

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НЕТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ СРЕДЫ

© 2023 г. В. А. Вдовин^а, *, Р. А. Денисов^а, С. А. Сапецкий^а, В. А. Черепенин^а

^а *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

**E-mail: vdv@cplire.ru*

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 23.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Рассмотрены особенности технологии экспериментов по нетепловому воздействию мощных наносекундных импульсов на примере установки, используемой для модификации биологических сред и других объектов, обладающих разнородными электрофизическими характеристиками. Создана экспериментальная установка для исследования нетеплового воздействия мощных импульсов на образцы различных материалов, которая формирует импульсы с частотой повторения до 500 Гц, амплитудой до 60 кВ и длительностью 5 нс. Проведено моделирование переходных процессов в эквивалентной электрической схеме нагрузки, а в качестве нагрузки был использован биологический материал, помещенный в микропланшет.

DOI: 10.31857/S0033849423090267, EDN: SILADT

ВВЕДЕНИЕ

Нетепловое воздействие электромагнитного излучения на различные среды исследуется уже сравнительно давно. Достаточно отметить работы по облучению маломощными миллиметровыми волнами точек акупунктуры на теле человека [1]. Исследования же по нетепловому воздействию мощных электромагнитных импульсов начались сравнительно недавно, в основном в результате развития релятивистской сильноточной электроники [2] и связанных с ней технологий быстрых сильноточных коммутаторов тока, взрывной эмиссии и сильноточных ускорителей [3, 4]. Приведем, например, работы [5–8], где делались попытки использовать высокие значения напряженностей электрического поля в микроволновых импульсах для воздействия на живые организмы с целью, например, разрушения раковых клеток. Отметим, что, несмотря на большую мощность импульса, энергия в нем невелика и не приводит к нагреву среды.

Параллельно развивались исследования, связанные с воздействиями на среды как естественного, так и искусственного происхождения. Примерами исследований первого типа являются работы [9–13].

В работах [9–11] мощные импульсы использовались для вскрытия упорных золотосодержащих руд и лежалых отходов горно-обогачительных

комбинатов. Действие электрического поля с высокой напряженностью в неоднородной смеси металлов, полупроводников и диэлектриков приводит к целому семейству нелинейных эффектов — пондеромоторным силам, микропробоям вблизи неоднородностей и т.д. Все они в той или иной степени способствуют дезинтеграции частиц золота, при этом происходит значительное увеличение извлечения золота классическим методом цианирования. В работе [12] для дезинтеграции золотосодержащих пород используется гидроудар, образующийся при искровом пробое воды импульсами наносекундной длительности. Опыты проводили в резервуаре с водой, где находилась также взвесь руды, при постоянном перемешивании.

В работе [13] была рассмотрена возможность изменения структуры льна и льносодержащих материалов при воздействии мощными электромагнитными импульсами. Воздействию подвергались образцы соломы и льняная пряжа. Было показано, что при обработке соломы наблюдаются изменения в поперечном срезе, проявляющиеся в разделении волокнистых пучков на комплексы, следствием чего является улучшение декортикационной способности (отделяемости) почти на 30%. При экспериментах с образцами пряжи было зарегистрировано, что импульсные воздействия снижают жесткость пряжи на 25%, при этом раз-

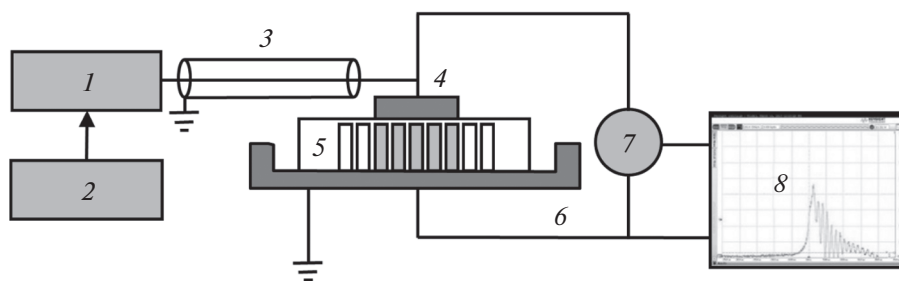


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор импульсов; 2 – генератор, управляющий запуском; 3 – высоковольтный коаксиальный кабель; 4 – высоковольтный электрод (диск); 5 – микропланшет с образцом; 6 – нижний (“земля”) электрод; 7 – ВЧ-шуп – делитель напряжения; 8 – цифровой осциллограф.

