

БЪДЕЩЕТО НА БЪБРЕЧНОТО ЗДРАВЕ: БИОТЕХНОЛОГИЧНИ ИНОВАЦИИ И УСТОЙЧИВИ РЕШЕНИЯ

Румина Колева, Александър Петров, Мирослава Бенкова-Петрова,
Светла Стайкова

*Клиника по нефрология, УМБАЛ „Св. Марина“ – Варна,
УС по нефрология, хемодиализа и токсикология, Втора катедра по вътрешни
болести, Факултет по медицина, Медицински университет – Варна*

THE FUTURE OF RENAL HEALTH: BIOTECHNOLOGICAL INNOVATIONS AND SUSTAINABLE SOLUTIONS

Rumina Koleva, Aleksandar Petrov, Miroslava Benkova-Petrova, Svetla Staykova

*Clinic of Nephrology, St. Marina University Hospital, Varna
TS Nephrology, Hemodialysis, and Toxicology, Second Department of Internal Diseases,
Faculty of Medicine, Medical University of Varna*

РЕЗЮМЕ

Крайният стадий на хронично бъбречно заболяване засяга милиони пациенти по света и оказва сериозен натиск върху здравната система и околната среда. Традиционната хемодиализа е свързана с висок разход на вода, енергия и генериране на отпадъци. Съвременните биотехнологични решения - преносими и имплантируеми биоизкуствени бъбреци, както и 3D биопринтере на бъбречни тъкани, предлагат нов подход за заместителна терапия, който може да подобри качеството на живот на пациентите и да намали екологичния товар. Този систематичен преглед анализира данни от клинични изпитвания и експериментални модели, оценявайки функционалността, ресурсната ефективност и екологичните ползи на използваните биоматериали. Резултатите показват, че преносимите системи осигуряват стабилна филтрация при минимални разходи, имплантируемите устройства демонстрират дългосрочна функция без нужда от чести интервенции, а 3D биопринтере позволява създаването на микроархитектурни тъкани с оптимална клетъчна интеграция. Тези технологии имат потенциала да трансформират нефрологичната практика, осигурявайки по-ефективно лечение и по-нисък екологичен отпечатък.

Ключови думи: бъбречно здраве, биотехнологии, биоизкуствени бъбреци, преносими диализни устройства, имплантируем биореактор, 3D биопринтере, регенеративна медицина, екологична устойчивост, биоразградими биоматериали, въглероден отпечатък

ABSTRACT

End-stage chronic kidney disease affects millions of patients worldwide and places a significant burden on both healthcare systems and the environment. Traditional hemodialysis is associated with high consumption of water, energy, and the generation of waste. In contrast, modern biotechnological solutions—including portable and implantable bioartificial kidneys as well as 3D bioprinting of renal tissues—offer a novel approach for renal replacement therapy. These technologies have the potential to significantly improve patients' quality of life while reducing the environmental impact of treatment. This systematic review analyzes data from clinical trials and experimental models, evaluating the functionality, resource efficiency, and ecological benefits of the biomaterials used. The findings indicate that portable systems provide stable filtration with minimal resource expenditure, implantable devices demonstrate sustained renal function without frequent interventions, and 3D bioprinting facilitates the creation of microarchitectural tissues with optimal cellular integration. Collectively, these innovations may transform nephrological practice by delivering more effective treatment with a lower environmental footprint.

Keywords: kidney health, biotechnology, bioartificial kidneys, portable dialysis devices, implantable bioreactor, 3D bioprinting, regenerative medicine, environmental sustainability, biodegradable biomaterials, carbon footprint



УВОД

Хроничното бъбречно заболяване, особено в своя краен стадий, засяга над 2 милиона души по света (1) и представлява значителен проблем за здравните системи. Съществуващите терапии - диализа и трансплантация, имат множество ограничения: недостиг на донорски органи, висок риск от усложнения, чести болнични интервенции и значителни финансови разходи (4,6,7). Освен това традиционната диализна терапия изисква голя-

ходва между 120 и 150 литра вода (5,6). Клиничните изпитвания демонстрират, че преносимите системи осигуряват стабилна филтрация и минимизират риска от усложнения като хипотензия и нарушения в електролитния баланс. Тези устройства позволяват на пациентите да водят по-гъвкав начин на живот, като същевременно предоставят възможност за наблюдение на жизнените показатели в реално време, което улеснява индивидуалното адаптиране на терапията (табл. 1).

Табл. 1. Сравнение на водната и енергийната консумация при традиционна диализна терапия и преносими системи (WAK)

Метод	Водна консумация на сесия	Спестяване (%)	Енергийна консумация
Традиционна диализа	120–150 литра	0%	Висока
Преносима система (WAK)	~0.30 литра	До 99%	Значително по-ниска

мо потребление на вода и енергия и генерира значително количество отпадъци. Например годишната консумация на вода за диализно лечение може да надхвърли 43 милиарда литра, което оказва сериозен екологичен товар. Тези фактори подчертават нуждата от внедряване на иновативни и ресурсно ефективни терапии, които да подобрят лечението и да намалят негативното въздействие върху околната среда. В този контекст новите биотехнологични решения - преносими и имплантируеми биоизкуствени бъбреци и 3D биопринтиране на бъбречни тъкани, предлагат персонализирани алтернативи, които могат да осигурят по-добра клинична ефективност и по-малко отпадъци.

