

УДК 615.471

## НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЛЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКА И ВАКУУМНОЙ ТЕРАПИИ

Алексеев Ю.Г.<sup>1</sup>, Минченя В.Т.<sup>2</sup>, Королёв А.Ю.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Республиканское инновационное унитарное предприятие  
«Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Ультразвуковые методы применяются в медицине уже на протяжении долгого времени. В физиотерапии используется способность ультразвука оказывать механическое, химическое и тепловое воздействие на ткани организма. Низкочастотный ультразвук (20–80 кГц) высокой интенсивности применяется в хирургии для разрушения, резки, сварки и коагуляции биологических тканей. Высокочастотный ультразвук (0,5–4,0 МГц) применяется в виде сфокусированного пучка для неинвазивного разрушения мягких тканей (например, опухолей головного мозга), остеотомии (рассечения костей), гемостаза, а также для разрушения камней в полых органах [1]. Нами выполнены исследования и разработаны новые виды ультразвукового оборудования и методы применения низкочастотного высокоинтенсивного ультразвука в сосудистой хирургии, онкологии, стоматологии, а также вакуумное оборудование для лечения острых и хронических инфицированных ран методом вакуумной повязки.

*Оборудование для ультразвукового разрушения внутрисосудистых образований и повышения эластичности сосудистой стенки*

В качестве альтернативы существующим методам лечения, когда попытки восстановления просвета стенозированных и/или окклюзированных артерий внутрипросветной или субинтимальной реканализации, в большинстве случаев оказываются безуспешными, предложен новый комплексный метод лечения, включающий на первом этапе ультразвуковую абляцию окклюзий артерий магистрального типа, а на втором – проведение чрескожной транслюминальной баллонной ангиопластики самостоятельно длинными баллонами или в сочетании со стентированием.

Для реализации предложенного метода разработано новое специальное оборудование (рисунок 1), включающее ультразвуковой генератор с пьезоэлектрическим преобразователем и сменные трубчатые инструменты-волноводы [2, 3].

Применение в сосудистой кардиологии трубчатых инструментов-волноводов длиной до 810 мм для ангиопластики (рисунок 2) обеспечивает эффективное разрушение тромбообразований, а также внутрисосудистое ремоделирование пораженной артериальной стенки путём вибромеханического воздействия, а также вибромеханической фрагментации пораженной

интимы с последующим удалением разрушающихся частиц ткани путем их аспирации из артериального русла. Преимуществами метода ультразвукового разрушения тромбов перед традиционными терапевтическими и хирургическими методами являются: отсутствие оперативного вмешательства; низкая вероятность осложнений; низкая стоимость лечения. Установлено, что низкочастотный низкоинтенсивный ультразвук приводит к повышению эластических свойств и податливости сосудистой стенки пораженной артерии [4].



Рисунок 1 – Ультразвуковое оборудование для внутрисосудистого разрушения тромбообразований



Рисунок 2 – Трубчатый ультразвуковой инструмент-волновод для внутрисосудистого разрушения тромбообразований

Конструкция трубчатой волноводной системы переменного сечения для ультразвукового воздействия на стенки артерий и на сосудистые образования, кроме инструмента-волновода, также включает катетер. Внутренние каналы системы (рисунок 3) предназначены для:

- доставки лекарственных средств, обеспечивающих тромболитическое действие, в зону разрушения внутрисосудистых образований;

- обеспечения сочетанного действия акустоиндуцированного тромболитического и подаваемой по каналу жидкости под давлением.



Рисунок 3 – Схема движения потоков жидкости через систему, включающую инструмент-волновод и катетер

По результатам проведенных исследований метода и оборудования установлено, что в результате 10-минутного ультразвукового воздействия происходит повышение относительной деформации сегмента «мягкого» сосуда в 1,3–1,4 раза по сравнению с исходным сосудом. В результате ультразвукового воздействия в течении такого же временного промежутка на сегмент «твердого» сосуда степень его деформируемости повышается в 2,3–3,9 раза при нагрузке в 0,01 Н и в 1,5 раза при нагрузке 0,2 Н. Эффективность ультразвукового повышения эластичности сосудов наиболее выражена для «твердых», хрупких, сильно кальцифицированных сосудов, по сравнению с «мягкими» сосудами. Состояние сосудов до и после ультразвукового внутрисосудистого воздействия показано на рисунке 4.

