возможность автоматизированной смены материалов во время печати. Недорогая широко доступная печать	Низкое разрешение, анизотропия изделий, как при печати, так и в процессе их использования

У прототипов изделий, созданных по этим технологиям, существует большое число преимуществ, таких как высокая точность, химическая стойкость, термостойкость, прогнозируемые физико-механические свойства в зависимости от типа полимера с относительно невысокими расходами по стоимости самих принтеров и расходных материалов к нему.

В табл. 1 приведены основные характеристики описанных ранее технологий печати. При выборе метода печати необходимо учитывать не только физико-химические и механические свойства материалов, разрешение печати, но и доступность принтеров, расходных материалов, скорость печати. В этом плане наиболее интересными вариантами для использования в научных целях являются технологии FDM и SLA [4, 6].

Химик-аналитик самостоятельно может разрабатывать прототипы изделий, нужного ему для исследований оборудования, используя простую последовательность действий (рис. 2). Использование аддитивных технологий позволяет в разы увеличить скорость прохождения этапов от идеи до создания изделия [8]. Для моделирования и конструирования аналитического оборудования используются различные системы автоматического проектирова-

ния, например «Компас 3D», SolidWorks или иные системы CAD.

В последние годы наблюдается значительный рост числа публикаций, посвященных применению 3D-печати [9] в производстве устройств для определения и подготовки образцов, используемых в методах разделения или в комбинации с ними. Известно множество вариантов применения аддитивных технологий [10]: создание установок, основанных на блочном принципе [11], устройств для твердофазной экстракции [12, 13], систем автома-

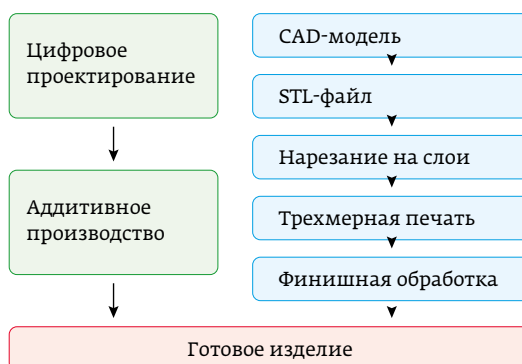


Рис. 2. Стадии аддитивного производства изделия [4]

тической экстракции [14, 15], установок очистки [16], устройств для отбора проб объектов окружающей среды [17, 18], 3D-печатных сорбентов [19] и проточных ячеек [20], реакторов [21, 22], электродов для электрохимических исследований [23], различных вариантов химической посуды и сопутствующих приспособлений [24, 25]. Возможно даже нетривиальное использование принтеров, например, для печати коллектора фракции [26].

Также в любой лаборатории возникают проблемы, связанные с ремонтом оборудования и заменой корпусов приборов и их внутренних элементов [27]. Например, авторам известен случай, когда при выходе из строя плунжерного насоса удалось оперативно произвести ремонт с заменой вышедших из строя частей, распечатав их методом SLA. Также зачастую есть потребность в использовании специфической посуды и оборудования [28], для этих целей также можно использовать 3D-печать. Технологии 3D-печати применяются достаточно широко в науке, в частности аналитической химии, рассмотрим некоторые из них.

Посуда и расходные материалы

3D-печать с применением технологии FDM является эффективным методом для создания лабораторной посуды, которая может быть использована, к примеру, для проведения процессов тонкого органического синтеза [24]. При этом следует учитывать пористость и шероховатость текстуры стенок печатной продукции, которые могут привести к адсорбции отдельных элементов или продуктов реакции, и необходимость тщательного тестирования реакторов на герметичность перед началом химического синтеза. Низкая стоимость пластика делает лабораторную посуду, созданную с помощью 3D-печати, привлекательным вариантом для одноразового использования в реакциях, катализируемых комплексами переходных металлов. Это позволяет избежать необходимости отмывать сосуды от каталитически активных соединений, которые могут быть активны даже в следовых количествах.

Как отмечалось выше, одним из ключевых достоинств техно-

логии FDM является доступность расходных материалов. Возможно не только разрабатывать, но и производить научно-исследовательское оборудование для лабораторий, создавая различные вспомогательные изделия [25]. Среди них – подставки для ампул, пробирок, виал, специальных ламп, а также запасные части для различного оборудования, например гильзы уникальной конструкции для центрифуги, подходящие под определенный тип пробирок (рис. 3).

Основные недостатки изделий, изготовленных по технологии FDM: низкая межслойная адгезия, а также невысокая химическая стойкость большинства используемых пластиков. Химические реакции обычно проводят в жидкой фазе с применением различных растворителей. Многие из этих растворителей способны эффективно растворять изделия, изготовленные из PLA и ABS-пластиков, которые наиболее подходят для печати.