Преносими изкуствени бъбреци: Преносимите диализни системи (*Wearable Artificial Kidneys - WAK*) представляват иновативен подход за заместителна терапия при пациенти в краен стадий на хронично бъбречно заболяване. Тези компактни устройства използват модерни сорбционни технологии, които позволяват многократно рециклиране на малки количества диализен разтвор - приблизително 300 мл за сесия. Благодарение на този метод се постига значително намаляване на потреблението на вода, като спестяването може да достигне до 99% в сравнение с традиционната хемодиализа, при която една сесия може да израз-

Импантируем биоизкуствен бъбрек: Имплантируемите биоизкуствени бъбреци са проектирани за дългосрочно осигуряване на бъбречна функция чрез комбиниране на живи бъбречни клетки с високотехнологични нанопорести силициеви мембрани. Тези устройства се имплантират хирургично и функционират непрекъснато, имитирайки естествените процеси на филтрация, метаболизъм и ендокринна регулация. Предварителни експерименти в животински модели, включително тестове при прасета, показват стабилна бъбречна функция за периоди от няколко седмици без значими имунологични реакции (3). Използването на имплантируеми устройства води до намаляване на нуждата от външни консумативи с до 70% и осигурява по-естествено регулиране на хомеостазата, което е от ключово значение за дългосрочното здраве на пациентите. Тези технологии също така намаляват броя на хоспитализациите и усложненията, свързани с диализния достъп, което допринася за по-ниски оперативни разходи и подобрява общата ефективност на терапията.

3D биопринтиране на бъбречни тъкани с устойчиви материали: 3D биопринтирането представлява революционен метод за създаване на бъбречни тъкани чрез използване на „биомастило“ - смес от живи клетки и биоразградими хидрогелове като желатин, алгинат и

хиалуронова киселина. Този подход позволява изграждането на сложни микроархитектурни структури, които имитират естествената организация на нефроните, гломерулите и съдовите мрежи (2,8). Прецизното разпределение на клетките осигурява ефективна васкуларизация и оптимална пространствена цитоархитектоника, което е критично за постигането на нормална бъбречна функция. Лабораторните експерименти показват, че отпечатаните тъкани демонстрират висока клетъчна пролиферация, стабилна филтрация и здрава структура, която може да бъде използвана както за регенеративна терапия, така и за моделиране на нефрологични заболявания. Освен това използването на автоложни клетки минимизира риска от имунологично отхвърляне и позволява индивидуално адаптиране на лечението (табл. 2).

Интеграция на изкуствени бъбреци и 3D биопринтиране - синергия за устойчива бъдеща медицина: Обединяването на преносими и имплантируеми биоизкуствени бъбреци с 3D биопринтиране отваря възможността за създаване на холистични терапевтични систе-

ми, които осигуряват както незабавно, така и дългосрочно лечение. В този синергичен модел преносимите системи осигуряват незабавна диализа, докато 3D биопринтираните бъбречни тъкани, създадени чрез използване на биоразградими материали и автоложни клетки, постепенно поемат функцията на органа. Този комбиниран подход позволява постигането на непрекъсната и адаптивна терапия, която минимизира нуждата от чести болнични интервенции, като същевременно осигурява индивидуализирано лечение и оптимално регенеративно възстановяване (табл. 3).

ДИСКУСИЯ

Анализът на представените данни демонстрира, че новите биотехнологични подходи предлагат значителни клинични предимства за пациенти с краен стадий на хронично бъбречно заболяване. Преносимите системи позволяват лечение извън болничната среда, като значително подобряват мобилността и намаляват риска от усложнения, свързани с традиционната диализна терапия. Имплантируеми-

Табл. 2. Сравнение на традиционното тъканно инженерство и 3D биопринтирането

Метод/критерий	Клетъчна пролиферация	Васкуларизация	Генериране на отпадъци
Традиционни методи за тъканно инженерство	Средна	Ограничена	Високо
3D биопринтиране	Висока	Прецизно контролирана	Значително по-ниско

Табл. 3. Схема на внедряване на технологии за устойчива бъбречна терапия

Компонент	Функция/Описание	Роля в интеграцията
Преносима диализа	Временно осигурява диализа чрез многократно рециклиране на малки количества течност	Осигурява незабавно лечение и подобрява мобилността на пациента
Имплантируем биореактор	Интегрира живи бъбречни клетки с нанопорести силициеви мембрани за непрекъсната филтрация и метаболитна регулация	Осигурява дългосрочна бъбречна функция и намалява необходимостта от интервенции
3D биопринтирани бъбречни тъкани	Създава микроархитектурни структури, имитиращи биологичната бъбречна тъкан	Доставя регенеративно лечение чрез персонализирано изградени тъкани
Функционална интеграция	Комбинираща и координира работата на всички компоненти, като осигурява връзка между временната диализа и дългосрочните регенеративни процеси.	Постига холистичен модел за устойчива и адаптивна терапия

те устройства, които работят непрекъснато, осигуряват стабилна бъбречна функция и минимизират нуждата от еднократни консумативи, като по този начин насърчават естествено-регулиране на хомеостазата. Техниката за 3D биопринтере дава възможност за създаване на индивидуално адаптирани бъбречни тъкани с отлично клетъчно присаждане, което е от ключово значение за дългосрочното възстановяване на органната функция.