рывная нагрузка не только не уменьшается, но даже несколько увеличивается.

В качестве примера воздействия на искусственные среды можно назвать исследования стойкости полупроводниковой элементной базы электроники к мощным электромагнитным импульсам излучения [14–17]. Стойкость интегральных микросхем под действием импульсного радиоизлучения в свободном пространстве рассматривалась в работе [14]. В работе [15] исследовались сбои в работе микроконтроллеров в зависимости от амплитуды напряженности электрического поля. Показано, что с изменением степени интеграции микросхем пороговый уровень воздействия может сильно различаться. При исследовании современных микроконтроллеров установлено, что по сравнению с блоком данных более уязвимы блоки reset, тактовой частоты и электропитания [16]. При исследовании интегральных микросхем микроконтроллеров было установлено, что воздействия импульсов с напряжением, близким к пробойному, регулярно вызывают сбои при выполнении логических операций. Частота сбоев зависит не только от импульсного напряжения, но и от сложности логической операции, выполняемой при воздействии [17].

Примером работ по воздействию на искусственные среды также можно назвать исследования, связанные с биоподобными средами. В работах [18–20] изучалось взаимодействие синтезированных нанокompозитных липосом с ультракороткими импульсами. Показано, что воздействие импульсами наносекундной длительности приводит к декапсуляции, что может быть использовано для дистанционной доставки лекарств.

Цель данной работы – продемонстрировать особенности технологии экспериментов по нетепловому воздействию мощных наносекундных импульсов на примере установки, используемой для модификации биологических сред и других объектов, обладающих разнородными электрофизическими характеристиками.

1. СХЕМА УСТАНОВКИ

Установка по нетепловому воздействию электромагнитными импульсами обычно включает генератор импульсов, систему диагностики и нагрузку, оптимизированную под различные исследуемые среды. Схема одного варианта экспериментальной установки, разработанной в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, показана на рис. 1. В качестве нагрузки здесь используется система двух электродов с помещенным между ними образцом. В установке используется высоковольтный генератор наносекундных импульсов 1 (компания FID Technology), с выхода которого по высоковольтному коаксиальному кабелю 3 импульсы поступают на электроды: верхний электрод 4 в форме диска диаметром 50 мм и нижний электрод 6 в форме чашки. Между электродами, которые образуют плоский конденсатор, расположен исследуемый образец 5. Для контроля амплитуды и формы поступающих на него импульсов к электродам подключен высокочастотный высоковольтный шуп-делитель напряжения 7 Актаком АСА-6039, с выхода которого уменьшенные по напряжению в 1000 раз импульсы поступают на вход цифрового осциллографа 8 Infinium MSO9404.

При поступлении на вход генератора внешней синхронизации низковольтного импульса запуска от внешнего источника 2, в качестве которого используется генератор RIGOL DG4102, высоковольтный генератор формирует на выходе импульс амплитудой 30 кВ и длительностью 5 нс. Так как волновое сопротивление кабеля значительно меньше импеданса нагрузки в виде рассматриваемого ниже образца, то вследствие отсутствия согласования амплитуда импульса удваивается и достигает 60 кВ. Пуск и остановка импульсов запуска (обычно от 0.5 до 100 Гц) производятся вручную по секундомеру, таким образом контролируется общее количество высоковольтных импульсов, воздействующих на образец. Также возможна работа генератора, управляющего запуском в режиме одиночных импульсов, который