Пластики PLA и ABS активно используются для создания экспериментальных систем и устройств для проведения исследований в неагрессивных средах в связи с их низкой химической стойкостью [29]. Однако существуют и химически устойчивые пластики, такие как полипропилен (PP) и полиоксиметилен (POM), с которыми успешно справляется



Рис. 3. Лабораторное оборудование, изготовленное методом FDM: а – круглая и коническая колбы, воронка, химический стакан, пробирки различных размеров; б – подставка под пробирки [24], в – подставка для трех пробирок, г – круглодонная колба, на «поддержках» [25]

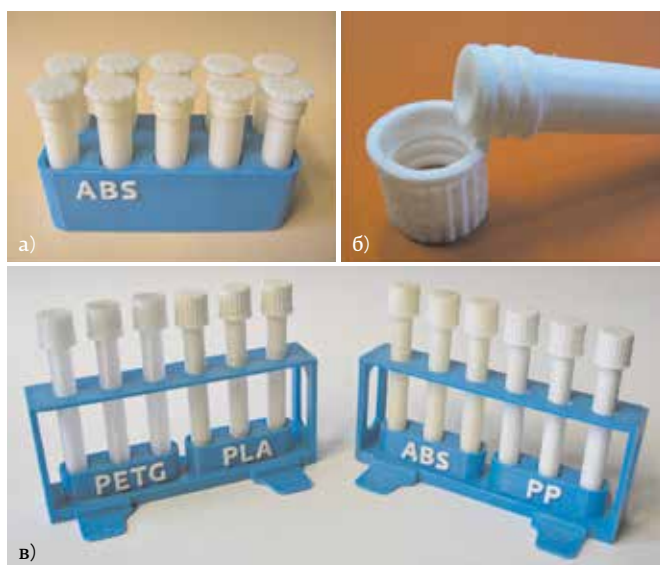


Рис. 4. Пробирки, напечатанные из различных типов пластика: а – короткие пробирки с безрезьбовыми крышками (ABS); б – резьба с 3D-печатью на внешней стороне трубки и внутри колпачка; в – удлиненные трубки с завинчивающимися крышками, изготовленные из различных материалов [29]

обычный FDM-принтер, изготавливая различные химические изделия (рис. 4).

Полипропилен, химически более стойкий материал для трехмерной печати, имеет ряд недостатков. Он отличается высокой усадкой, что приводит к искажению размеров изделий. Кроме того, полипропилен обладает сравнительно низкой адгезией к печатной платформе. Поэтому при проектировании изделий, которые будут контактировать с реакционной массой, необходимо учитывать все условия эксперимента и выбирать соответствующий материал.

Реакторы

Технология трехмерной печати зарекомендовала себя как универсальный инструмент для создания уникальных устройств, которые можно интегрировать в коммерческие проточные системы, а также использовать в спектроскопии и хроматографии для анализа и оптимизации химических реакций в режиме реального времени.

Ученые Калифорнийского университета разработали систему 3D-печатных блоков, аналогичных конструктору, которая предназначена для использования в химических и биологических лабораториях [11]. Каждый блок представляет собой отдель-

ное устройство, например, устройство для перекачки жидкости или прибор для измерения определенных параметров (рис. 5). Подобно детскому конструктору, блоки могут быть соединены друг с другом без лишних усилий.

Пользователи имеют возможность конструировать уникальные экспериментальные установки в соответствии с поставленными задачами и своими творческими замыслами. Это может быть как прибор для титрования, так и биореактор, и многие другие устройства.

Используя фотополимерную печать, возможно реализовать, к примеру, встроенную спектроскопическую проточную ячейку [30], которую легко подключить к лабораторному оборудованию, например ВЭЖХ. Однако материал на основе полиакрилата имеет низкую теплопроводность и для печати не подходит из-за проблем с распределением температуры и задержками при нагреве и охлаждении реакторов, что приводит к потере времени. Чтобы решить эту проблему, недавно с помощью технологии селективного лазерного спекания (SLM) были созданы реакторы из нержавеющей стали, способные работать при повышенных температурах и давлениях. В качестве примера можно привести многофункциональный термостойкий реактор из нержавеющей стали, соединенный с прибором ВЭЖХ. Это позволило создать полностью автоматизированную проточную систему [30].

Возможность использования 3D-печати и моделирования для создания индивидуальных сложных конструкций открывает широкие перспективы для разработки новых сложных устройств, предназначенных для извлечения и концентрирования образцов.

