
МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год

№ 1 (259) 2010

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

Издается с 1967 г., г. Москва

ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

*С.В. Белов, Ю.К. Данилейко, С.М. Нефедов, В.В. Осико, В.А. Салюк,
Н.В. Бабурин, В.А. Сидоров*

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОХИРУРГИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ С РЕЖИМОМ ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования процесса образования тлеющего плазменного разряда с высокочастотной накачкой в объеме электролита вокруг металлического электрода. В качестве модели взаимодействия с биологической тканью использовался физиологический раствор. Даны оценки кинетических параметров плазмы и характеристик энерговклада различных носителей заряда. Представлены высокочастотные электрохирургические аппараты серии «ПлазмоТом» с режимом генерации низкотемпературной плазмы.

Введение

Высокочастотные электрохирургические аппараты используются в медицинской практике с середины XX столетия; электрохирургия продолжает и сейчас активно развиваться. Механизм рассечения и коагуляции тканей в традиционной высокочастотной электрохирургии носит чисто тепловой характер. По этой причине, несмотря на широкое распространение, традиционная электрохирургия имеет существенный недостаток: выделяется слишком большое количество тепла, что приводит к побочному эффекту – значительному термическому повреждению окружающих тканей [1]. Выполненные в последние годы исследования по генерации низкотемпературной плазмы в форме высокочастотного тлеющего разряда в электролитной среде физиологического раствора и особенностям ее взаимодействия с биологическими тканями позволили разработать принципиально новые электрохирургические технологии. Одной из таких технологий является коблация – объемное плазмохимическое удаление тканей [2], [3]. С появлением серии аппаратов, созданных компанией «Arthro

Care» (США), коблация нашла широкое применение в таких областях хирургии, как артроскопия, ЛОР-хирургия, спинальная хирургия, косметология и гинекология. На основе принципа коблации сейчас создаются новые технологии для лапароскопии, в частности разработана хирургическая система «Vista CTR™ System» (ACMI Corp., Southborough, MA) для применения в урологии [4]. Система включает в себя плазменную хирургическую установку, позволяющую разрезать и удалять мягкие ткани в монополярном и биполярном режимах коблации с одновременным гемостазом. Коагуляция мелких кровеносных сосудов, находящихся в смежной с зоной удаления ткани области, осуществляется остаточным потоком тепла, распространяющимся за пределы границы плазмы. Для коагуляции крупных кровеносных сосудов используется специальный режим, позволяющий выполнить гемостаз за счет мягкого термического воздействия. Такой режим достигается изменением напряжения до уровня, находящегося ниже порога образования плазмы и молекулярного расщепления биоткани. Тем не менее получение адекватного гемостатического эффекта при хирургическом воздействии с помощью

низкотемпературной плазмы является весьма актуальной задачей. Одним из путей решения данной проблемы может быть переход к импульсному режиму с возбуждением аномального тлеющего разряда на рабочем электроде [5].

Обзор последних литературных источников по использованию низкотемпературной плазмы в электрохирургии указывает на заметный рост прикладных работ по исследованию физики тлеющего разряда на границе биоткань-электрод в среде жидкого электролита. Появление таких работ открывает принципиально новые возможности для создания аппаратуры с режимом генерации низкотемпературной плазмы и инновационных технологий ее использования в различных областях хирургии. Однако при разработке аппаратуры и оптимизации ее параметров возникает множество вопросов, связанных с механизмом плазмообразования, кинетикой плазмы тлеющего разряда на границе раздела фаз плазма-металлический электрод и плазма-электролитный электрод, с энергетическими параметрами высокочастотной накачки, конструктивными параметрами электродов и т. п.

Экспериментальные исследования

Чтобы ответить на эти вопросы, исследовали плазменный разряд тлеющего типа с высокочастотной накачкой в объеме электролита вокруг металлического электрода. При хирургическом воздействии активным электродом является «горячий» металлический электрод с одной стороны, а с другой – жидкий электролитный квазиэлектрод на границе плазмы и биоткани. В эксперименте для формирования электролитного электрода использовался изотонический соляной раствор (0,9%-ный весовой раствор NaCl в воде). Электропроводность соляного раствора, составляющая 1,5 См при температуре 23 °С, является важным фактором в определении многих элементов электрической цепи, в которой формируется плазменный разряд.