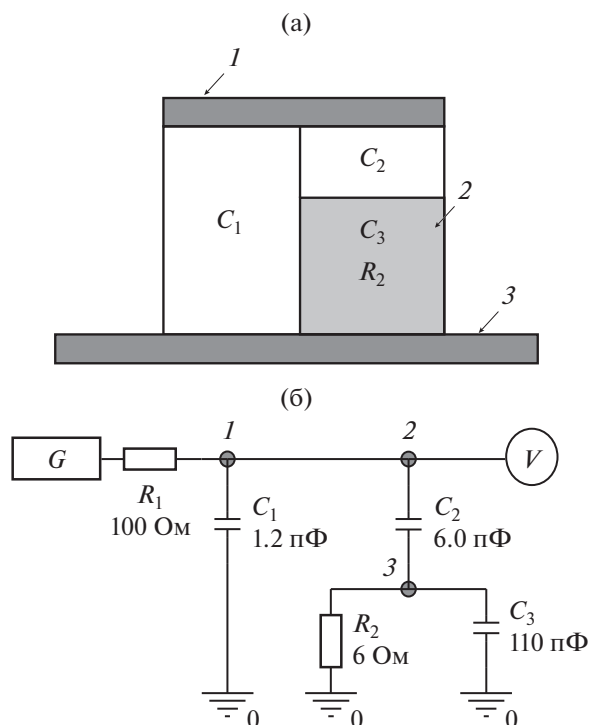


Рис. 2. Эквивалентная схема микропланшета с образцом (а) и принципиальная электрическая схема (б): 1 – верхний электрод (диск); 2 – микропланшет с образцом; 3 – нижний электрод; C_1 – суммарная емкость зазоров между лунками; C_2 – суммарная емкость зазоров снизу и сверху от лунок; C_3 – суммарная емкость лунок с биологическим материалом; R_1 – волновое сопротивление коаксиального кабеля; R_2 – суммарное электрическое сопротивление лунок с биологическим материалом.

используется при настройке выходного напряжения и для снятия осциллограмм.

В качестве одного из возможных вариантов исследуемого образца 5 используется биологический материал, для загрузки которого предназначен микропланшет. Он представляет собой пластиковую коробку высотой 16.5 мм, внутри с шагом 9 мм расположены 96 цилиндрических лунок высотой 10.5 мм и диаметром 6.5 мм. Матрица из 5×5 лунок в центре микропланшета заполняется биологическим материалом и помещается в чашку-электрод так, чтобы верхний электрод полностью закрывал эту матрицу.

Лунки занимают некоторый объем микропланшета: существуют воздушно-пластиковые зазоры сверху, снизу и в промежутках между лунками. Они существенно ослабляют степень воздействия на образец высоковольтных импульсов, подаваемых на электроды. Чтобы оценить реальное значение потенциала непосредственно на биологическом материале, микропланшет можно представить в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 2). Здесь образец, обладающий емко-

стью C_3 и проводимостью R_2 , соединен последовательно с воздушно-пластиковым зазором C_2 , а параллельно этой цепочке подключен конденсатор C_1 , представляющий собой суммарную емкость вертикальных промежутков между лунками. Импульсное напряжение подается с генератора G через волновое сопротивление кабеля R_1 . Напряжение на микропланшете (цепочка элементов C_1 , C_2 , C_3 , R_2) контролируется высоковольтным щупом-вольтметром V .

Численные значения элементов эквивалентной схемы можно оценить следующим образом. Волновое сопротивление кабеля R_1 известно и равно 100 Ом; суммарная емкость зазоров C_1 между лунками – исходя из геометрических размеров, а именно соотношения суммарных площадей сечения лунок и общей площади сечения микропланшета – составляет часть емкости цилиндрического конденсатора, площадь сечения которого задается верхним электродом, а расстояние между обкладками – толщиной микропланшета, зажатого между электродами:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d},$$

