

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

УДК 533.9

ПРЕИМУЩЕСТВА СТРУИ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ В ПРОТИВОРАКОВОЙ ТЕРАПИИ

© 2023 г. И. В. Швейгер^{a,*}, Д. Э. Закревский^{a,b,c}, Е. В. Милахина^{a,b,c},
А. Л. Александров^a, М. М. Бирюков^{a,d}, О. А. Коваль^{a,d}

^aИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

^bИнститут физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

^cНовосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^dИнститут химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: ivschweigert@gmail.com

Поступила в редакцию 01.08.2023 г.

После доработки 17.08.2023 г.

Принята к публикации 20.08.2023 г.

В эксперименте и численном моделировании проводится сравнение интенсивности взаимодействия гелиевой холодной плазменной струи (ХПС) с диэлектрической поверхностью и с кожей животных. ХПС при атмосферном давлении генерируется синусоидальным или положительным импульсным напряжением с различной длительностью импульса в оптимальных режимах. Эффект воздействия оценивается на основе измеренных и рассчитанных токов, интенсивностей линий в спектре ХПС и температурных полей. Измеренные характеристики ХПС показывают, что импульсный характер возбуждения ХПС является предпочтительным по сравнению с синусоидальным режимом. Варьирование длительности импульсов периодического импульсного напряжения позволяет получить максимальные ток и напряженность электрического поля у поверхности в рамках допустимой температуры в зоне контакта ХПС с кожей мышей (<42°C). Показано, что результаты исследования ХПС полученные в физических экспериментах с использованием диэлектрической пластины применимы для воздействия на мышей-опухоленосителей.

Ключевые слова: холодная плазменная струя, импульсное напряжение, длительность импульса, температура поверхности, оптимизация режимов

DOI: 10.31857/S0367292123601042, **EDN:** FYKBFD

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно изучается биофизическое воздействие низкотемпературной плазмы на онкологические образования с использованием барьерного разряда и плазменной струи при атмосферном давлении (см. например, обзоры [1, 2] и ссылки в них). Начиная с пионерских работ [3–6] по применению низкотемпературной плазмы для подавления жизнеспособности раковых клеток получены многообещающие результаты в фундаментальных исследованиях и клинических испытаниях [7, 8].

Практически все плазменные источники, разработанные для медицинских приложений и экспериментальных исследований, генерируют низкотемпературную плазму с использованием синусоидального напряжения (см. например, [9]). Различный дизайн и входные параметры плазменных устройств затрудняют выработку единых критериев эффективного воздействия холодной

плазменной струи (ХПС) на онкологические образования. Однако установлено, что слабое воздействие ХПС стимулирует регенерацию тканей при хронических ранах, а при повышенном энергокладе ХПС подавляет жизнеспособность раковых клеток, практически не влияя на здоровые клетки [10].

Целью данных исследований является оптимизация условий воздействия ХПС генерируемой в струе гелия на биологические объекты при повышенном энергокладе для увеличения интенсивности генерации активных радикалов и увеличения напряженности электрического поля у поверхности для активации раковых клеток [11] в рамках безопасного электрофизического и теплового воздействия на живые ткани.

Преимуществом ХПС с периодическим импульсным напряжением по сравнению с синусоидальным является возможность оптимизировать характеристики ХПС, изменяя длительность им-

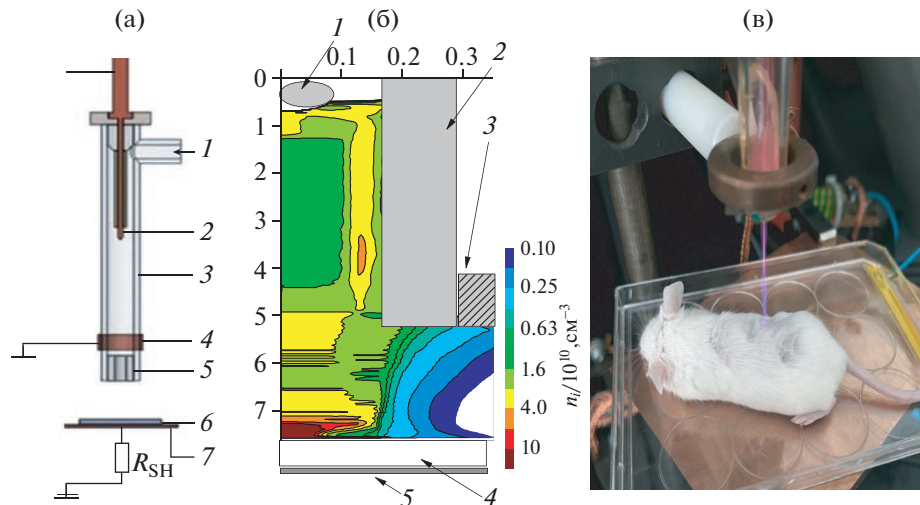


Рис. 1. Схема экспериментального устройства: (а) 1 – подача газа, 2 – электрод под напряжением, 3 – диэлектрический канал, 4 – заземленное кольцо, 5 – капиллярная вставка, 6 – объект, 7 – заземленная металлическая пластина; (б) – модельный плазменный источник с расчетным распределением концентрации ионов H_2^+ в момент касания стримером поверхности, $U = 4.2$ кВ, $f = 30$ кГц, импульсное напряжение с $\tau_U = 7$ мкс, 1 – электрод под напряжением, 2 – диэлектрический канал, 3 – заземленное кольцо, 4 – объект, 5 – заземленная металлическая пластина; (в) – фотография мыши во время воздействия ХПС.