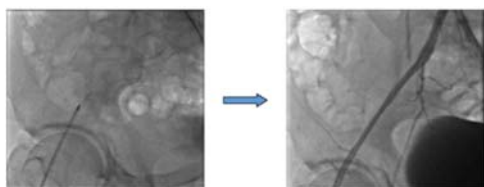


Рисунок 4 – Состояние сосудов до и после ультразвукового воздействия

*Ультразвуковое оборудование для комплексного лечения кожных онкологических заболеваний*

В настоящее время уделяется большое внимание изучению и использованию ультразвука в онкологии в качестве противоопухолевого агента в сочетании с другими методами лечения. Однако применению ультразвука в качестве модификатора радиотерапии уделяется недостаточное внимание.

Для использования в онкологии с целью лечения кожных опухолевых образований нами разработано ультразвуковое оборудование и инструменты-волноводы кольцевой формы (рисунок 5). Установлено, что введение ультразвука с помощью кольцевых инструментов-волноводов в поражённый участок кожи совместно ионизирующим излучением обеспечивает усиление радиосенсибилизирующего противоопухолевого эффекта, что позволяет снизить на 25 % дозу облучения.

Характеристики разработанного оборудования:

- частота – 22–28 кГц;
- интенсивность ультразвука – 0,5–10 Вт/см<sup>2</sup>;
- продолжительность одного сеанса – 3–5 мин.

Оборудование применяется для комбинированного лечения кожных онкологических заболеваний (исключая меланому) I-II стадий (локальное ультразвуковое воздействие на кожные опухолевые образования с последующей лучевой терапией).



Рисунок 5 – Ультразвуковое оборудование для лечения кожных онкологических образований

По результатам исследования метода экспериментально доказана эффективность применения кольцевых волноводных систем для сочетанной терапии опухолей – ультразвук + лучевая терапия. Установлено, что наиболее значимые изменения в опухоли штамма саркомы отмечаются при ультразвуковом воздействии 2,0–2,5–3,0 Вт/см<sup>2</sup>. При этом определяется усиление процессов перекисного окисления липидов и увеличение показателей антиоксидантной системы.

При возбуждении в кольце колебаний с частотой, соответствующей собственной частоте его изгибных колебаний, внутри кольца возникают управляемые акустические давления, приводящие к самоорганизации системы частиц, помещенных внутрь кольца. При изменении частоты акустического поля происходит модификация пространственного распределения акустического давления внутри кольца и изменение направления действия радиационных сил, которые оказывают бесконтактное воздействие на среду.

Клинические испытания, проведенные в 2013 и 2016 гг., показали улучшение результатов лечения базальноклеточного рака кожи на фоне редукции дозы лучевой терапии в условиях соносенсибилизации на 25 %, что сокращает пребывание пациента в стационаре и соответственно уменьшает фармако-экономические затраты на лечение пациентов по сравнению со стандартной методикой. Лечение хорошо переносилось во всех случаях. В результате применения брахитерапии в режиме гипофракционирования с редукцией суммарной очаговой дозы и применением ультразвука уменьшена суммарная очаговая доза, подведенная к опухоли, сокращена длительность курса лечения, сохранена высокая эффективность облучения (100 %) при незначительных лучевых изменениях кожи (1 степень), достигнуты отличные и хорошие косметических результаты.

Непосредственные и ближайшие результаты исследования показывают высокую эффективность, безопасность, хорошую переносимость, комфортность и экономичность разработанного метода контактной лучевой терапии на фоне ультразвуковой модификации.

*Акустическая система и ультразвуковая аппаратура для формирования дентинно-пломбировочного соединения*

Разработано ультразвуковое оборудование для пломбирования корневых каналов зубов с помощью низкочастотного ультразвука, обеспечивающее более качественное заполнение сложных каналов и соединение пломбировочного материала с дентином (рисунок 6).