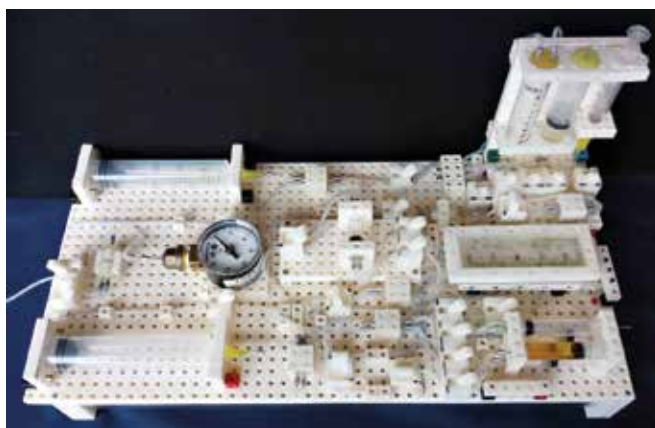


Рис. 5. Готовый прибор, собранный с помощью системы Multifluidic Evolutionary Component (MEC) [11]

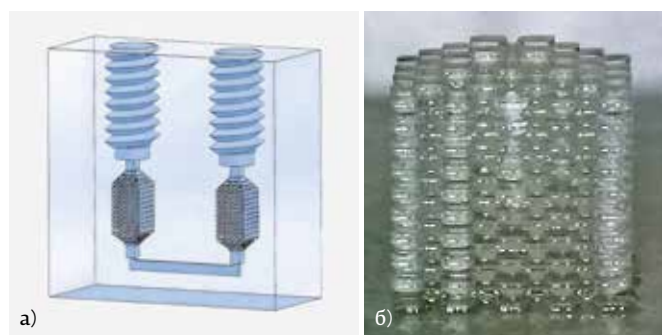


Рис. 6. Картридж SPE-преконцентратор для твердофазной экстракции: а – схема preconцентратора; б – фотография кубовидной структуры [31]

Примером является разработка уникального картриджа SPE-преконцентратора, который был напечатан с использованием стандартной полиакрилатной смолы без каких-либо дополнительных модификаций [31]. Картридж предназначен для селективного извлечения ионов следовых металлов из морской воды. При печати была создана упорядоченная пористая структура, состоящая из кубовидных образований, равномерно распределенных по всему экстракционному каналу. Новая конструкция устройства позволила создать экстракционную область с достаточно большой площадью поверхности, что обеспечивает улучшенное перемешивание жидкости и предотвращает закупорку проточных каналов между кубоидами (рис. 6).

С помощью 3D-печати изготовлена вся интегрированная колонна, включая внутренние распределители потока, внешние соединители и упаковку, что особенно актуально в условиях, когда традиционные методы производства не позволяют достичь таких сложных форм.

Технологии 3D-печати использовались для создания пористых колонок с точной геометрией внутренних пор [32], что позволило воссоздавать слои стационарной фазы с элементами, отличающимися от стандартных сфериче-

ских, с однородной пористостью по всему слою/объему, а также полностью контролировать морфологию и структуру упаковки.

Исследованы три геометрические формы неподвижной фазы: простая кубическая, параллельные каналы и «елочные» каналы (рис. 7). Форма «упаковочных элементов» представляла собой многогранники и многоугольники из-за ограничений программного обеспечения, в отличие от типичных сфер.

Еще один пример [20] практического использования 3D-печатных экстракционных устройств различной геометрии – работа, посвященная изучению экстракции сульфаниламида (SAS), лекарственного средства, которое широко применяется в медицине для лечения инфекционных заболеваний. Из-за плохой усвояемости организмом человека сульфаниламид выводится в окружающую среду в виде исходных соединений или продуктов метаболизма. Они рассматриваются как «псевдостойкие»

