

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-ПРИНТЕРОВ В ХИРУРГИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

© Лазаренко В.А.², Иванов С.В.¹, Иванов И.С.¹, Обьедков Е.Г.¹,
Беликов Л.Н.², Обьедкова Н.Ю.³, Денисенко А.И.¹

¹ Кафедра хирургических болезней № 1, ² кафедра хирургических болезней ФПО,
³ кафедра внутренних болезней ФПО Курский государственный медицинский университет, Курск
E-mail: ivanov.is@mail.ru

Развитие 3D-технологий, повсеместное распространение и усовершенствование 3D-принтеров, а также разработка и применение новых материалов и их комбинаций способствовали широкому внедрению 3D-принтеров в медицину. Использование 3D-технологий в хирургии возможно по следующим направлениям. Во-первых, это создание различных имплантатов, широко применяемых в стоматологии, травматологии и реконструктивной хирургии. Во-вторых, использование 3D-моделей подходит для имитации хода операций в сложных случаях. В-третьих, полным ходом идет разработка сканирования и печати органов и тканей живыми клетками, так называемый биопринтинг. В четвертых, существует опыт применения 3D-принтеров для создания медицинских инструментов. И наконец, активно исследуется использование 3D-принтеров для создания различных эндопротезов. Таким образом, перспективы 3D-технологий огромны, и в ближайшем будущем они, несомненно, станут одним из самых динамичных направлений в медицине и в хирургии в частности.

Ключевые слова: 3D-технологии, 3D-принтер, моделирование, эндопротез, биопринтинг, имплантат.

USING 3D PRINTERS IN SURGERY (LITERATURE REVIEW)

Lazarenko V.A.², Ivanov S.V.¹, Ivanov I.S.¹, Ob'edkov E.G.¹, Belikov L.N.², Ob'edkova N.Yu.³, Denisenko A.I.¹

¹ Department of Surgical Diseases N 1, ² Department of Surgical Diseases of Postgraduate Education Faculty,

³ Department of Internal Diseases of Postgraduate Education Faculty of Kursk State Medical University, Kursk

The development of 3D technologies, the wide spread and improvement of 3D printers, elaboration and use of new materials and their combinations have contributed to general availability of 3D printers in medicine. The use of 3D technology in surgery is possible in the following areas. First of all, there are a lot of various implants, which are widely used in dentistry, traumatology and reconstructive surgery. Secondly, 3D models are suitable for simulating surgical operation in complex cases. Thirdly, scanning and printing of organs and tissues with living cells, the so-called bioprinting, is progressively used. Fourthly, there is an experience of using 3D printers for creating medical instruments. Finally, 3D printers have been properly investigated to create various endoprostheses. Thereby, the perspective of 3D technologies is huge. They will necessarily be one of the dynamic areas in medicine, particularly in surgery in the nearest future.

Keywords: 3D technologies, 3D printer, modeling, endoprosthesis, bioprinting, implant.

Эволюция 3D-технологий

Первые 3D-принтеры были созданы в середине восьмидесятых годов XX века компанией Charles Hull, помимо этого данная компания разработала и запатентовала технологию стереолитографии, на которой построена работа большинства 3D-принтеров. Технология трехмерной печати была воспринята как революционное решение при моделировании и изготовлении различных предметов [5, 6]. По своему предназначению 3D-принтеры должны были использоваться в промышленных целях для создания прототипов, а также изготовления сложных деталей. Сам факт создания таких устройств открывал огромные возможности в различных отраслях науки и технике, что, в свою очередь, способствовало значительной экономии средств и времени [18]. На сегодняшний день 3D-моделирование используется при планировании сложных операций, данная возможность позволяет имитировать варианты течения операций, пользуясь результатами ком-

пьютерной томографии. Используя эти данные, хирург может опробовать различные сценарии операции, учесть трудности, которые могут возникнуть в ходе ее выполнения [1, 2].