Рисунок 6 – Ультразвуковое оборудование для применения в стоматологии

Разработанный нами инструмент-волновод в виде эндодонтической насадки диаметром 0,2–1,0 мм и длиной рабочей части 14–21 мм применяется при пломбировании корневых каналов зуба (рисунок 7). Низкочастотный ультразвук, передаваемый эндодонтическим инструмент-волноводом, способствует устранению избыточного содержания воздуха в структуре корневой пломбы, эффективному заполнению внутренней полости корневого канала и микроканалов корня зуба, при котором пломбировочный материал образует герметичное соединение с дентином канала корня зуба. Ультразвуковое воздействие приводит к увеличению адгезии пломбировочного материала к дентину корня зуба, вследствие его проникновения в пористую структуру дентина. Для изготовления инструментов-волноводов нами разработана технология получения конических поверхностей на изделиях малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки [5, 6].



Рисунок 7 – Инструменты-волноводы (насадки), применяемые при пломбировании корневых каналов зуба

Ультразвуковую конденсацию пломбировочного материала осуществляют комбинированными ультразвуковыми колебаниями частотой 22–28 кГц, за счёт чего заполняются мелкие дентинные каналы, латеральные каналы корня зуба, происходят процессы изменения структурирования пломбировочного материала (рисунок 8).

По результатам испытаний установлено, что низкочастотный ультразвук с резонансной частотой 25 кГц способствует изменению физико-химических свойств эндодонтических пломби-

ровочных материалов, о чем свидетельствует улучшение структурных показателей водорастворимости, вязкости и прочности на сжатие исследованных пломбировочных материалов (силеров). При анализе клинических данных пломбирования корневых каналов депульпированных зубов, адекватно запломбированных при помощи низкочастотного ультразвука всех групп зубов обнаружено, что признаки качественной obturation корневых каналов отмечались у 93% исследованных зубов.



Рисунок 8 – Наконечник в корневом канале

Наибольший интерес с точки зрения успешного эндодонтического лечения представляет исследование качества obturation корневых каналов в апикальной части корня зуба. Разветвлённая сеть мелких дентинных каналов в области верхушки корня зуба мало способствует последующей апикальной герметизации, проводимой традиционными методами лечения. Применение низкочастотного ультразвука и гибкого эндодонтического инструмента-волновода для пломбирования корневых каналов зубов в большей мере способствует, заполнению боковых ответвлений в корневых каналах зубов.

Применение разработанного оборудования с различными сменными ультразвуковыми насадками позволяет также выполнять качественное перемешивание пломбировочного материала, насыщение поверхности детских зубов кальцием, а также ряд других функций. Ультразвуковые инструменты-волноводы различного назначения показаны на рисунках 9 и 10.



Рисунок 9 – Ультразвуковая насадка для перемешивания пломбировочного материала



Рисунок 10 – Ультразвуковая насадка для насыщения поверхности детских зубов кальцием

### Оборудование для лечения ран вакуумной терапией

Разработанный аппарат вакуумной терапии КМ-1 (рисунок 11) предназначен для выполнения процедур вакуумной терапии, вакуумно-пульсирующей терапии, вакуумного приточно-отсасывающего дренирования, вакуумного приточно-отсасывающего дренирования с одновременной обработкой низкоинтенсивным лазерным излучением красного, инфракрасного спектра с непрерывной, импульсной и импульсной модулированной частоте.



Рисунок 11 – Блок управления аппарата вакуумной терапии КМ-1

Метод заключается в следующем. На рану накладывают вакуумную повязку, состоящую из губки и пленочного покрытия (рисунок 12). Аппарат создает отрицательное давление, под воздействием которого раневое отделяемое поступает по трубке с фиксирующей головкой в резервуар. Под воздействием этого наблюдается сразу несколько терапевтических эффектов, которые способствуют заживлению раны.

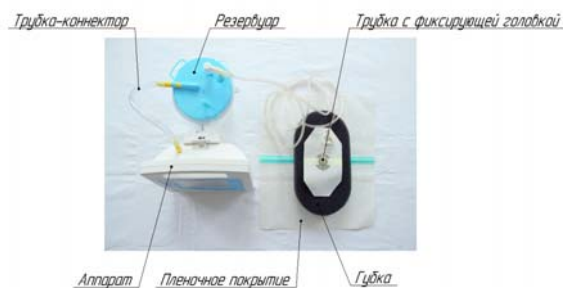


Рисунок 12 – Компоненты аппарата вакуумной терапии КМ-1

Клинические эффекты вакуумной терапии:

– активное удаление избыточного раневого отделяемого, в том числе веществ, замедляющих заживление раны (например, токсины, матриксные металлопротеиназы, продукты распада тканей).