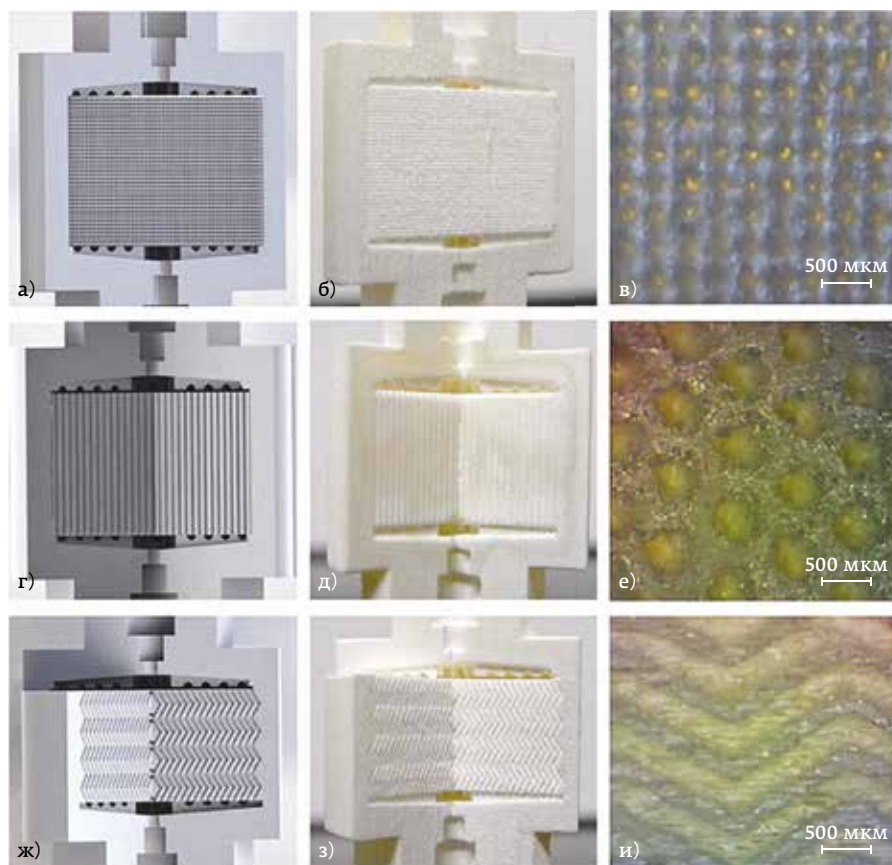


Рис. 7. Пористые колонки различной формы: а, б, в – кубической; г, д, е – с параллельными каналами; ж, з, и – в виде «елочных» каналов; где а, г, ж – графические изображения в виде чертежей САПР; б, д, з – распечатанная модель; в, е, и – структура каналов при 20-кратном увеличении [32]

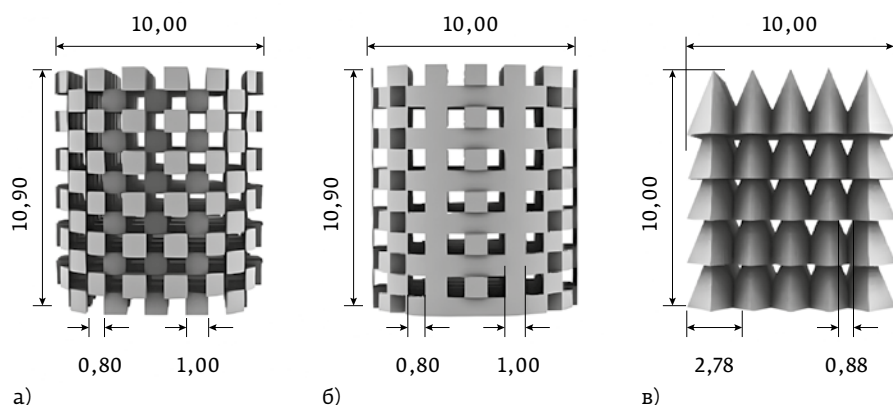


Рис. 8. Различная форма экстракционных устройств, изготовленных методом 3D-печати для извлечения SAS в виде: а – маленьких кубов; б – перпендикулярных прямых; в – небольших тетраэдров [20]

загрязнители, которые постоянно попадают в экосистему и плохо разлагаются. Это может привести к развитию устойчивых к ним бактерий и негативно повлиять на здоровье человека. Для извлечения SAS были изучены три конструкции устройств с различной геометрией. Они представляют собой упорядоченную структуру из взаимосвязанных геометрических элементов с параллельными каналами (рис. 8). Конструкция из небольших кубиков показала более высокую эффективность экстракции, вероятно, из-за централизованной кубической конфигурации структурных единиц. Устройство имеет большую площадь поверхности, что обеспечивает отличное взаимодей-

ствие с водным раствором и смолой SPE через каналы и уменьшает засорение. Эта конструкция была выбрана для дальнейших экспериментов.

Проведение серийных экспериментов при аналитических исследованиях часто требует одновременного тестирования нескольких образцов в одинаковых или различных условиях. Для изучения воздействия биологически активных веществ на культуры клеток была предложена многоканальная система, в монолитном корпусе которой выполнено восемь горизонтальных каналов со стандартными резьбовыми соедине-

ниями для подключения капилляров [21]. Каждый канал имеет боковое ответвление – камеру, отделенную проницаемой мембраной из поликарбоната, для размещения клеточных культур (рис. 9). Растворы веществ подаются через каналы по капиллярам, проникают через мембрану и воздействуют на клетки [21]. Устройство было испытано при изучении воздействия антибиотиков левофлоксацина и линезолида на эндотелиальные клетки артерий млекопитающих. Одновременно контролировали концентрацию препарата в растворе и жизнеспособность клеток.