пульсов при постоянной амплитуде и частоте рабочего напряжения. Стримерный пробой и распространение стримеров по потоку инертного газа в окружающей атмосфере зависит от установления концентрации плазмы во временных интервалах между импульсами напряжения. Недостаточная фоновая концентрация плазмы не позволяет стримеру достичь обрабатываемой поверхности, так же как и избыточная концентрация фоновой плазмы является препятствием для прохождения стримера от диэлектрического канала к поверхности воздействия. Варьирование длительности импульса позволяет менять режимы распространения стримера от нагруженного электрода до объекта воздействия. Сравнение электрофизических и тепловых характеристик на диэлектрической пластине и коже мышей проводится при воздействии ХПС, генерируемой в оптимальных режимах. Эти режимы были выявлены ранее по результатам физических и биологических экспериментов и численного моделирования [12, 13]. Как было показано ранее [14] ток разряда является одной из основных измеряемых характеристик взаимодействия ХПС с поверхностью.

При работе с синусоидальным напряжением максимальный эффект воздействия ХПС наблюдался при амплитуде $U = 3.3$ кВ и частоте $f_U = 50$ кГц с частотой тока $f_I = 50/4$ кГц, а для импульсного напряжения при амплитуде $U = 3.8$ – 4.2 кВ и частоте рабочего напряжения $f_U = 30$ кГц. Отметим, что для синусоидальной ХПС при не-

значительном повышении U и f характерно несовпадение частоты прикладываемого напряжения и частоты касания тока подложки $f_I \neq f_U$ [15].

2. ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ ПЛАЗМЕННУЮ СТРУЮ И ОПИСАНИЕ РАССЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

2.1. Эксперимент

Источник плазменной струи, представленный на рис.1 (а), это разрядная ячейка в виде коаксиального диэлектрического канала длиной 7 см, с внутренним диаметром 1 см. В центре канала расположен медный электрод в виде стержня длиной 5 см и диаметром 0.2 см, к которому прикладывается напряжение $U(t)$. В конце канала размещено сопло – диэлектрический капилляр с диаметром отверстия 0.26 см и длиной 0.5 см. Разрядная зона формируется между внутренним высоковольтным U -электродом и кольцевым заземленным электродом, расположенным снаружи у сопла диэлектрического канала.

Эксперименты проводились с гелием He (марка А с объемной долей 99.995%). Для инициации плазменной струи использовались генератор синусоидального напряжения на фиксированной частоте $f_U = 50$ кГц, генератор однополярных положительных импульсов с регулируемой частотой следования $f = 1$ – 40 кГц, который формировал импульсы длительностью (по основанию) $\tau_U = 6$ – 20 мкс. Амплитуда напряже-

ния U ограничивалась для обеспечения безопасных условий воздействия ХПС на живые объекты. Для инициирования ХПС использовалось синусоидальное напряжение с амплитудой $U < 3.3$ кВ и импульсное напряжение с амплитудой $U < 4.2$ кВ. Для измерения напряжения использовался омический высокоомный делитель. Измерения тока проводились датчиком, расположенным на расстоянии z от сопла перпендикулярно оси распространения плазменной струи и представлявший собою коллектор — плоский металлический электрод. Заземление коллектора через шунт — малоиндуктивное сопротивление — позволяло регистрировать частоту и амплитуду импульса тока I , достигающего коллектора. Заземленный металлический коллектор, на котором помещался объект воздействия, позволял увеличить напряженность электрического поля у поверхности объекта и скорость генерации активных радикалов в зоне контакта струи с объектом воздействия [16]. В экспериментах использовались два вида мишеней: в качестве тестовой применялась керамическая пластина из оксида алюминия Al_2O_3 толщиной 0.1 см; в биофизических экспериментах — лабораторные мыши с выбритой зоной контакта. Расстояние от сопла до объекта выбиралось равным 2.5 см.

Для спектральных измерений использовался спектрометр “Колибри-2” [17], настроенный на диапазон длин волн $\lambda = 190\text{--}360$ нм с оптическим разрешением 0.17 нм. Регистрация оптического излучения в области контакта плазменной струи с мишенью осуществлялась на расстоянии 3 мм от мишени под углом 30° градусов от вертикали, при этом излучение передавалось на спектрометр через многомодовый кварцевый световод.