3D-принтер представляет собой станок с числовым программным управлением. Метод, лежащий в основе его работы, предусматривает послойное создание деталей. Рабочая головка движется по осям X и Y только в горизонтальной плоскости, после печати первого слоя рабочая платформа перемещается на толщину одного слоя вниз, так поэтапно происходит создание всей детали. На сегодняшний день на рынке представлено огромное количество вариаций 3D-принтеров. Данные устройства позволяют печатать объемные детали различных размеров. Устройство любого 3D-принтера включает экструдер, в который подается нить материала, в нем она плавится и выдавливается через сопло на рабочую платформу. Экструдеров может быть несколько, что позволяет создавать комбинированные материалы. Сле-

дующей немаловажной частью 3D-принтера является рабочая платформа, на которую, производится непосредственно проекция и печать изготавливаемой детали. И экструдер и платформа имеют свой температурный диапазон, необходимый для каждого из используемых материалов. Рабочая камера 3D-принтера может быть открытого и закрытого типа, данная опция необходима при работе с материалами, имеющими высокую температуру плавления [9].

Основным материалом, использующимся в 3D-печати, является термопластик. Стремительное развитие 3D-технологий позволило не только расширять возможности 3D-печати, но и использовать новые материалы, применение которых ранее казалось невозможным. На сегодняшний день печать возможно осуществлять металлом, тканью, керамикой и даже живыми клетками, что значительно расширяет область применения данного устройства. Выбор материала для изготовления определенной продукции имеет ключевое значение в дальнейшем его применении. От материала в первую очередь зависят механические и химические свойства изготавливаемой продукции. Большинство пластмасс, использующихся в промышленном производстве, обладают высокой токсичностью, что затрудняет их использование в медицине. Создание биоинертных материалов и применение их для создания различных имплантатов позволило создавать прототипы и изучать их свойства при помещении в живой организм [24, 29].

3D-биопринтеры

Возможность использования в качестве материала для печати живых клеток и тканей, расширило применение 3D-принтеров в медицине и способствовало появлению нового термина «биопринтинг». Биопринтинг представляет собой разновидность 3D-печати, конечным продуктом которого могут быть модели костной, соединительной ткани, а также модели органов. Основными требованиями, предъявляемыми к биопринтеру, обладающему такими возможностями, является сохранение функционирования и выживаемости клеток [4, 11]. Принцип работы биопринтера схож с работой промышленного 3D-принтера и предполагает послойное нанесение клеток друг на друга, имитируя их естественное расположение в тканях организма. Основным отличием является температурный диапазон, характерный для каждого типа клеток, необходимого для их выживаемости [14, 22].

Толчком для развития 3D-биопечати стало изготовление биорезорбируемой продукции: частей черепа, зубных имплантов и т.д. Следующим шагом к появлению биопринтеров явилось использование 3D-принтеров в изготовлении различных

косметических и ортопедических эндопротезов, востребованных в травматологии, ортопедии и эстетической хирургии [16]. На сегодняшний день с помощью биопринтеров можно достаточно быстро создать модели и напечатать хрящевые и костные импланты (клапаны сердца, хрящи носа, ушные раковины). Интенсивно идет развитие 3D-моделирования кровеносных сосудов, костных элементов, кожных лоскутов, использующихся для последующей пересадки [7, 17].

Современная медицина в будущем будет испытывать потребность в продуктах 3D-биопечати. Имплантация напечатанных органов и тканей с каждым годом будет только увеличиваться, особенно востребованных в травматологии, хирургии и косметической хирургии. Биопечать является прорывом в современной медицине, стремительно развивающимся технологическим направлением в развитии науки, нацеленным на улучшение лечения и спасение жизней людей [8, 9].