Для извлечения алкилбензоата и триклозана из образцов человеческой слюны и мочи разработано устройство р-SPE [33]. Оно представляет собой микрофлюидное устройство, изготовленное из полиакрилатного композита по технологии SLA-печати. В его состав также входят наночастицы магнетита, модифицированные полианилином.

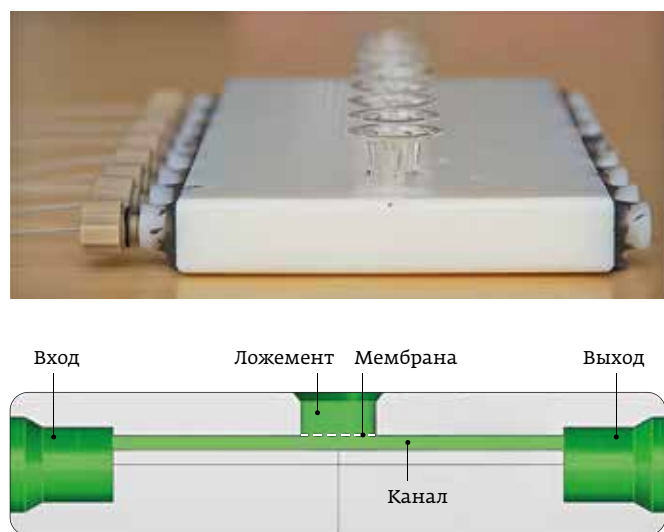


Рис. 9. Многоканальная система тестирования биологически активных веществ: общий вид и схема (вход и выход, канал для потока жидкости под мембраной) [21]

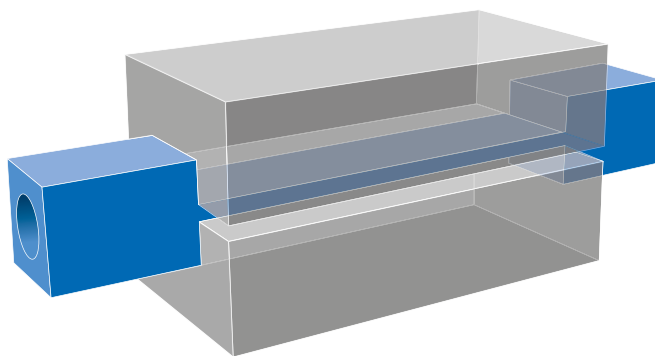


Рис. 10. Схема микрофлюидного устройства с внутренним каналом размером 800 мкм, где синим обозначен сам микроканал и ответные части для присоединения стандартных фитингов, серым – магниты NdFeB [33]

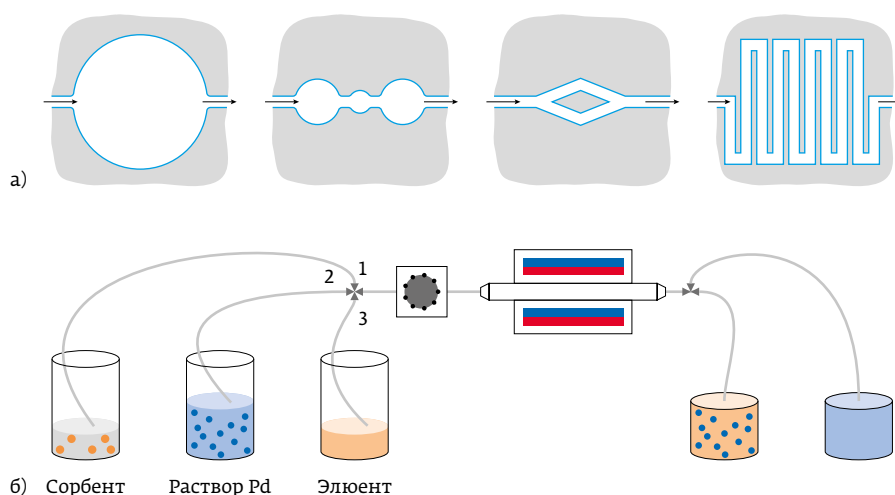


Рис. 11. Эскизы моделей ячеек (а) и схема магнитной твердофазной экстракции в динамическом режиме (б)

Устройство имеет прямоугольную форму с размерами $0,8 \times 3,0 \times 50$ мм и толщиной стенок 0,35 мм. В нем находятся два близко расположенных прямоугольных магнита, которые предназначены для удержания слоя наночастиц магнетита на месте (рис. 10). Устройство изготовлено с помощью 3D-печати и успешно интегрировано в систему ВЭЖХ. Оно использовалось более 20 раз, и погрешность работы составила менее 15%.