Въпреки тези предимства остават предизвикателства, свързани с осигуряването на ефективна васкуларизация и мащабирането на отпечатаните структури до клинично значими размери. В допълнение, регулаторните и етичните въпроси - като достъпност на високотехнологичните терапии и използването на автоложни клетки, изискват по-нататъшни изследвания и международно сътрудничество. От финансово-икономическа гледна точка, въпреки високите първоначални инвестиции, дългосрочната ефективност на тези технологии обещава значително намаляване на оперативните разходи и оптимизация на използваните ресурси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бъдещето на бъбречното здраве е тясно свързано с развитието на биотехнологиите и устойчивите решения. Тези подходи предоставят по-ефективно, персонализирано и ресурсно-спестяващо лечение за пациенти, нуждаещи се от бъбречно-заместително лечение. Преносимите системи осигуряват стабилна функция с минимална консумация на вода и електроенергия, имплантируемите устройства демонстрират дългосрочна стабилност и намаляване на нуждата от външни консумативи, а 3D биопринтере предлагат възможността за създаване на функционални бъбречни тъкани с оптимална клетъчна интеграция. За да се реализира пълният потенциал на тези технологии, е необходимо да се проведат допълнителни клинични изпитвания, да се усъвършенстват техническите решения и да се адаптират регулаторните рамки. При правилно изпълнение, тези подходи могат да осигурят успешен модел за устойчива медицина в 21-ви век.

ЛИТЕРАТУРА

1. Couser WG, Remuzzi G, Mendis S, Tonelli M. The contribution of chronic kidney disease to the global burden of major noncommunicable diseases. *Kidney Int.* 2011 Dec;80(12):1258-70. doi: 10.1038/ki.2011.368. Epub 2011 Oct 12. PMID: 21993585.
2. Fransen MFJ, Addario G, Bouten CVC, Halary F, Moroni L, Mota C. Bioprinting of kidney in vitro models: cells, biomaterials, and manufacturing techniques. *Essays Biochem.* 2021 Aug 10;65(3):587-602. doi: 10.1042/EBC20200158. PMID: 34096573; PMCID: PMC8365327.
3. Kim EJ, Chen C, Gologorsky R, Santandreu A, Torres A, Wright N, et al. Feasibility of an implantable bioreactor for renal cell therapy using silicon nanopore membranes. *Nat Commun.* 2023;14(1):4890. doi: 10.1038/s41467-023-19820-8. PMID: 37644033.
4. Lima F, Pizzo A, Olivari F, Giordana G. Sustainability and dialysis: The 4 main points for a green dialysis. *Giornale di Clinica Nefrologica e Dialisi.* 2024;36(1):72-82. doi: 10.33393/gcnd.2024.3127.
5. Luminary Labs (KidneyX Sustainability Prize). 7 solutions to make kidney care more sustainable [Internet]. *KidneyX Sustainability Prize Winners Announcement.* 2023 [цитиран 2025 Mar 05]. Наличен от: <https://www.luminary-labs.com/7-solutions-to-make-kidney-care-more-sustainable/>
6. Ramada DJL, de Vries JC, Vollenbroek JC, Noor N, ter Beek O, Mihăilă SM, Wieringa FP, Masereeuw R, Gerritsen KG, Stamatialis D. Portable, wearable and implantable artificial kidney systems: needs, opportunities and challenges. *Nat Rev Nephrol.* 2023 Aug;19(8):481-490. doi: 10.1038/s41581-023-00726-9. Epub 2023 Jun 5. PMID: 37277461; PMCID: PMC10240485.
7. Sehgal AR, Slutzman JE, Huml AM. Sources of variation in the carbon footprint of hemodialysis treatment. *J Am Soc Nephrol.* 2022 Jun;33(6):1790-1795. doi: 10.1681/ASN.2022010086. PMID: 35654600; PMCID: PMC9529184.
8. Turunen S, Kaisto S, Skovorodkin I, Mironov V, Kalpio T, Vainio S, Rak-Raszewska A. 3D bioprinting of the kidney – hype or hope? *AIMS Cell Tissue Eng.* 2018;2(3):119-162. doi: 10.3934/celltissue.2018.3.119.

Адрес за кореспонденция:

Румина Колева
Клиника по нефрология, УМБАЛ „Св. Марина“
бул. „Хр. Смирненски“ 1
Варна, 9000
e-mail: koleffa@abv.bg