Все эксперименты сопровождалось измерением температуры области взаимодействия плазменной струи с объектом при помощи тепловизора Testo 872 с точностью измерений $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

2.2. Моделирование

Численный расчет динамики стримерного пробоя проводился для условий эксперимента с использованием гидродинамического приближения и физической модели, представленной в работе [18]. В модельной плазменной ячейке (рис. 1 б)) расстояние между U -электродом и кольцевым заземленным электродом равняется 4.5 см, и расстояние между соплом и диэлектрической пластиной — 2.5 см. Радиус U -электрод под напряжением расположенном в диэлектрическом канале — 0.1 см. Размеры расчетной области по $r = 7$ см и по $z = 7.8$ см.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования интенсивности взаимодействия ХПС с поверхностью объекта проводились на основе измерения тока на шунте, спектральных характеристик и тепловых полей. ХПС зажигалась с использованием синусоидального напряжения с амплитудой $U = 3.3$ кВ и частотой $f_U = 50$ кГц и положительного импульсного напряжения с величиной импульса 4.2 кВ и частотой 30 кГц. Все эксперименты проводились при подаче через канал рабочего газа гелия с расходом $v = 9$ л/мин (скорость газа 7.4 м/с), и расстояние между соплом плазменного устройства и поверхностью равнялось 2.5 см. Ранее в работе [13] было показано, что данные режимы являются оптимальными при синусоидальном и импульсном напряжениях для диэлектрической мишени. При этом интенсивность взаимодействия плазма—объект была максимальна при инициировании плазменной струи импульсным напряжением с длительностью импульсов $\tau_U = 7$ мкс ($U = 4.2$ кВ и $f_U = 30$ кГц), а температура поверхности T не превышала 42°C . Измеренная интенсивность линии гидроксидов ОН на $\lambda \approx 309$ нм возрастала при уменьшении длительности импульса. Расчетная полная ионизация у поверхности мишени также имела максимальное значение для $\tau_U \approx 7$ мкс ($U = 4.2$ кВ и $f_U = 30$ кГц). Там же было показано, что жизнеспособность раковых клеток аденокарциномы легкого человека A549 через 24 часа после обработки плазмой была существенно меньше для более короткого импульса с $\tau_U \approx 7$ мкс относительно импульса с $\tau_U \approx 15$ мкс.

В настоящей работе эксперименты по воздействию плазменной струи на животных проводились с импульсным напряжением с двумя длительностями импульсов, с $\tau_U \approx 7$ и $\tau_U \approx 14$ мкс. На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов напряжения и тока при $U = 3.8$ кВ, $f_U = 30$ кГц и двух значений длительности импульса, — короткого $\tau_U \approx 7$ и длинного 14 мкс. В качестве объекта воздействия использовались диэлектрическая пластина и живые мыши, лежащие на диэлектрической пластине из полистирола. В обоих случаях заземленный электрод располагался под диэлектрической пластиной для усиления воздействия. Видно из рис. 2а, б, что на диэлектрической пластине ток для “короткого” импульса достигает $I \approx 5$ мА и в 2 раза превышает ток для “длинного” импульса $I \approx 2.5$ мА, что согласуется с результатами работы [19]. В случае подопытных животных (рис. 2в, г) измеренный ток примерно совпадает с током на диэлектрической пластине. Кроме того, ток для “короткого” импульса превышает ток для “длинного” импульса примерно в два раза, аналогично случаю с диэлектрической поверхностью. Отметим, что как для диэлектрика, так и для живого объекта воздействия частота касания