В ГЕОХИ РАН, в лаборатории концентрирования аддитивные технологии использовали для создания устройства (сорбционных ячеек различной формы, расположенных между постоянными магнитами), альтернативного традиционным набивным колонкам, для магнитной твердофазной экстракции Pd(II) из растворов разного состава в динамическом режиме (рис. 11 б). Устройство позволяет удерживать магнитный наносорбент $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PEG}@\text{Cyphos IL 101}$ в поле действия постоянных магнитов в распечатанных на 3D-принтере ячейках разной конфигурации (рис. 11 а).

Разработанную конструкцию использовали для изучения эффективности извлечения палладия в зависимости от размера и формы ячеек, массы сорбента, скорости пропускания анализируемого раствора, объема и скорости пропускания элюента. Установлены условия равномерного распределения сорбента для наилучшего контакта с анализируемым раствором в зависимости от форм ячейки и расположения источников магнитного поля. Динамическая емкость сорбента по отношению к Pd(II) из растворов 0,1 М HCl составила около 7,8 мг/г. Разработанный подход применили в проточном анализе Pd(II) в природных и сбросовых технологических водах.

Еще один очень интересный способ применения 3D-принтера связан с его способностью точного позиционирования в пространстве. В работе [26] описано создание коллектора фракций с помощью принтера и плат Arduino. Через экструдер принтера собираются образцы после разделения на хроматографической колонке, а благодаря столу с подогревом собранная жидкость одновременно выпаривается, так что в каждой ячейке остаются только нелетучие соединения в виде сухих порошков. Таким образом, собранные фракции могут быть немедленно использованы для различных химических измерений, включая анализ стабильных изотопов угле-

рода и азота, которые представляют основной интерес для исследователей. В итоге получилось эффективное и недорогое устройство, ускоряющее выполнение экспериментов.

Заключение

В сравнении с традиционными методами производства 3D-печать открывает новые перспективы в лабораторных исследованиях. С развитием технологий, позволяющих создавать устройства, материалы и конструкции с геометрией, адаптированной под индивидуальные потребности, становится очевидным потенциал трехмерной печати в аналитической химии. Создание экстракционных и сорбционных систем, реакторов и даже посуды существенно ускоряет научные исследования и снижает затраты на них. Совершенствование и расширение спектра материалов для печати дает перспективу для решения более сложных аналитических задач.

Однако пока эти разработки могут быть использованы исключительно в научно-исследовательских целях. Аккредитованные испытательные лаборатории не могут применять эти методы, несмотря на все преимущества, из-за отсутствия сертифицированных материалов и методов.

Литература / References

1. **Пройдаков Э. М.** 3D-печать как новое научно-техническое направление. *Наукoведческие исследования. Сборник научных трудов.* 2014;1:146–154.
Proydaikov E. M. The 3D printing as the new scientific and technical direction. *Naukovedcheskie issledovaniya=Science studies. Collection of scientific papers.* 2014;1:146–154.