где S – площадь сечения обкладки конденсатора, d – расстояние между обкладками, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Ёмкость такого конденсатора с пустым микропланшетом C_0 была измерена напрямую измерителем Instek LCR-810 и составила 3 пФ. Таким образом, $C_1 = 0.4C_0 = 1.2$ пФ. Суммарную емкость зазоров снизу и сверху от лунок C_2 можно оценить по соотношению величин этих зазоров и толщины микропланшета, поэтому она равна $2C_0 = 6$ пФ. Чтобы определить суммарную емкость C_3 и электрическое сопротивление лунок R_2 с биологическим материалом, была использована кювета в форме параллелепипеда, на торцах которой расположены электроды. Кювета заполнялась исследуемым биологическим материалом в виде раствора. Его удельные емкость и сопротивление были вычислены по измерениям емкости и сопротивления параллелепипеда. Зная внутренние длину, ширину и высоту заполненной части кюветы, а также суммарную площадь сечения лунок под верхним электродом и их высоту, можно вычислить искомую $C_3 = 110$ пФ. Формула для сопротивления среды подобна формуле ее же емкости:

$$R = \frac{1}{\sigma S} \frac{d}{l},$$

где σ – проводимость среды, только зависимость от геометрических параметров обратная. Сопротивление R_2 вычисляется через те же параметры S и d и, таким образом, составляет 6 Ом. Эти значе-

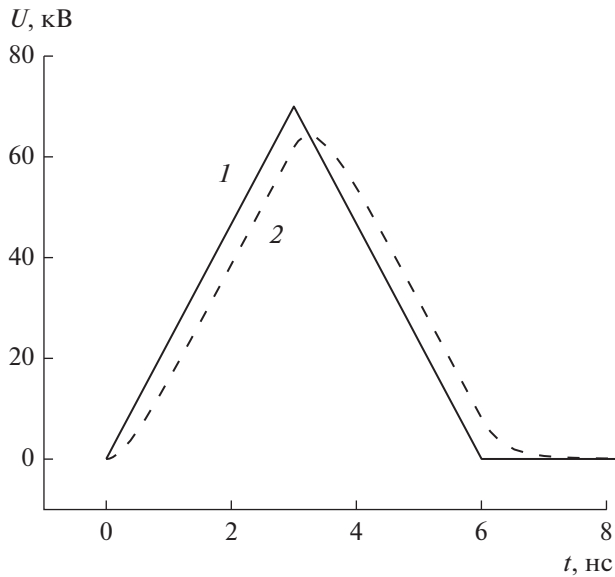


Рис. 3. Зависимость напряжения от времени в точках 1 (1) и 2 (2).

ния использовались в дальнейшем при моделировании.

При выборе параметров моделирования других сред с разными значениями проводимости и диэлектрической проницаемости руководствовались данными, близкими к представленным в работе [21] для различных типов биологических клеток. Из диапазонов параметров диэлектрической проницаемости и проводимости клеток были взяты минимальные, максимальные и некоторые средние значения для выделения общих тенденций изменения моделируемых величин.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Было выполнено моделирование переходных процессов в данной схеме (см. рис. 2б). На вход G схемы (с выхода генератора) подавался треугольный импульс с амплитудой 70 кВ и временем нарастания и спада по 3 нс (рис. 3, кривая 1).

Тогда на резисторе R_2 на эквивалентной схеме он принимает форму, амплитуду и длительность, близкие к характеристикам импульса, наблюдаемого на осциллограмме, снятой с помощью высоковольтного щупа-делителя напряжения (см. рис. 3, кривая 2).

Моделирование показало, что на лунках с биологическим материалом амплитуда напряжения почти на два порядка меньше, чем на выходе высоковольтного генератора: 0.5 кВ при $\sigma = 1.31$ См/м или 1.5 кВ при $\sigma = 0.25$ См/м, а форма импульса сильно искажается, он становится биполярным, так как напряжение поступает через малую емкость C_2 (рис. 4а).