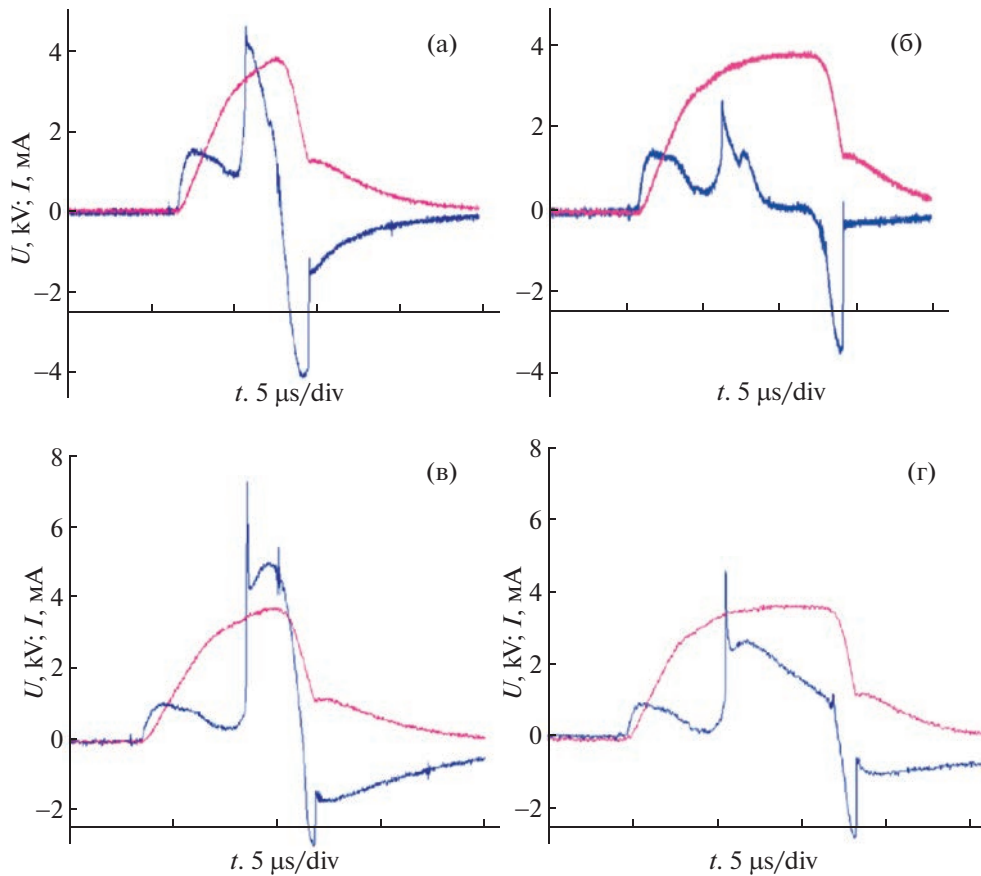


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (красный) и тока у поверхности (синий) при воздействии плазменной струей на диэлектрическую мишень (а, б) и на кожу животных (в, г) для $U = 3.8$ кВ, $f = 30$ кГц и двух значений длительности импульса напряжения $\tau_U \approx 7$ (а, в) и $\tau_U \approx 14$ мкс (б, г).

стримером поверхности совпадала с частотой напряжения для $\tau_U \approx 7$ мкс и уменьшалась в 2 раза для $\tau_U = 14$ мкс, то есть, $f_I = f_U/2 \approx 15$ кГц. Данные результаты важны для трансляции результатов физических исследований с диэлектрической пластиной на животных-опухоленосителях.

На рис. 3 приведены фрагменты спектра плазменной струи в диапазоне $\lambda = 305\text{--}316$ нм и зависимость интенсивности линии ОН от напряжения. Спектры регистрировались в области контакта плазменной струи с бритой кожей мыши для $\tau_U \approx 7$ мкс и $\tau_U \approx 14$ мкс при различных напряжениях. В выбранном диапазоне присутствуют линии гидроксида ОН ($\lambda \approx 309$ нм, переход $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$) и молекулярного азота N_2 . Из сравнения спектров видно, что интенсивность линии ОН для обеих длительностей импульса увеличивается с ростом U , при этом для импульса $\tau_U \approx 7$ мкс при прочих равных условиях интенсивность больше, чем для импульса $\tau_U \approx 14$ мкс. Интенсивность спектра линии ОН для $\tau_U \approx 7$ мкс (рис. 3(б)), полученная усреднением данных по нескольким животным, показывает существенный рост при

$U > 3.5$ кВ. Данное наблюдение коррелирует с измерениями тока, приведенными на рис. 4. Ток возрастает с увеличением напряжения U и по абсолютной величине больше для короткого импульса напряжения.

На рис. 4 показано также относительное изменение температуры у поверхности для синусоидального и импульсного напряжений с $\tau_U = 7$ мкс и $\tau_U = 14$ мкс. Нормальная температура кожи спящей мыши равняется $35\text{--}36^\circ\text{C}$, поэтому допустимое повышение температуры в зоне контакта около 9°C при обработке в течение 1–2 мин. Для случая синусоидального напряжения данное ограничение по температуре допускает напряжение не больше 3.3 кВ при $f_U = 50$ кГц, при котором ток достигает 4.3 мА. Недостатком данного режима является его неустойчивость, в результате которой режим с частотой тока $f_I = 50/4$ кГц стохастически переходит в режим с $f_I = f_U/2$ (50/2 кГц) или $f_I = f_U$ (50 кГц), что сопровождается резким повышением тока и температуры. Режимы с импульсным напряжением обеспечивают одновременно достаточно большой ток и незна-