2. Bethany Gross, Sarah Y. Lockwood, and Dana M. Spence Recent Advances in Analytical Chemistry by 3D Printing. *Analytical Chemistry*. 2017;89:57–70. DOI: 10.1021/acs.analchem.6b04344.
3. Сергеева В. С., Бысова Т. В., Смирнов В. А., Поначугин А. В. Проблемы применения методов 3d-моделирования и 3d-печати в науке и производстве. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2021;4:10(118):31–36. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2021.10.04.005.
- Sergeeva V. S., Bysova T. V., Smirnov V. A., Ponachugin A. V. Problems of using methods of 3d modeling and 3d printing in science and production. *Economica i upravlenie: problemy, resheniya=Economic development research journal*. 2021;4:10(118):31–36. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2021.10.04.005.
4. Муравский А. А., Аликин М. Б., Дворко И. М., Лавров Н. А. Полимерная 3D-печать: история, классификация и современные тенденции развития. *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2023;64(90):58–66. DOI 10.36807/1998-9849-2023-64-90-58-66.
- Muravskiy A. A., Alikin M. B., Dvorko I. M., Lavrov N. A. Polymer 3d Printing: History, Classification and Current Development Trends (Review). *Izvestiya SPbGTI(TU)=News of SPbGTI(TU)*. 2023;64(90):58–66. DOI 10.36807/1998-9849-2023-64-90-58-66.
5. Обработка моделей, напечатанных из полимера по технологии LCD, SLA, DLP. Сайт 3D Services.ru. URL: https://3d-services.ru/wp-content/uploads/2021/10/udalenie-podderzhek-s-modeli_2.jpg. Processing of models printed from polymer using technology LCD, SLA, DLP. 3D Services.ru. Available at: https://3d-services.ru/wp-content/uploads/2021/10/udalenie-podderzhek-s-modeli_2.jpg [Accessed 10.12.2024] (in Russ).
6. Nesterenko P. N. 3D printing in analytical chemistry: current state and future. *Pure and Applied Chemistry*. 2020;92(8):1341–1355. <https://doi.org/10.1515/pac-2020-0206>.
7. Малов И. Е. Тенденции развития технологии селективного лазерного спекания. *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2014;3(33):20–25.
- Malov I. E. Tendencies of development of selective laser sintering technologies. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii=Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2014;3(33):20–25.
8. Lujun Wang, Martin Pumera. Recent advances of 3D printing in analytical chemistry: Focus on microfluidic, separation, and extraction devices. *Trends in Analytical Chemistry*. 2021;135:116151. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116151>.
9. Gupta V., Nesterenko P., Paull B. 3D Printing in Chemical Sciences: Applications across Chemistry. Royal Society of Chemistry. 2019. 264 p.
10. Cheng-Kuan Su. Review of 3D-Printed functionalized devices for chemical and biochemical analysis. *Analytica Chimica Acta*. 2021;1158:338348. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338348>.
11. Douglas A. Hill, Lindsey E. Anderson, Casey J. Hill, Afshin Mostaghim, Victor G. J. Rodgers, William H. Grover MECs: “Building Blocks” for Creating Biological and Chemical Instruments. *PLoS ONE*. 2016;11(7):1. DOI: 10.1371/journal.pone.0158706.
12. D. J. Cocovi-Solberg, M. Miro. 3D printed extraction devices in the analytical laboratory – a case study of Soxhlet extraction. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2021;413(17):4373. <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03406-4>.
13. Melisa Rodas Ceballos, Francisco Gonzalez Serra, Jose Manuel Estela, Victor Cerda, Laura Ferrer. 3D printed resin-coated device for uranium (VI) extraction. *Talanta* 2019;196:510–514. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.12.055>.
14. Carlos Calderilla, Fernando Maya, Victor Cerda, Luz O. Leal. 3D printed device for the automated preconcentration and determination of chromium (VI). *Talanta* 2018;184:15–22. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.02.065>.
15. Carlos Calderilla, Fernando Maya, Luz O. Leal, Victor Cerda. Recent advances in flow-based automated solid-phase extraction. *Trends in Analytical Chemistry* 2018;108:370–380. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.09.011>.
16. Mardani S., Ojala L. S., Uusi-Kyyny P., Alopaeus V. Development of a unique modular distillation column using 3D printing. *Chemical Engineering and Processing*. 2016;109:136. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.001>.
17. Martinez-Jarquín S., Moreno-Pedraza A., Cazarez-Garcia D., Winkler R. Automated chemical fingerprinting of Mexican spirits derived from Agave (tequila and mezcal) using direct-injection electrospray ionisation (DIESI) and low-temperature plasma (LTP) mass spectrometry. *Analytical Methods*. 2017;9(34):5023. <https://doi.org/10.1039/C7AY00793K>.
18. Martinez-Jarquín S., Moreno-Pedraza A., Guillen-Alonso H., Winkler R. Template for 3D Printing a Low-Temperature Plasma Probe. *Analytical Chemistry*. 2016;88(14):6976. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b01019>.
19. Shreenath Krishnamurthy, Raf Roelant, Richard Blom, Bjørnar Arstad, Zuoan Li, Marleen Rombouts, Vesna Middelkoop, Adolfo Benedito Borrás, Lapo Naldoni. Scaling up 3D printed hybrid sorbents towards (cost) effective post-combustion CO₂ capture: A multiscale study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2024;132:104069 <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104069>.
20. Diego Barzallo, Edwin Palacio, Juan March, Laura Ferrer. 3D printed device coated with solid-phase extraction resin for the on-site extraction of seven sulfonamides from environmental water samples preceding HPLC-DAD analysis. *Microchemical Journal*. 2023;190. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108609>.
21. Kari B. Anderson, Sarah Y. Lockwood, R. Scott Martin, Dana M. Spence A. 3D Printed Fluidic Device that Enables Integrated Features. *Analytical Chemistry*. 2013;85:5622. 3265. [dx.doi.org/10.1021/ac400](https://doi.org/10.1021/ac400).
22. Elodie Mattioa, Fabien Robert-Peillarda, Catherine Brangerb, Kinga Puziob, Andre Margailanb, Christophe Brach-Papac, Joel Knoeryc, Jean-Luc Boudennea, Bruno Coulomb. 3D-printed flow system for determination of lead in natural waters. *Talanta*. 2017;168:298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2017.03.059>
23. Michelle P. Browne, Edurne Redondo, and Martin Pumera. 3D Printing for Electrochemical Energy Applications. *Chemical Reviews*. 2020;120(5):2783–2810. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00783>
24. Sergio Rossi, Alessandra Puglisi, Maurizio Benaglia. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem*. 2018;10(7):1512. <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>
25. Гордеев Е. Г., Анаников В. П. Общедоступные технологии 3D-печати в химии, биохимии и фармацевтике: приложения, материалы, перспективы. *Успехи химии=Russian Chemical Reviews*. 2020. Т. 89(12). С. 1507. <https://doi.org/10.1070/RCR4980>.
- Gordeev E. G., Ananikov V. P. Publicly available 3D printing technologies in chemistry, biochemistry and pharmaceuticals: applications, materials, perspectives. *Uspehi Himii=Russian Chemical Reviews*. 2020;89(12):1507–1561 <https://doi.org/10.1070/RCR4980>.
26. Matheus C. Carvalho, Joanne M. Oakes. Turning a 3D Printer into a HPLC Fraction Collector: A Tool for Compound-Specific Stable Isotope Measurements. *Hardware*. 2023;1(1):29. <https://doi.org/10.3390/hardware1010004>.
27. Лопатина Ю. А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования. *Технический сервис машин*. 2019;3(136):40–45.
- Lopatina Yu. A. Application of 3D printing by FDM method for repairing machinery and equipment. *Tekhnicheskii service mashin=Machinery technical service*. 2019;3(136):40–45.
28. Самохин А. С. Шприцевой насос, изготовленный при использовании технологии 3d печати и платформы Arduino. *Журнал Аналитической Химии*. 2020;75(3):281–287. 10.31857/S0044450220030159.
- Samokhin A. S. Syringe pump created using 3D printing technology and arduino platform. *Journal of Analytical Chemistry*. 2020;75(3):416–421. 10.31857/S0044450220030159.
29. Gordeev E. G., Degtyareva E. S., Ananikov V. P. Analysis of 3D printing possibilities for the development of practical applications in synthetic organic chemistry. *Rossiiskii Himicheskii Bulletin=Russian Chemical Bulletin, International Edition*. 2016;65(6):1637
30. Andrew J. Capel, Andrew Wright, Matthew J. Harding, George W. Weaver, Yuqi Li, Russell A. Harris, Steve Edmondson, Ruth D Goodridge, Steven D R Christie. 3D printed fluidics with embedded analytic functionality for automated reaction