Наличие электролита вокруг поверхности металлического электрода приводит к образованию однородного по толщине плазменного слоя. Плазменный слой формирует в электролите парогазовый поршень с конфигурацией, повторяющей конфигурацию рабочего электрода. Данный режим будет иметь место до тех пор, пока расширение парогазового поршня не нарушит условие малости толщины плазменного слоя по сравнению с характерным размером металлического электрода. Поскольку слой плазмы образуется вокруг металлического электрода, находящегося в объеме жидкости или биоткани, то электрическая цепь формирования плазмы является монополярной. В наших исследованиях инициация плазмы осуществлялась высокочастотным током с частотой 0,11, 2,64 и 6,78 МГц при амплитудном значении напряжения на электроде в диапазоне до 520 В. Ра-

бочий электрод имел форму эллипсоида с полуосями 3×10^{-6} и 3×10^{-5} м и был погружен в электролит (физиологический раствор, имитирующий биологическую ткань) на половину высоты. Исследование динамики падения тока, протекающего через металлический электрод, на переднем фронте импульса показало, что время вскипания электролита на острие электрода вследствие неустойчивого перегрева имеет величину $(3...4) \times 10^{-5}$ с, а скорость распространения фронта кипения по поверхности электрода составляет приблизительно $(1...2) \times 10^2$ м·с⁻¹.

Первая фаза плазмообразования, заключающаяся в образовании парогазового поршня, характеризует переход от пузырькового к пленочному режиму кипения и носит черты кризисного явления: наблюдается внезапное резкое снижение интенсивности теплоотдачи и соответствующее увеличение температуры теплоотдающей поверхности. Паровая пленка испытывает пульсации: периодически накапливающийся пар отрывается в виде больших пузырей. В момент наступления пленочного кипения тепловая нагрузка, отводимая от поверхности, и соответственно количество образующегося пара имеют минимальные значения. Процесс перехода к пленочному кипению, сопровождающийся возрастанием напряжения и уменьшением тока, показан на рис. 1 в виде осциллограммы тока и напряжения для частоты накачки 2,64 МГц. Измерения тока и напряжения показывают, что сопротивление цепи работает в соответствии с линейным законом Ома при низком напряжении (менее 180 В). При более высоком напряжении, где наблюдаются видимое излучение света и большая скорость образования пузырей, сопротивление становится нелинейным, а на осциллограмме тока наблюдаются гармонические колебания. Среднее сопротивление повышается с увеличением напряжения, согласуясь с формированием паровых слоев, появляющихся вокруг электрода.

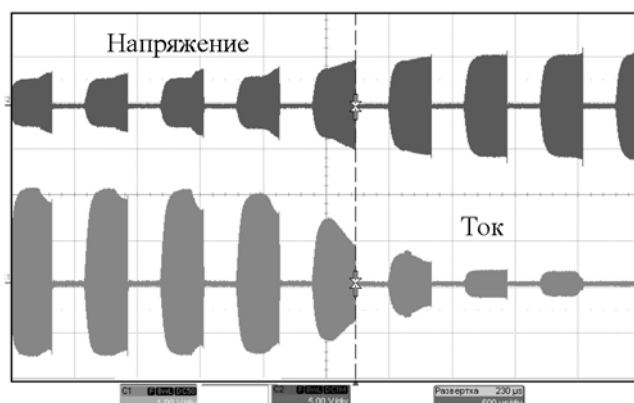


Рис. 1. Процесс перехода к пленочному кипению без образования плазмы: напряжение – 500 В/кл., ток – 1 А/кл., развертка – 500 мкс/кл. (где кл. – клетка)

Вторая фаза перехода от пленочного кипения к тлеющему разряду показана на *рис. 2*. Появление плазмы тлеющего разряда сопровождается значительным снижением силы тока, протекающего через электрод, с величины 4...5 до 0,4...0,5 А и величины потенциала вблизи «горячего» электрода (вне области плазмы), что свидетельствует о том, что при зажигании плазмы большая часть падения напряжения происходит на тонком плазменном слое.