– Сохранение влажной раневой среды, стимулирующей ангиогенез, усиливающей фибринолиз и способствующей функционированию факторов роста.

– Ускорение снижения бактериальной обсемененности тканей раны (общего количества микробных клеток). Доказано, что деконтаминация

(удаление болезнетворных микроорганизмов) ниже критического уровня при вакуум-терапии достигается к 4–5 суткам против 11 суток при других методах местного лечения ран.

– Снижение локального отека тканей, снижение межклеточного давления, усиление местного лимфообращения и транскапиллярного транспорта, что в результате улучшает раневую среду и питание тканей и увеличивает скорость формирования грануляционной ткани, а улучшение перфузии раневого ложа дополнительно способствует деконтаминации раны.

– Усиление местного кровообращения. В исследованиях было выявлено, что прирост интенсивности местного кровообращения при уровне отрицательного давления –125 мм.рт.ст. достигал порядка 400 % по отношению к исходному уровню, а применение локального прерывистого вакуума в течение 5 минут на уровне –125 мм.рт.ст. с последующим снижением вакуумного воздействия в течение 2 мин до –75 мм.рт.ст. является наиболее оптимальным режимом лечебного воздействия на рану для стимуляции местного кровообращения.

– Уменьшение площади раны. Прямое воздействие отрицательного давления на дно и края раны в условиях внешней изоляции оказывает постоянный эффект в отношении краёв раны, способствуя ее стяжению. Этот эффект напрямую снижает размеры раны, независимо от интенсивности клеточной пролиферации. Вакуумная терапия посредством улучшения качества грануляционной ткани повышает шансы на успех в закрытии раны местными тканями. Вследствие того, что вакуумная повязка уменьшает размеры раны, предварительное растяжение местных тканей перед пластикой может не потребоваться.

– Сокращение затрат. Вакуум-повязки накладываются бесценно на продолжительный срок (в среднем на 48 часов). Это позволяет даже в первую фазу раневого процесса обходиться без перевязок, экономия перевязочных средств, препараты местного действия, а также силы и время медицинского персонала.

– Профилактика внутрибольничных инфекций. Длительное отсутствие перевязок у стационарного больного, а значит и контакта раны с инструментом и воздухом лечебного учреждения, руками медицинского персонала снижает риск контаминации раневой поверхности госпитальными штаммами микроорганизмов.

### Литература

1. Хилл, К., Бэмбер, Дж., тер Хаар, Г. ред. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2008. – 544 с.
2. Волновод для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбозолов и метод его изготовления : пат. 005704 ЕАПО, МПК А61В 17/22, А61В 17/32 ; С25F 3/16 / А.Г. Мрочек, И.Э. Адзерихо, Ю.Г. Алексе-

ев, В.Т. Минченя, В.Н. Страх, А.Ю. Королёв ; заявитель УП «Технопарк БНТУ «Метолит». – № а 20030052; заявл. 2003.01.24 ; опубл. 2005.02.09 // Офиц. бюл. / Евраз. пат. организ. – 2005. – № 1. – С. 145.

3. Устройство для устранения непроходимости кровеносных сосудов : пат. ЕАПО, МКП А61В 17/22, 17/3203 / Хрусталёв Б.М., Алексеев Ю.Г., Адзерихо И.Э., Минченя В.Т., Королёв А.Ю., Чур С.Н.; заявитель РИУП НТП БНТУ «Политехник». – № 031620 В1; заявл. № 201501114 от 10.28.2015; опубл. 31.01.2019 г. // Офиц. бюл. / Евраз. пат. организ. – 2019. – № 1. – С. 209.

4. Применение ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В.Т. Минченя,

И.Э. Адзерихо, А.Ю. Королёв // Докл. БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 300–303.

5. Алексеев Ю., Бубулис А., Королёв А., Минченя В., Нисс В., Паулюкас А. Формирование конических изделий малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки in the Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, September 20–22, 2017, с. 47–54.

6. Алексеев Ю.Г. Получение конических поверхностей на изделиях малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.Т. Минченя, В.С. Нисс // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 31 / глав. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 11–18.