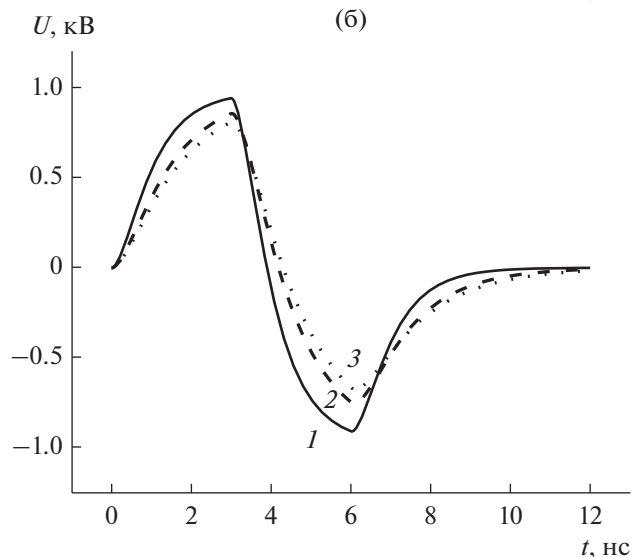
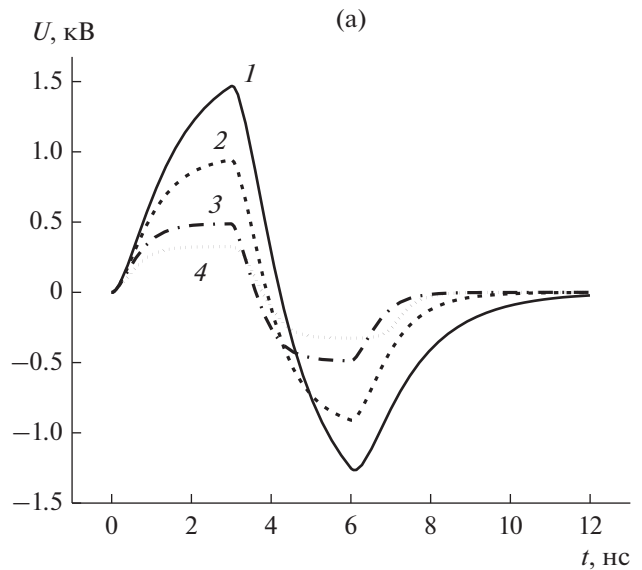


Рис. 4. Зависимость напряжения в точке 3 от времени при фиксированном значении диэлектрической проницаемости $\epsilon = 36.3$ ($C_3 \sim 60$ пФ) и разных значениях проводимости (а): $\sigma = 0.25$ См/м, $R_2 \sim 21$ Ом (кривая 1), $\sigma = 0.446$ См/м, $R_2 \sim 12$ Ом (кривая 2), $\sigma = 0.85$ См/м, $R_2 \sim 6$ Ом (кривая 3), $\sigma = 1.31$ См/м, $R_2 \sim 4$ Ом (кривая 4); а также при фиксированном значении проводимости $\sigma = 0.446$ См/м ($R_2 \sim 12$ Ом) и разных значениях диэлектрической проницаемости (б): $\epsilon = 36.3$, $C_3 \sim 60$ пФ (кривая 1), $\epsilon = 60$, $C_3 \sim 100$ пФ (кривая 2), $\epsilon = 70$, $C_3 \sim 120$ пФ (кривая 3).

За время с 3 до 6 нс, когда напряжение на выходе генератора спадает до 0, амплитуда напряжения в точке 3 меняет знак, что объясняется поступлением на него напряжения с заряженного почти до 60 кВ конденсатора C_2 , который оказывается подключенным с обратной полярностью.

Форма импульса и амплитуда напряжения мало меняются при изменении ϵ от 36.3 ($C_3 = 60$ пФ) до $\epsilon = 70$ ($C_3 = 120$ пФ) (рис. 4б).

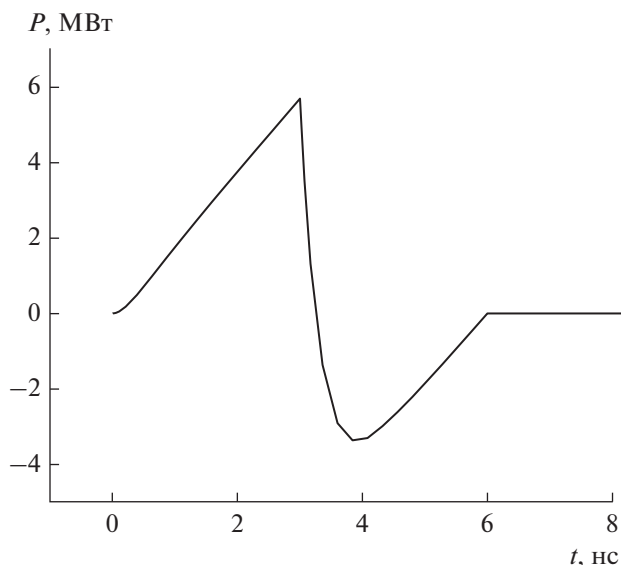


Рис. 5. Зависимость поступающей в схему мощности от времени.