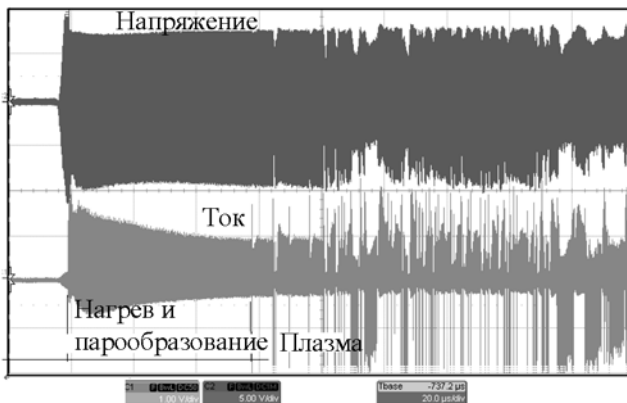


Рис. 2. Динамика перехода от пленочного кипения к плазме. Осциллограммы напряжения (500 В/кл.) и тока (1 А/кл.); развертка – 20 мкс/кл.

Третья фаза – стабилизация плазмы тлеющего разряда изображена на *рис. 3*. Вокруг электрода образуется устойчивая тонкая (50...100 мкм) парогазовая оболочка (ПГО), характеризующаяся малыми колебаниями тока при $U = \text{const}$. Напряженность электрического поля в оболочке достигает $10^4...10^5$ В/см. При температуре около 100 °С такая напряженность способна вызвать ионизацию паров, а также эмиссию ионов и электронов, необходимую для поддержания стационарного тлеющего электрического разряда в парогазовой оболочке.

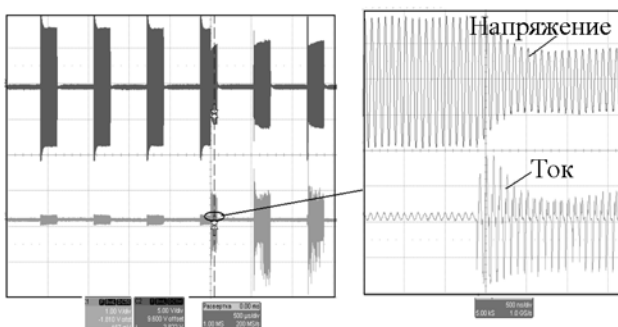


Рис. 3. Динамика стабилизации тлеющего разряда. Осциллограммы напряжения (500 В/кл.) и тока (1 А/кл.); вольфрамовый электрод, соляной раствор

Для установившегося тлеющего разряда, изображенного на *рис. 4*, осциллограмма тока, протекающего через электрод, приведена на *рис. 5*.

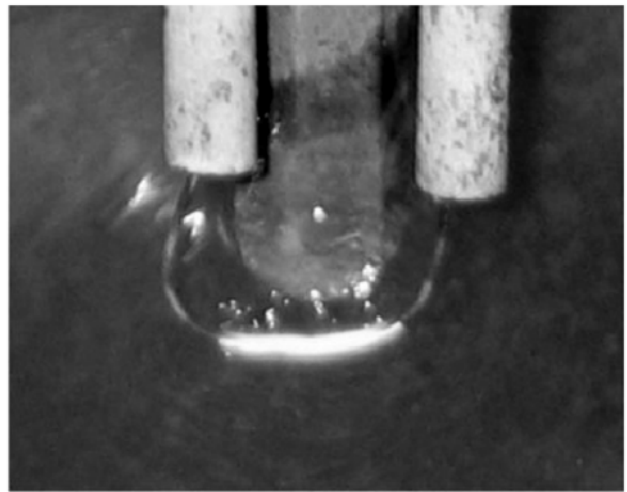


Рис. 4. Установившийся аномальный тлеющий разряд на петлевом электроде; несущая частота – 2,64 МГц