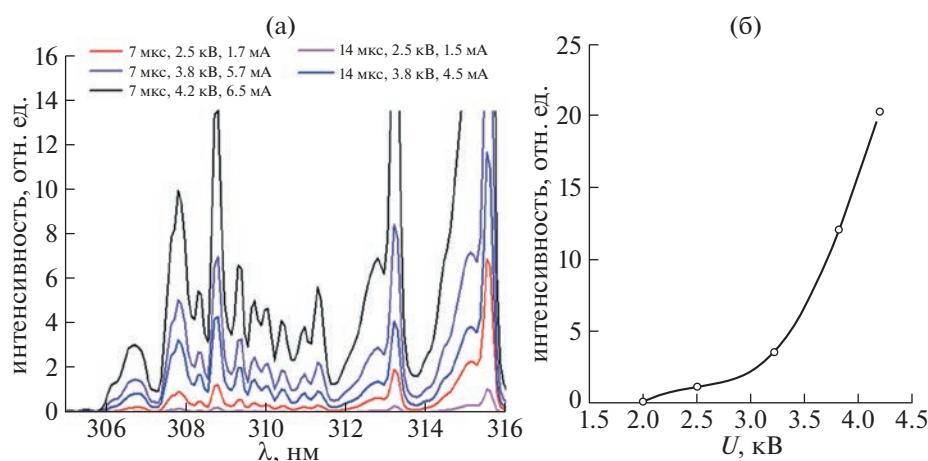


Рис. 3. Фрагменты спектра свечения плазменной струи в диапазоне длин волн $\lambda = 305\text{--}316$ нм, в области контакта плазменной струи с побритой кожей мыши для импульсов $\tau_U \approx 7$ мкс и $\tau_U \approx 14$ мкс (а), и интенсивность спектра линии гидроксила ОН для различных значений напряжения для коротких импульсов $\tau_U \approx 7$ мкс (усредненные данные по нескольким животным) (б).

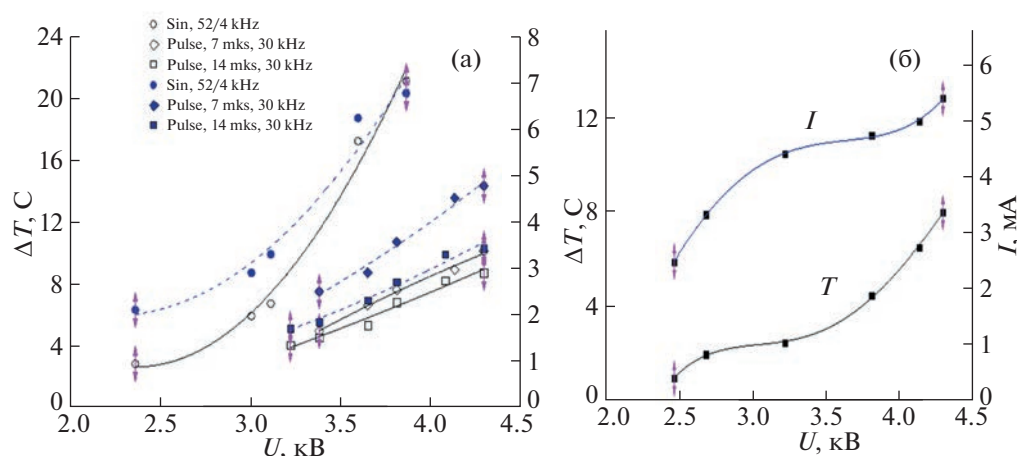


Рис. 4. Амплитуда тока (пунктир) и относительное повышение температуры ΔT (сплошные линии) у диэлектрической пластины от амплитуды напряжения для синусоидального и импульсного напряжения (а), те же данные на коже мыши для импульсного напряжения с длительностью импульса 7 мкс (б).

чительное повышение температуры поверхности. Наилучшим вариантом является импульсный режим с $f = 30$ кГц, $U = 3.8\text{--}4.2$ кВ и $\tau_U \approx 7$ мкс.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численные расчеты формирования и распространения стримеров проводились в течение 10–15 периодов напряжения для установления периодичности движения стримеров к поверхности диэлектрической пластины на заземленном электроде. Получено, что при генерации стримерного пробоя с использованием положительного импульсного напряжения с амплитудой 4.2 кВ и ча-

стойкой 30 кГц каждый стример достигает поверхности диэлектрической пластины для длительности импульса 7 мкс и только каждый второй стример для $\tau_U = 14$ мкс, что согласуется с данными эксперимента. Z-координата головки стримера от времени для $\tau_U = 7$ мкс (рис. 5 (а)) демонстрирует регулярное движение стримера от U-электрода до поверхности диэлектрической пластины в каждый период напряжения. Профили концентрации ионов по оси симметрии в различные моменты времени: до образования стримера, в момент прохождения стримером диэлектрического канала и после касания стримером диэлектрической поверхности даны на рис. 5 (б). Концентрация плазмы в квазинейтральном стол-