Изготовление хирургических инструментов

Большое разнообразие операций, выполняющихся в стационарах различного хирургического профиля, требует использования большого количества хирургических инструментов. Особенности проведения каждой операции требуют определенного спектра инструментов, каждый из которых может быть модернизирован для конкретного случая. Создание инструментов и их усовершенствование – это еще одна из немаловажных возможностей 3D-принтера. Применение пластика для изготовления инструментов с помощью 3D-печати имеет большое количество преимуществ [12, 16]. Во-первых, это удешевляет стоимость самого пластикового изделия по сравнению с продаваемыми аналогами. Пластиковые изделия могут быть достойной альтернативой металлическим изделиям, при этом современные пластики для производства инструментов не уступают в прочностных качествах металлическим. Во-вторых, время производства, наличие 3D-принтера и соответствующего типа пластика позволяет производить необходимый инструмент за короткий промежуток времени. В то время как закупка аналогичной готовой продукции требует большего времени в связи с бюрократическими издержками. И в третьих, 3D-моделирование позволяет создавать инструменты определенных размеров и параметров, необходимых для каждого конкретного случая. Все эти преимущества делают 3D-технологии печати хирургических инструментов перспективной и востребованной [6, 10].

Использование 3D-принтеров для создания герниоэндопротезов

Создание 3D-моделей герниоэндопротезов и их печать является одним из перспективных

направлений в герниологии. На сегодняшний день не одна из плановых реконструктивных операций передней брюшной стенки не обходится без использования синтетического герниоэндопротеза. В этой связи создание имплантов для пластики передней брюшной стенки с помощью 3D-принтеров видится достаточно востребованным [20]. 3D-технологии позволяют создавать эндопротезы любой формы, толщины, гибкости и с любым размером поры, помимо этого имеется возможность создавать усиленные области в самом эндопротезе и точки фиксации для более надежного прикрепления в тех областях, где отмечается выраженная дистрофия соединительной ткани. Учитывая особенности анатомии передней брюшной стенки, размер грыжевого дефекта его локализацию и используя возможности 3D-технологий, возможно создавать герниоэндопротезы для каждого больного, учитывая его индивидуальные особенности. Создание герниоэндопротеза для каждого конкретного больного позволяет не только улучшать качество самой пластики, но и экономить материал, используемый для его создания, путем уменьшения количества отходов [5, 13]. 3D-герниоэндопротезы могут изготавливаться в режиме реального времени, интраоперационное уточнение размеров позволяет избегать большого количества затрат термопластика. Использование различных материалов для создания эндопротезов, их комбинации, применение адсорбируемых материалов с нанесением на их поверхность различных лекарственных средств в зависимости от цели их использования, все эти возможности объединены в 3D-принтерах нового поколения. В качестве препаратов, наносимых на эндопротез, могут быть использованы антибиотики, коллагеностимуляторы и другие препараты в зависимости от преследуемой цели [26]. Нанесение препарата на поверхность эндопротеза позволяет точно воздействовать на процессы в области имплантации, не вызывая системного побочного действия на организм. Огромные возможности 3D-технологий, позволяют использовать 3D-принтеры в лечебных учреждениях для создания эндопротезов с заданными характеристиками, учитывая особенности каждого конкретного больного [15, 19].

Спектр материалов, использующихся в 3D-печати, разнообразен и варьируется в зависимости от желаемой цели. В настоящее время основным материалом, из которого изготавливаются эндопротезы для пластики передней брюшной стенки, является полипропилен (полимер пропилена), который представляет собой разновидность термопластика, широко используемого в 3D-печати. На сегодняшний день разработаны и разрешены к использованию в имплантации ряд

биоинертных пластмасс, которые могут использоваться непосредственно как каркасный материал при создании герниоэндопротезов, так и комбинированный материал при сочетании с антибактериальными, гормональными, коллагеностимулирующими препаратами [3, 25, 27]. Одним из таких материалов является биоразлагаемый полиэфир, данный полимер широко применяется в гинекологии, хирургии для изготовления шовного материала. Помимо этого данный материал может использоваться как биодеградируемый филлер в пластической хирургии, наиболее часто в качестве основного действующего вещества выступает гиалуроновая кислота, но возможно и отдельное применение. Биодegradация данного вещества в человеческом теле происходит медленно и длится, по разным источникам, от двух до четырех лет. Продуктами его деградации являются: вода, углекислый газ и капроновая кислота. Применение данного полимера в качестве материала для имплантов и филлеров разрешено управлением по санитарному надзору за качеством медикаментов и пищевых продуктов США. Данное управление находится в юрисдикции Министерства здравоохранения и социальных служб США и является одним из федеральных исполнительных департаментов, оно производит контроль качества косметических средств, лекарственных препаратов, а также несет ответственность за соблюдение законодательства и стандартов в области биомедицинского применения. Данный материал производится многими зарубежными компаниями, производство в России не осуществляется [3]. Зарубежные компании придают большое значение усовершенствованию имеющихся материалов и созданию новых полимеров для возможной имплантации в организм человека, в связи возросшим спросом на данный вид продукции. В зависимости от области применения изготавливаемых продуктов, помимо высоких биосовместимых свойств, пластики должны соответствовать другим немаловажным критериям [21]. Пластмассы, используемые для изготовления зубных имплантатов, ортопедических протезов, должны обладать достаточно прочностными качествами. Пластики, используемые для создания герниоэндопротезов, должны иметь достаточную гибкость и прочность, чтобы не ограничивать движения пациента и не доставлять ему дискомфорт в области постановки герниоэндопротеза, в то же время иметь запас прочности для предупреждения разрыва эндопротеза и развития рецидива грыжи [13, 23].