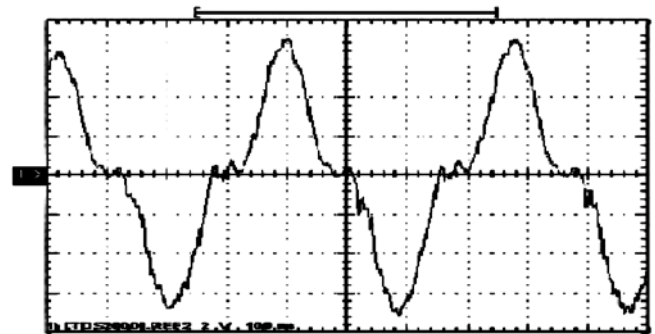


Рис. 5. Осциллограмма тока при тлеющем разряде; амплитудное значение питающего напряжения 520 В, частота – 2,64 МГц

Оценка кинетических параметров

Химические элементы, такие как натрий и хлор, малоподвижны в газовой фазе. Тем не менее происходит их проникновение в паровую фазу, хотя сделанная на основе равновесной термодинамики оценка их концентрации дает 10^{-14} от величины равновесной паровой плотности молекул H_2O [6]. Поэтому целесообразно считать, что их проникновение в газовую фазу обусловлено неравновесными процессами, такими как мгновенное испарение и десорбция, стимулированная электронами, ионами, электрическим полем. Спектроскопические наблюдения показывают, что соляной раствор является источником активных радикалов OH и атомов H и Na в плазме. Наличие линий атома H и радикала OH указывает на молекулярный распад воды на активные составляющие, чем и обусловлена высокая химическая активность плазмы. Спектр оп-

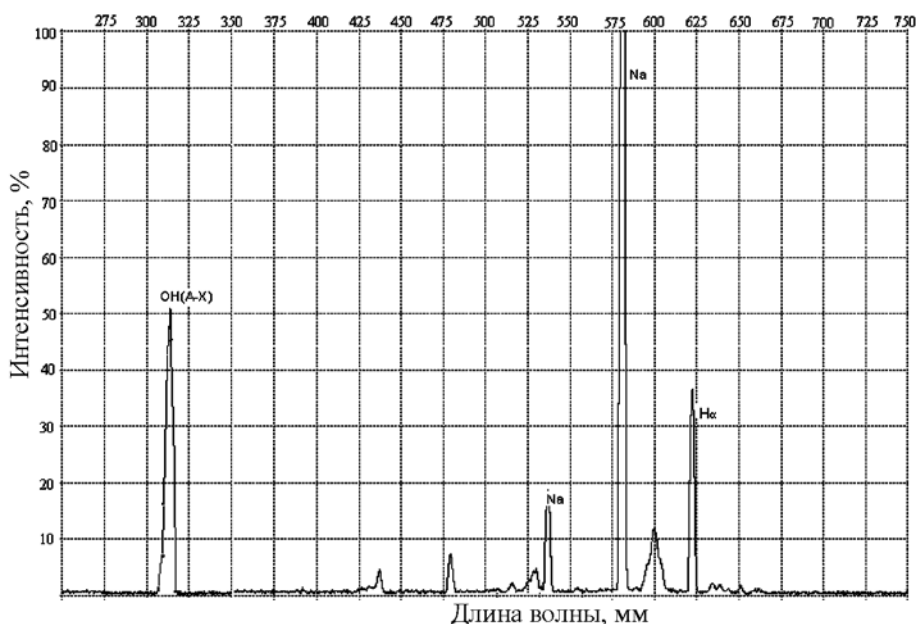


Рис. 6. Спектр оптического излучения плазмы тлеющего разряда

тического излучения, отражающий выделение натрия, гидроксильных радикалов и атомов водорода, представлен на *рис. 6*.