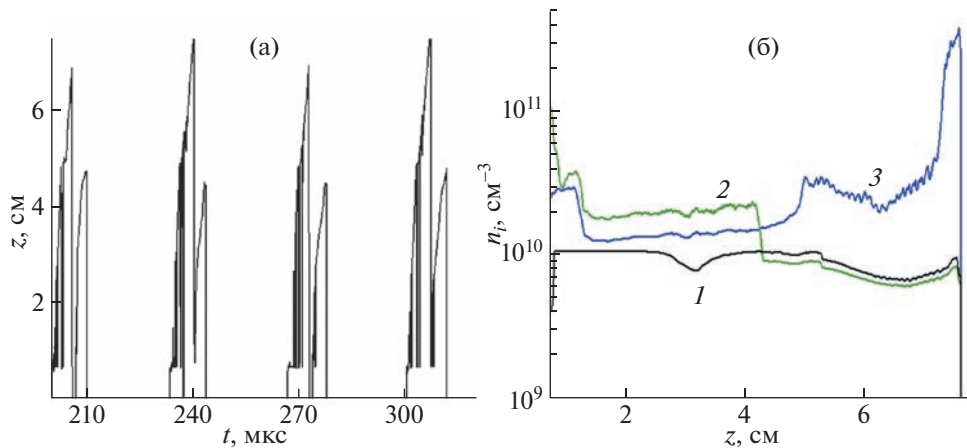


Рис. 5. Z-координата головки стримера от времени в течение 4 периодов напряжения (а) и распределение концентрации двухзарядных ионов гелий He^{2+} в различные моменты времени: 1 — до образования стримера, 2 — в момент прохождения стримером диэлектрического канала и 3 после касания стримером диэлектрической поверхности (б), 4.2 кВ, 30 кГц, длина импульса напряжения $\tau_U = 7$ мкс.

бе варьируется на порядок до и после прохождения стримера. Для более короткого импульса напряжения, когда напряжение на U -электроре начинает падать, стример из катодо-направленного может перейти в анодо-направленный режим, когда потенциал плазмы в голове стримера и плавающий потенциал заряженной диэлектрической поверхности становятся выше потенциала на U -электроре.

Отметим, что для успешного распространения стримера необходима начальная фоновая концентрация, но она не должна превышать критическое значение, которое определяется соотношением концентрации плазмы в голове стримера к фоновой концентрации. Подобный эффект взаимодействия стримеров с фоновой плазмой наблюдался в численном моделировании в работе [20]. В нашей работе при импульсном напряжении с длинным импульсом ($\tau_U = 14$ мкс) процесс ионизации продолжается дольше, чем для случая с $\tau_U = 7$ мкс, и концентрация квазинейтральной плазмы примерно в 1.5–2 два раза больше. При $\tau_U = 14$ мкс, только каждый второй стример достигает поверхности объекта, так как требуется большее время для понижения концентрации плазмы за счет рекомбинации и диффузионно-дрейфового ухода плазмы.

Токи, рассчитанные у поверхности объекта в зависимости от времени показаны на рис. 6 для двух последовательных импульсов. Движение стримеров установившееся и квазипериодическое: при $\tau_U = 7$ мкс каждый стример достигает поверхности, а при $\tau_U = 14$ мкс только каждый второй. Ток смещения рассчитывался по изменению по времени напряженности электрического поля у поверхности объекта. Для наших рабочих

параметров ток смещения меньше тока проводимости. Ток проводимости в случае, когда стримеры приближаются к поверхности (рис. 6 (а)) в 2–3 раза больше для случая с $\tau_U = 7$ мкс по сравнению током при “длинных” импульсах. В следующем цикле напряжения стример с $\tau_U = 14$ мкс распадается при $z = 5.9$ см, и расчетный ток у поверхности в десятки раз меньше (рис. 6 (б)), чем при $\tau_U = 7$ мкс.

Изменение концентрации и температуры электронов у диэлектрической поверхности для двух периодов напряжения показаны на рис. 7 для импульсного напряжения с $\tau_U = 7$ мкс и $\tau_U = 14$ мкс. Видно, что концентрация и температура электронов у поверхности меньше для импульса с $\tau_U = 14$ мкс, что объясняет уменьшение интенсивности излучения плазменной струи, наблюдаемой экспериментально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование взаимодействия гелиевой холодной плазменной струи (ХПС) в воздухе с модельной диэлектрической пластиной и с кожей животных для верификации идентичности результатов. Данное сравнение необходимо для дальнейшей трансляции на животных-опухоленосителях оптимальных режимов ХПС, полученных на диэлектрической пластине. ХПС инициировалась синусоидальным напряжением с $U = 3.3$ кВ, $f_U = 50$ кГц с частотой тока $f_I = 50/4$ кГц и импульсным напряжением с $U = 3.8$ –4.2 кВ, $f_U = 30$ кГц с длительностью импульсов 7 и 14 мкс. Взаимодействие ХПС с диэлектрической поверхностью и биологическим объектом характеризо-