Таким образом, новые возможности 3D-технологий, внедряемых в медицину, позволяют надеяться на колоссальные перемены и революционные решения. Уже сегодня с помощью

3D-принтеров создаются разнообразные имплантаты, протезы, фрагменты костей, ткани и органы. Несмотря на то что в настоящий момент трехмерная печать широко применяется в хирургии и стоматологии, в обозримом будущем мы получим возможность создавать большинство органов и тканей с дальнейшим использованием их в трансплантологии. Более чем десятилетнее использование 3D-технологий в хирургии позволило провести сотни успешных операций во всем мире. Возможности 3D-принтеров повышаются, растет уровень знаний, что в будущем расширит область применения этих устройств.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Багатурия Г.О. Перспективы использования 3D-печати при планировании хирургических операций // Медицина: теория и практика. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 47-59. [Bagaturija G.O. Prospects for the use of 3D-printing when planning surgery. Meditsina: teoriya i praktika. 2016; 1(1): 47-59 (in Russ.)].
2. Баиндурашвили А.Г., Басков В.Е., Филиппова А.В., Бортулев П.И., Барсуков Д.Б., Поздниккин И.Ю., Волошин С.Ю., Баскаева Т.В., Познович М.С. Планирование корригирующей остеотомии бедренной кости с использованием 3d-моделирования. Часть I // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2016. – Т. 4, № 3. – С. 52-58. [Baindurashvili A.G., Baskov V.E., Filippova A.V., Bortulev P.I., Barsukov D.B., Pozdnikin I.Y., Voloshin S.Y., Baskaeva T.V., Poznovich M.S. Planning for corrective osteotomy of the femoral bone using 3D-modeling. Part I. Ortopediya, travmatologiya i vosstanovitel'naya khirurgiya detskogo vozrasta. 2016; 4(3): 52-58 (in Russ.)].
3. Волова Т.Г., Шишацкая Е.И. Разрушаемые биополимеры: получение, свойства, применение. – Красноярск: Красноярский писатель, 2011. – 389 с. [Volova T.G., Shishatskaya E.I. Destructible biopolymers: production, properties, application. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy pisatel'; 2011: 389 (in Russ.)].
4. Горбатов Р.О., Романов А.Д. Создание органов и тканей с помощью биопечати // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2017. – Т. 63, № 3. – С. 3-9. – DOI 10.19163/1994-9480-2017-3(63)-3-9. [Gorbatov R.O., Romanov A.D. Bioprinting of organs and tissues. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta. 2017; 63(3): 3-9 (in Russ.)].
5. Джен Д.Й., Коновалов А.Н., Попов В.К., Ченг Ю.Л., Шафикова Р. Проекционная стереолитография биосовместимых полимерных структур // Перспективные материалы. – 2016. – № 6. – С. 30-36. [Jeng J.-Y., Kononov A.N., Popov V.K., Cheng Y.-L., Shafikova R. Projection stereolithography of biocompatible polymer structures. Perspektivnyye materialy. 2016; (6): 30-36. (in Russ.)].