Таким образом, для частного вида емкости с исследуемым образцом, показано, что монополярный импульс трансформируется в биполярный, и этот факт необходимо учитывать при анализе результатов воздействия.

В схему поступает пиковая мощность около 5.5 МВт (рис. 5), которая представляет собой произведение проходящего по коаксиальному кабелю (через R_1) тока и напряжения на генераторе — в точке 1. На спаде импульса напряжения от генератора (от 3 до 6 нс) образуется отрицательный пик 3.5 МВт, который означает что большая часть энергии уходит обратно в генератор.

Поступающая мощность рассеивается на лунках в виде двух импульсов с пиками лишь 100 кВт при $\sigma = 1.31$ См/м ($R_2 = 4$ Ом) или 25 кВт при $\sigma = 0.25$ См/м ($R_2 = 21$ Ом), а на втором импульсе 75 кВт при $\sigma = 1.31$ См/м ($R_2 = 4$ Ом) или 25 кВт при $\sigma = 0.25$ См/м ($R_2 = 21$ Ом) (рис. 6а). При увеличении диэлектрической проницаемости до $\epsilon = 70$ ($C_3 = 120$ пФ) мощность, рассеиваемая на R_2 , уменьшается (рис. 6б). Первый максимум мощности достигается в точке 3 нс, когда напряжение на выходе генератора также достигает максимума, а второй — в точке 6 нс за счет оставшегося в C_2 заряда.

Проинтегрировав зависимость мощности от времени (см. рис. 5), можно оценить энергию одного импульса: от генератора поступает около 7 мДж (рис. 7), большая часть которой затем возвращается обратно в генератор (кривая спадает почти до 0). Это объясняется несогласованной нагрузкой преимущественно емкостного характера.

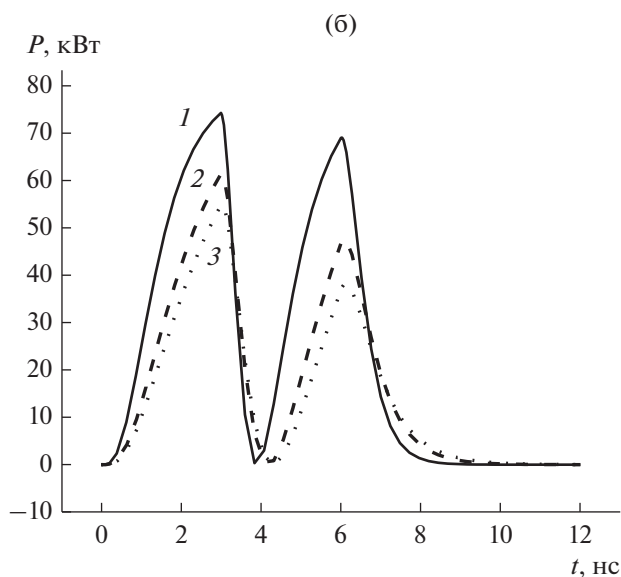
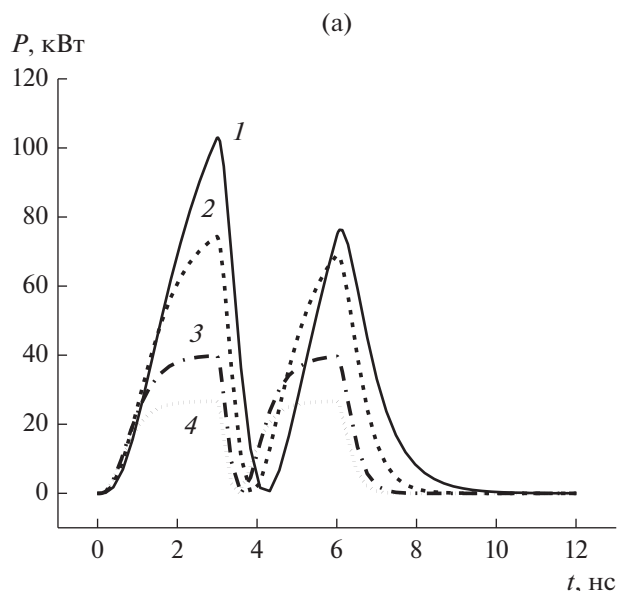