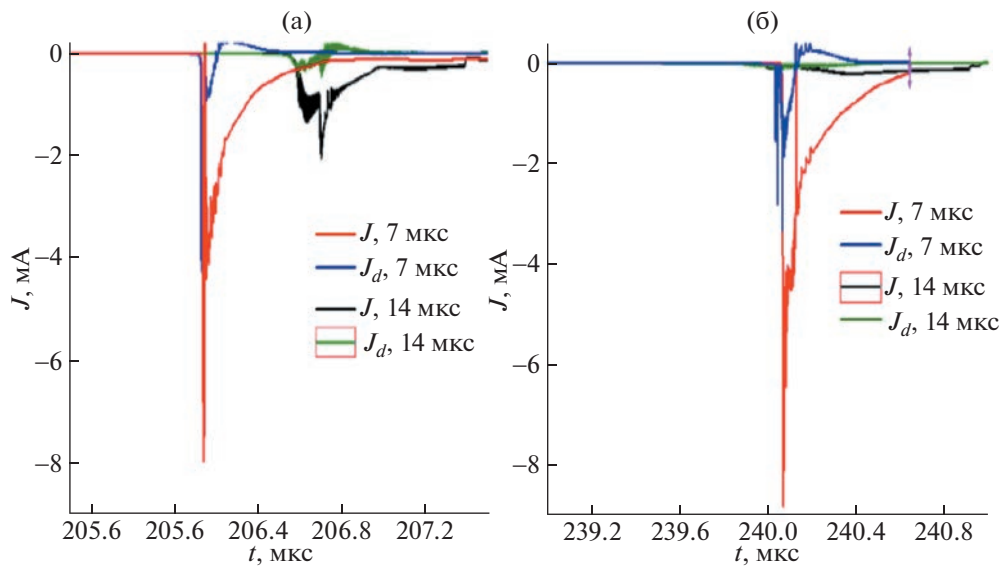


Рис. 6. Ток проводимости J и ток смещения J_d в зависимости от времени для двух периодов напряжения в момент приближения стримеров к поверхности для двух длин импульса напряжения $\tau_U = 7$ мкс и $\tau_U = 14$ мкс и $U = 4.2$ кВ, $f = 30$ кГц. (а) стримеры для $\tau_U = 7$ мкс и $\tau_U = 14$ мкс касаются поверхности и (б) только стример для $\tau_U = 7$ мкс касается поверхности, а при $\tau_U = 14$ мкс затухает при $z = 5.9$ см.

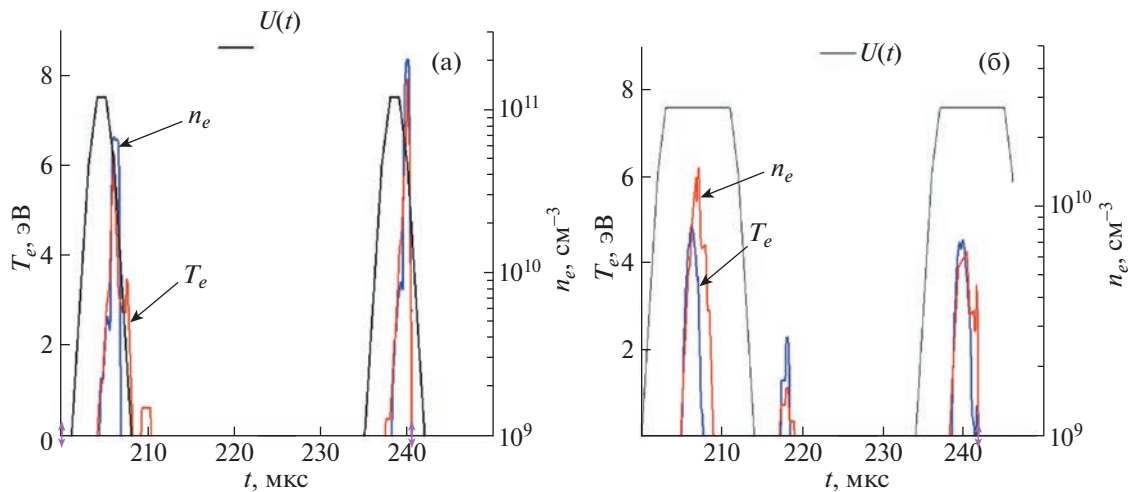


Рис. 7. Концентрации и температура электронов в поверхности для двух периодов импульсного напряжения с $\tau_U = 7$ мкс (а) и $\tau_U = 14$ мкс (б), 4.2 кВ, 30 кГц.

валось на основе анализа токов, интенсивности спектров ХПС и температурных полей у поверхности контакта. Показано, что диэлектрическая пластина является приемлемой моделью для проведения экспериментов по оптимизации ХПС без участия животных. С использованием численного моделирования показано, что ток проводимости у диэлектрической заряженной поверхности больше тока смещения по величине возрастает с уменьшением длительности импульса от 7 до 14 мкс, что согласуется с экспериментальными

данными. Рассчитанные концентрация и энергия электронов в случае с $\tau_U = 7$ мкс больше, чем при $\tau_U = 14$ мкс, что объясняет более высокую эффективность воздействия ХПС с короткими импульсами напряжения.