6. Жорова А.А. Возможности существующих технологий 3d-печати в медицине // Смоленский медицинский альманах. – 2018. – № 1. – С. 106-109. [Zhorova A.A. Possibilities of existing 3D printing technologies in medicine. Smolenskiy meditsinskiy al'manakh. 2018; (1): 106-109 (in Russ.)].
7. Зиновьев С.В., Селиверстов С.С., Целуйко С.С., Кушнарев В.А. Графическая модель для биопечати структурного аппарата каудальной борозды корня диафрагмальной доли левого легкого аутбредных белых крыс // Амурский медицинский журнал. – 2016. – Т. 2, № 14. – С. 56-59. [Zinoviev S.V., Seliverstov S.S., Tseluyko S.S., Kushnarev V.A. Graphic model for machine structural bioprinting caudal furrow root diaphragmatic lobe of left lung outbred white rats. Amurskiy meditsinskiy zhurnal. 2016; 2(14): 56-59 (in Russ.)].
8. Коровин А.Е., Нагибович О.А., Пелешок С.А., Копыленкова Т.И., Шилин В.П., Ольховик А.Ю., Шевченко В.А. 3D-моделирование и биопрототипирование в военной медицине // Клиническая патофизиология. – 2015. – № 3. – С. 17-23. [Korovin A.E., Nagibovich O.A., Peleshok S.A., Kopylenkova T.I., Shilin V.P., Ol'khovik A.Yu., Shevchenko V.A. 3d-modeling and bioprototyping in military medicine; Klinicheskaya patofiziologiya. 2015; (3): 17-23 (in Russ.)].
9. Медведев М.П., Фомина М.А. 3D-печать как новая эпоха в медицине // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – Т. 11, № 4. – С. 16-19. [Medvedev M.P., Fomina M.A. 3D printing as a new era in medicine. Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu. 2016; 11(4): 16-19 (in Russ.)].
10. Сафонов М.Г., Строгий В.В. Применение 3d-печати в медицине // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-3. – С. 394-395. [Safonov M.G., Strogiiy V.V. The use of 3D printing in medicine. Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik. 2015; (3-3): 394-395 (in Russ.)].
11. Arai K., Murata D., Verissimo A.R., Mukae Y., Itoh M., Nakamura A., Morita S., Nakayama K. Fabrication of scaffold-free tubular cardiac constructs using a Bio-3D printer // PLoS One. – 2018. – Vol. 13, N 12. – P. e0209162. – DOI: 10.1371/journal.pone.0209162.
12. Bagaria V., Chaudhary K. A paradigm shift in surgical planning and simulation using 3Dgraphy: Experience of first 50 surgeries done using 3D-printed biomodels // Injury. – 2017. – Vol. 48, N 11. – P. 2501-2508. – DOI: 10.1016/j.injury.2017.08.058.
13. Ballard D.H., Weisman J.A., Jammalamadaka U., Tappa K., Alexander J.S., Griffen F.D. Three-dimensional printing of bioactive hernia meshes: In vitro proof of principle // Surgery. – 2017. – Vol. 161, N 6. – P. 1479-1481. – DOI: 10.1016/j.surg.2016.08.033.
14. Bishop E.S., Mostafa S., Pakvasa M., Luu H.H., Lee M.J., Wolf J.M., Ameer G.A., He T.C., Reid R.R. 3-D bioprinting technologies in tissue engineering and