Анализ энергетических потоков в плазме при толщине слоя тлеющего разряда $\Delta L \sim 1,5 \times 10^{-4}$ м проведен с помощью оценки ряда параметров плазмы, выполненных на основе экспериментальных и справочных данных. Результаты оценок приведены в *таблице*.

Таблица

| Параметр | Значение параметра | Физический смысл параметра |
|----------|---|--|
| n_e | $2,6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ | Концентрация свободных электронов в плазме |
| E/N | $1,6 \cdot 10^{19} \text{ В} \cdot \text{м}^{-2}$ | Приведенная напряженность электрического поля в плазме |
| S_e | $3,7 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ | Частота упругих столкновений свободного электрона |
| W | $1,8 \cdot 10^{11} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^3$ | Плотность мощности энерговыделения в плазме |
| S | $2,2 \cdot 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^2$ | Плотность мощности поверхностных источников энерговыделения рекомбинационной природы |

Оценка электронной температуры T_e была получена методом эмиссионной спектроскопии в предположении о локальном термодинамическом равновесии в плазме. Частота упругих столкновений ν_e (длина свободного пробега) электрона в насыщенном паре при температуре $t \approx 100$ °С и атмосферном давлении оценивалась, исходя из величины электронной температуры T_e и табличного значения сечения

рассеяния σ_e молекулой воды свободным электроном при температуре T_e [8]. Концентрация свободных электронов n_e в плазме оценивалась, исходя из плотности тока в плазменном слое $J \approx 1,3 \times 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ и величины $\nu_e \approx 3,7 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$, что позволило получить значение $n_e \approx 4,3 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Отметим, что данная оценка делалась из предположения о постоянстве напряженности поля в плазме и не учитывала сложного распределения потенциала в приэлектродном пространстве тлеющего разряда. Приведенная напряженность электрического поля в плазме $E/N \approx 1,4 \times 10^{19} \text{ В} \cdot \text{м}^{-2}$, где N – концентрация молекул в водяном паре при температуре $T \approx 150$ °С и атмосферном давлении. Пиковое значение напряженности поля E вычислялось, исходя из толщины плазменного слоя $d \approx 1,5 \times 10^{-4}$ м, и равнялось $E \approx 3,8 \times 10^6 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. Плотность мощности энерговыделения в плазме можно оценить как величину, равную $W = 0,5 \cdot n_e \cdot m_e \cdot \nu_e \cdot u_e^2 = 2,5 \times 10^{11} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$ (m_e – масса электрона), что дает для диссипируемой мощности величину $P \approx 140$ Вт в объеме плазмы $V \approx 6 \times 10^{-10} \text{ м}^3$. При этом импульсная мощность, потребляемая во время эксперимента от источника высокочастотного питания, составляла величину примерно 150 Вт, что близко к полученной оценке. Механизм диссипации энергии определяется в основном неупругими потерями за счет диссоциативного «прилипания» горячих электронов в плазме водяного пара при энергии примерно 4 эВ [6]. Происходит «прилипание» свободного электрона к молекуле воды и ее последующая диссоциация с образованием иона H⁺ и молекулы гидроксила OH. При этом важным моментом является то, что характерное время диффузии водорода и молекул гидроксила к электродам при толщине плазменного слоя $\Delta L \approx 10^{-4}$ м и их последующей гетерогенной

рекомбинации на электродах меньше характерно-го времени их объемной рекомбинации. Это означает, что диссипация энергии, полученной от разогретых в межэлектродном промежутке электронов, происходит преимущественно на поверхности металлического электрода и границе раздела пар-электролит посредством поверхностной гетерогенной рекомбинации. Таким образом, переход энергии диссоциации в тепло связан с поверхностными энергетическими источниками, обусловленными гетерогенной рекомбинацией поступающих из плазмы ионов, активных атомов и молекул. Эти источники локализованы исключительно на границах раздела фаз плазма-металлический электрод и плазма-электролитный электрод, и, следовательно, мощность данных источников определяется током, протекающим через плазму, и практически не зависит от ее температуры.