Необходимо отметить, что полученные выводы о тенденциях для оптимизации режимов работы плазменных источников генерирующих ХПС являются общими и не зависят от геометрических характеристик конкретного устройства. Основным преимуществом импульсного режима по от-

ношению к синусоидальному, является возможность регулирования длительности импульса для максимального тока на обрабатываемой поверхности при меньшем нагреве и для генерации более высоких электрических полей на поверхности, так как импульсное напряжение позволяет работать с большими напряжениями.

Показано, что импульсный режим с более короткими импульсами напряжения обеспечивает более интенсивное взаимодействие ХПС с диэлектрической поверхностью и кожей мышей, при меньшем термическом эффекте, по сравнению с синусоидальным режимом. С увеличением длительности импульса, ток в головке стримера, достигающего поверхности и интенсивность спектров излучения, уменьшаются. Максимальные значения тока, концентрации и температуры электронов в зоне контакта струи с поверхностью также существенно меньше для напряжения с импульсами длительностью 14 мкс, по сравнению с импульсами длительностью 7 мкс.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Российскому научному фонду, грант № 22-49-08003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Živani M., Espona-Noguera A., Lin A., Canal C. // *Adv. Sci.* 2023. V. 10 (8). P. 2205803. <https://doi.org/10.1002/advs.202205803>
2. Keidar M., Shashurin A., Volotskova O., Stepp M., Srinivasan P., Sandler A., Trink B. // *Phys. Plasmas* 2013. V. 20 (5). P. 057101. <https://doi.org/10.1063/1.4801516>
3. Fridman G., Fridman G., Gutsol A., Shekhter A., Vasilits V., Fridman A. // *Plasma Process. Polym.* 2008. V. 5. P. 503–533. <https://doi.org/10.1002/ppap.200700154>
4. Huang J., Li H., Chen W., Lv G., Wang X., Zhang G., Ostrikov K., Wang P., Yang S. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 253701. <https://doi.org/10.1063/1.3666819>
5. Keidar M., Walk R., Shashurin A., Srinivasan P., Sandler A., Dasgupta S., Ravi R., Guerrero-Preston R., Trink B. // *Brit. J. Cancer*. 2011. V. 105. P. 1295. <https://doi.org/10.1038/bjc.2011.386>
6. Graves D. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45 (26). P. 263001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/26/263001>
7. Lya L., Chenga X., Murthya S., Zhuang T., Jones O., Basadonna G., Keidar M., Canady J. // *Clinical Plasma Medicine*, 2023, in press.
8. <https://www.shebaonline.org/canady-helios-cold-plasma-scalpel-for-breast-cancer-treatment> (Применение Canady Helios™ Cold Plasma).
9. Bekeschus S., Schmidt A., Weltmann K., von Woedtke T. // *Clinical Plasma Medicine*, 2016. V. 4 (1). P. 19. <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2016.01.001>
10. Kim S., Chung T. // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 20332. <https://doi.org/10.1038/srep20332>
11. Yan D., Xu W., Yao X., Lin L., Sherman J., Keidar M. // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 15418. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33914-w>
12. Schweigert I.V., Zakrevsky D.E., Gugin P.P., Milakhina E.V., Biryukov M.M., Keidar M., Koval O.A. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2022. V. 31. P. 114004. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aca120>
13. Швейгерт И.В., Закревский Д.Э., Милахина Е.В., Гугин П.П., Бирюков М.М., Патракова Е.А., Троицкая О.С., Коваль О.А. // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. № 5. С. 447. <https://doi.org/10.31857/S0367292122601400>
14. Akishev Yu.S., Karalnik V.B., Medvedev M.A., Petryakov A.V., Trushkin N.I., Shafikov A.G. // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. V. 927. P. 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/927/1/012040>
15. Schweigert I.V., Alexandrov A.L., Zakrevsky D.E. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. P. 12LT02. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abc93f>
16. Schweigert I., Zakrevsky Dm., Gugin P., Yelak E., Golubitskaya E., Troitskaya O., Koval O. // *Applied Sciences*, 2019. V. 9. P. 4528. Schweigert I., Zakrevsky D., Milakhina E., Gugin P., Biryukov M., Patrakova E., Koval O. // *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2022. V. 64. P. 044015. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac53f1> <https://doi.org/10.3390/app9214528>
17. Зарубин И.А., Лабузов В.А., Бабин С.А. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 1 (II). С. 117. <https://doi.org/>
18. Schweigert I., Vagapov S., Lin L., Keidar M. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019. V. 52 (29). P. 295201. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1319>
19. Боровикова А.С., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Милахина Е.В., Швейгерт И.В. // *Письма в ЖТФ*, 2022. Т. 48. № 19. С. 8. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.19.53587.19308>
20. Babaeva N.Y. and Naidis G.V. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2018. V. 27. P. 075018. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aad0d9>