- optimization. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 2017;13:111. <https://doi.org/10.3762/bjoc.13.14>
31. **Cheng-Kuan Su, Pei-Jin Peng, and Yuh-Chang Sun.** Fully 3D-Printed Preconcentrator for Selective Extraction of Trace Elements in Seawater. *Analytical Chemistry*. 2015;87(13): 6945–6950. 10.1021/acs.analchem.5b01599
 32. **Conan Fee, Suhas Nawada, Simone Dimartino.** 3D printed porous media columns with fine control of column packing morphology. *Journal of Chromatography A*. 2014;1333:18. DOI: 10.1016/j.chroma.2014.01.043
 33. **Wang H. Cocovi-Solberg D. J. Hu B. Miró M.** 3D printed micro-flow injection analysis platform for on-line magnetic nanoparticle sorptive extraction of antimicrobials in biological specimens as a front end to liquid chromatographic assays. *Analytical Chemistry*. 2017;89(22):12541. DOI: 10.1021/acs.analchem.7b03767

Благодарность

Авторы выражают большую благодарность Панченко Максиму Дмитриевичу за помощь в подготовке этой работы.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств бюджетного финансирования Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

Авторы / Authors

Трофимов Денис Александрович,
к. х. н., научный сотрудник Института геохимии

и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19. Область научных интересов: мембранная фильтрация, аддитивные технологии.
Trofimov Denis Aleksandrovich,
PhD, Research Associate at the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, ul. Kosygina 19.
Research interests: Membrane filtration, additive technologies.
trofimov.da@geokhi.ru
ORCID: 0000-0003-0790-0338

Ушкарев Андрей Александрович,
научный сотрудник Института геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19. Область научных интересов: технический анализ новых конструкционных материалов, аддитивные технологии.
Andrey A. Ushkarew,
Research Associate at the Research Associate at the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, ul. Kosygina 19.
Research interests: Technical analysis of new structural materials, additive technologies.

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.12.2024
Принята к публикации 18.01.2025