Рис. 6. Зависимость мощности, рассеиваемой на R_2 , от времени при фиксированном значении диэлектрической проницаемости $\epsilon = 36.3$ ($C_3 \sim 60$ пФ) и разных значениях проводимости (а): $\sigma = 0.25$ См/м, $R_2 \sim 21$ Ом (кривая 1), $\sigma = 0.446$ См/м, $R_2 \sim 12$ Ом (кривая 2), $\sigma = 0.85$ См/м, $R_2 \sim 6$ Ом (кривая 3), $\sigma = 1.31$ См/м, $R_2 \sim 4$ Ом (кривая 4); а также при фиксированном значении проводимости $\sigma = 0.446$ См/м ($R_2 \sim 12$ Ом) и разных значениях диэлектрической проницаемости (б): $\epsilon = 36.3$, $C_3 \sim 60$ пФ (кривая 1), $\epsilon = 60$, $C_3 \sim 100$ пФ (кривая 2), $\epsilon = 70$, $C_3 \sim 120$ пФ (кривая 3).

В среде энергия рассеивается в виде тепла: 330 мкДж при $\sigma = 1.31$ См/м ($R_2 = 4$ Ом) или 125 мкДж при $\sigma = 0.25$ См/м ($R_2 = 21$ Ом) (рис. 8а). Из рисунков видно, что энергия накапливается во время прохождения первого и второго импульса, а затем не меняется. При разных значениях ϵ ,

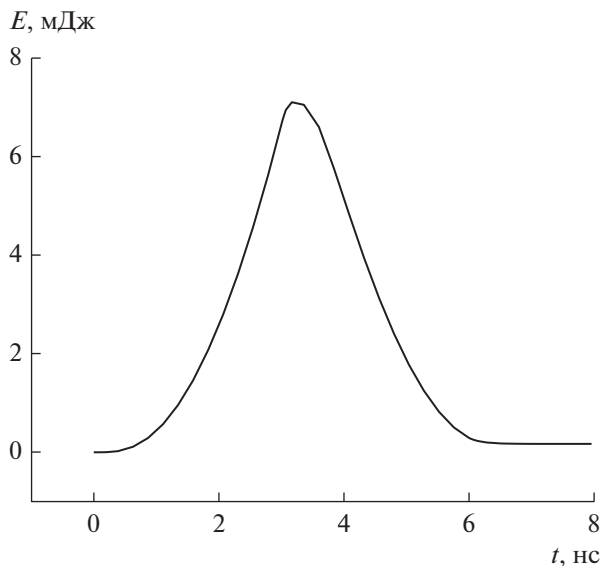


Рис. 7. Зависимость энергии одного импульса, поступающего от генератора, от времени.

от 36.3 до 70, получаются примерно такие же результаты (рис. 8б).

При максимально возможной для данного прибора частоте повторения импульсов 500 Гц средняя за 1 с мощность, поступающая от генератора, составляет менее 3.6 Вт, а менее 160 мВт рассеивается в среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены особенности построения экспериментальной установки для исследования нетеплового воздействия мощных электромагнитных импульсов на биологические среды, которая формирует импульсы с частотой повторения до 500 Гц, амплитудой до 60 кВ и длительностью 5 нс. Для оценки напряженности поля воздействия создана принципиальная электрическая схема нагрузки в виде микропланшета, заполненного биологическим материалом, при этом использовались в том числе и измеренные экспериментально электрические характеристики материала и установки.