Основные результаты

1. Формирование высокочастотного плазменного разряда тлеющего типа в объеме жидкого электролита проходит три фазы: фаза образования парогазового поршня, сопровождающаяся переходом от пузырькового к пленочному режиму кипения; неустойчивая фаза перехода от пленочного кипения к тлеющему разряду; фаза стабилизации плазмы тлеющего разряда, характеризующаяся образованием вокруг электрода устойчивой тонкой (50...100 мкм) парогазовой оболочки (ПГО) и малыми колебаниями тока при $U = \text{const}$.

2. Горение плазменного тлеющего разряда в изотоническом водном растворе NaCl для игольчатого и петлевого электродов с характерными размерами ($l \approx 15...20$ мм; $d \approx 0,3...0,5$ мм) может быть обеспечено высокочастотным током частотой 0,11...2,64 МГц при амплитудном значении напряжения на электроде от 370 до 520 В.

3. Диссипация энергии, полученной от разогретых в межэлектродном промежутке электронов, происходит преимущественно на поверхности металлического электрода и границе раздела пар-электролит посредством гетерогенной рекомбинации.

4. Энергия, связанная с разогревом свободных носителей заряда в плазме (электронов), уходит на диссоциацию водяного пара и в меньшей степени тратится на его непосредственный нагрев. Поскольку $T_e \gg T_{\text{gas}}$, температура плазмы может оставаться низкой.

5. Переход энергии диссоциации в тепло связан с поверхностными энергетическими источниками, обусловленными гетерогенной рекомбинацией поступающих из плазмы ионов, активных атомов и молекул. Мощность этих источников определяется током, протекающим через плазму, и практически не зависит от ее температуры, что дает возможность изменять температуру плазмы.

6. Воздействие низкотемпературной плазмы на биологические ткани имеет плазмохимическую



Рис. 7. Аппарат «ПлазмоТом-ГХ» (регистрационное удостоверение № ФСР 2009/05740 от 06 октября 2009 г.)

природу и является чрезвычайно активным за счет образования в плазме химически активных ионов H^+ и гидроксильных радикалов OH . В частности, радикал OH отвечает за расщепление белковых структур [8]-[10].

7. В процессе хирургического воздействия граница раздела между массивом ткани и плазмой является источником проникающих из плазмы активных частиц, которые обуславливают механизмы рассеяния и удаления ткани. Так как поверхность удаляемой ткани подвержена воздействию частиц плазмы, то возможен небольшой некроз прилегающей области. Очевидно, что степень и глубина тканевого некроза зависят от специфики хирургического вмешательства.

Высокочастотные электрохирургические аппараты серии «ПлазмоТом»

Результаты исследования аномального тлеющего разряда на рабочем электроде в среде электролита были положены в основу разработки высокочастотных электрохирургических аппаратов с режимом генерации низкотемпературной плазмы серии «ПлазмоТом», проводимой научно-производственной компанией ООО «Новые энергетические технологии». В настоящее время разработаны и подготовлены к производству три инновационные модели:

аппарат для применения в гинекологии «Плазмотом-ГХ», аппарат для применения в общей хирургии «Плазмотом-ОХ», аппарат для применения в челюстно-лицевой хирургии «Плазмотом-ЧХ». Все аппараты серии «Плазмотом» (рис. 7) имеют единую эргономику и дизайн и отличаются главным образом набором рабочих частот, математическим обеспечением, логикой интерфейса.

В качестве особенностей аппаратов серии «Плазмотом» следует отметить следующие:

1. Реализован плазменный режим воздействия на биоткани на рабочих частотах: 0,11; 2,64; 6,78; 13,56 МГц (в различных сочетаниях для каждой модели), для которого характерны:

1.1 образование в тонком паровом слое по поверхности электрода низкотемпературного разряда, близкого по характеристикам к «тлеющему»;

1.2 падение основной части подводимого к рабочему электроду напряжения на плазменном слое;

1.3 значительное снижение уровня энерговыделения за плазменным слоем (в объеме биоткани);

1.4 разрушение биоткани на границе плазма-биоткань.