- regenerative medicine: Current and future trends // *Genes Dis.* – 2018. – Vol. 4, N 4. – P. 185-195. – DOI: 10.1016/j.gendis.2017.10.002.
15. Chwalek K., Sood D., Cantley W.L., White J.D., Tang-Schomer M., Kaplan D.L. Engineered 3D Silk-collagen-based Model of Polarized Neural Tissue // *J Vis Exp.* – 2015. – N 105. – P. e52970. – DOI: 10.3791/52970.
16. Dawood A., Marti Marti B., Sauret-Jackson V., Darwood A. 3D printing in dentistry // *Br Dent J.* – 2015. – Vol. 219, N 11. – P. 521-529. – DOI: 10.1038/sj.bdj.2015.914.
17. de Mel A., Yap T., Cittadella G., Hale L.R., Maghsoudlou P., de Coppi P., Birchall M.A., Seifalian A.M. A potential platform for developing 3D tubular scaffolds for paediatric organ development // *J Mater Sci Mater Med.* – 2015. – Vol. 26, N 3. – P. 141. – DOI: 10.1007/s10856-015-5477-4.
18. George M., Aroom K.R., Hawes H.G., Gill B.S., Love J. 3D Printed Surgical Instruments: The Design and Fabrication Process // *World J Surg.* – 2017. – Vol. 41, N 1. – P. 314-319. – DOI: 10.1007/s00268-016-3814-5.
19. Graf S., Vasudavan S., Wilmes B. CAD-CAM design and 3-dimensional printing of mini-implant retained orthodontic appliances // *Am J Orthod Dentofacial Orthop* – 2018. – Vol. 154, N 6. – P. 877-882. – DOI: 10.1016/j.ajodo.2018.07.013
20. Michalski M.H., Ross J.S. The shape of things to come: 3D printing in medicine // *JAMA.* – 2014. – Vol. 312, N 21. – P. 2213-2214. – DOI: 10.1001/jama.2014.9542..
21. Moisenovich M.M., Arkhipova A.Y., Orlova A.A., Drutskaya M.S., Volkova S.V., Zacharov S.E., Agapov I.I., Kirpichnikov M.P. Composite Scaffolds Containing Silk Fibroin, Gelatin, and Hydroxyapatite for Bone Tissue Regeneration and 3D Cell Culturing // *Acta Naturae.* – 2014. – Vol. 6, N 1. – P. 96-101.
22. Murphy S.V., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs // *Nat Biotechnol.* – 2014. – Vol. 32, N 8. – P. 773-785. – DOI: 10.1038/nbt.2958.
23. Stansbury J.W., Idacavage M.J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities // *Dental Materials.* – 2016. – Vol. 32, N 1. – P. 54-64. – DOI: 10.1016/j.dental.2015.09.018.
24. Tappa K., Jammalamadaka U., Ballard D.H., Bruno T., Israel M.R., Vemula H., Meacham J.M., Mills D.K., Woodard P.K., Weisman J.A. Medication eluting devices for the field of OBGYN (MEDOB-GYN): 3D printed biodegradable hormone eluting constructs; a proof of concept study // *PLoS ONE.* – 2017. – Vol. 12, N 8. – P. 1-17. – DOI: 10.1371/journal.pone.0182929.
25. Tappa K., Jammalamadaka U. Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques // *Funct Biomater.* – 2018. – Vol. 9, N 1. – P. 1-16. – DOI: 10.3390/jfb9010017.
26. Warsi M.H., Yusuf M., Al Robaian M., Khan M., Alsaab H., Muheem A., Khan S. 3D Printing Methods for Pharmaceutical Manufacturing: Opportunity and Challenges // *Current Pharmaceutical Design.* – 2018. – DOI: 10.2174/1381612825666181206121701. [Epub ahead of print].
27. Weisman J.A., Nicholson J.C., Tappa K., Jammalamadaka U., Wilson C.G., Mills D.K. Antibiotic and chemotherapeutic enhanced three-dimensional printer filaments and constructs for biomedical applications // *Int J. Nanomedicine.* – 2015. – Vol. 10. – P 357-370. – DOI: 10.2147/IJN.S74811.
28. Wodajo F.M., Jakus A.E. Nanopatterning and Bioprinting in Orthopedic Surgery // *Orthop Clin North Am.* – 2019. – Vol. 50, N 1. – P. 21-33. – DOI: 10.1016/j.ocl.2018.08.013.
29. Zeng S., Liu L., Shi Y., Qiu J., Fang W., Rong M., Guo Z., Gao W. Characterization of silk fibroin/chitosan 3D porous scaffold and in vitro cytology // *PLoS One.* – 2015. – Vol. 10, N 6. – e0128658. – DOI: 10.1371/journal.pone.0128658.

Поступила в редакцию 07.10.2018

Подписана в печать 20.12.2018