2. Факторами воздействия на биоткань являются:

2.1 выделение энергии за счет гетерогенной рекомбинации на границе плазма-биоткань;

2.2 ультрафиолетовое излучение;

2.3 возможное воздействие на биомолекулы сил, имеющих керровскую природу;

2.4. наличие пероксида водорода и ОН-групп на границе плазма-биоткань.

3. Уровень диссипируемой мощности может выбираться частотой следования импульсов. Генерация высокочастотной мощности до 250 Вт на всех рабочих частотах обеспечивается в рабочем диапазоне изменений импеданса.

4. Автоматическое поддержание режима работы на пороге образования «тлеющего» разряда осуществляется за счет нелинейности процесса высокочастотного разряда (по амплитуде высших гармоник).

5. Возможность перехода к режиму пробоя (искрового разряда) позволяет реализовать взрывной механизм разрушения биотканей.

6. Регистрация и анализ величин напряжения на электроде, тока и выделяемой мгновенной мощности для реализации различных алгоритмов автоматического управления параметрами электрохирургического воздействия осуществляются на основе динамической обратной связи.

Работа выполнена ООО «Новые энергетические технологии» при участии специалистов Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН в рамках государственного контракта № 02.522.11.2017 от 15 августа 2008 г.

Список литературы:

1. Долецкий С.Я., Дробкин Р.П., Ленишкин А.И. Высокочастотная электрохирургия. – М.: Медицина, 1980. 198 с.

2. Woloszko J., Gilbride C. Coblation technology: Plasma mediated ablation for otolaryngology applications / Rep. Arthro Care Corp. – Sannvale. CA 940886. 2001. P. 102-114.
3. Woloszko J., Kenneth R., Brown G. Plasma characteristics of repetitivity-pulsed electrical discharges in saline solutions used for surgical procedures // IEE Transactions on Plasma Science. 2001. Vol. 30. № 2. P. 1376-1383.
4. Патель А., Адвед Ж. Биполярная TURP: первый мультицентровый опыт нового подхода с использованием технологии кобляции // J. Endourology. 2003. 17 (1): A190.
5. Voyles S.R., Tucker R.D. Essentials of Monopolar Electrosurgery. – Electrosurgical Concepts. USA. 1992.
6. Pitzer K.S. Thermodynamics of sodium chloride in steam // J. Phys. Chem. 1983. Vol. 87. P. 1120-1125.
7. Cherrington B.E. Gaseous Electronics and Gas Laser. – Oxford, N.Y. Pergamon Press, 1982.
8. Schiller J., Arnhold J., Schwinn J., Sprinz H., Brede O. and Arnold K. Reactivity of cartilage and selected carbohydrates with hydroxyl radicals // Free Rad. Res. 1998. Vol. 28. P. 215-228.
9. Garrison W.M. Reaction mechanisms in the radiolysis of peptides, polypeptides, and proteins // Chem. Rev. 1987. Vol. 87. P. 381-398.
10. Hawkins C.L. and Davies M.J. Generation and propagation of radical reactions on proteins // Biochem. Biophys. Acta. 2001. Vol. 1504. P. 196-219.

Сергей Владимирович Белов,

д-р техн. наук, ст. научный сотрудник,

зам. руководителя лаборатории,

Юрий Константинович Данилейко,

д-р физ.-мат. наук, профессор,

руководитель лаборатории,

ООО «Новые энергетические технологии»,

Сергей Михайлович Нефедов,

старший научный сотрудник,

Вячеслав Васильевич Осико,

академик РАН,

руководитель Центра нанотехнологий,

ИОФ РАН им. Прохорова,

Виктор Афанасьевич Салюк,

д-р техн. наук,

зам. руководителя лаборатории,

ООО «Новые энергетические технологии»,

Николай Владимирович Бабурин,

научный сотрудник,

ИОФ РАН,

Владимир Алексеевич Сидоров,

инженер,

ООО «Новые энергетические технологии»

г. Москва,

e-mail: ser79841825@yandex.ru