Было выполнено моделирование переходных процессов в данной схеме, которое показало, что на лунках с биологическим материалом амплитуда напряжения почти на два порядка меньше, чем на выходе высоковольтного генератора, а форма импульса сильно искажается — он становится биполярным. Это объясняется наличием воздушных зазоров в микропланшете и большой диэлектрической проницаемостью и электрической проводимостью биологического материала.

Мгновенная тепловая мощность, рассеиваемая на рассматриваемых в статье образцах, может

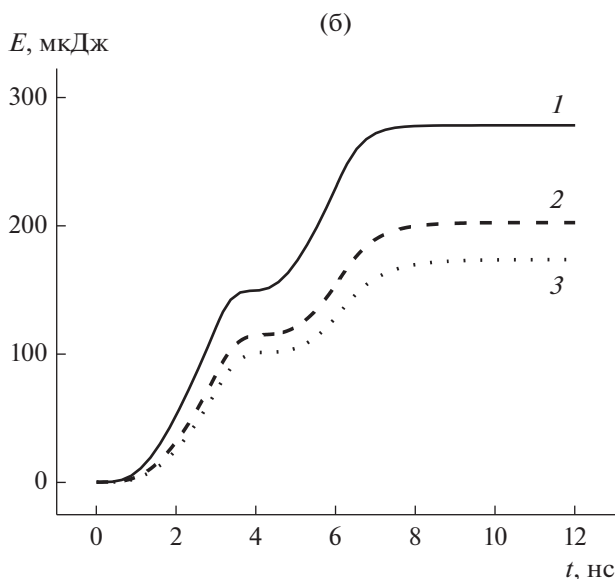
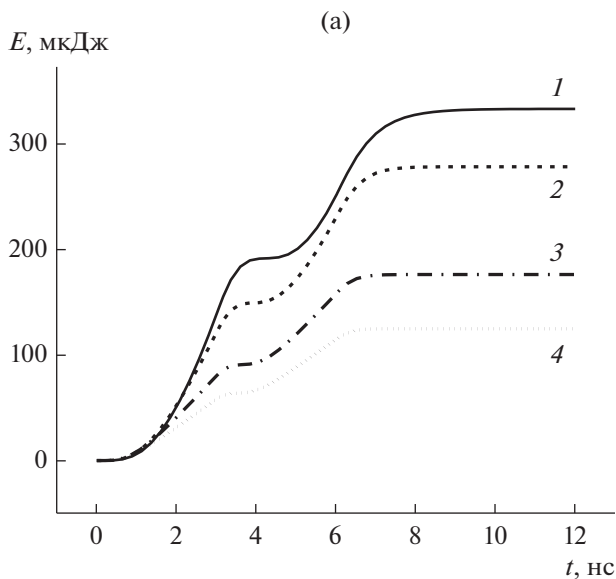


Рис. 8. Зависимость энергии, рассеиваемой на R_2 , от времени при фиксированном значении диэлектрической проницаемости $\epsilon = 36.3$ ($C_3 \sim 60$ пФ) и разных значениях проводимости (а): $\sigma = 0.25$ См/м, $R_2 \sim 21$ Ом (кривая 1), $\sigma = 0.446$ См/м, $R_2 \sim 12$ Ом (кривая 2), $\sigma = 0.85$ См/м, $R_2 \sim 6$ Ом (кривая 3), $\sigma = 1.31$ См/м, $R_2 \sim 4$ Ом (кривая 4); а также при фиксированном значении проводимости $\sigma = 0.446$ См/м ($R_2 \sim 12$ Ом) и разных значениях диэлектрической проницаемости (б): $\epsilon = 36.3$, $C_3 \sim 60$ пФ (кривая 1), $\epsilon = 60$, $C_3 \sim 100$ пФ (кривая 2), $\epsilon = 70$, $C_3 \sim 120$ пФ (кривая 3).

достигать нескольких десятков киловатт, но благодаря малой длительности воздействующих импульсов и, следовательно, их небольшой энергии, средняя тепловая мощность составляет десятые доли ватта даже на максимальной частоте следования импульсов. Таким образом, тепловое воздействие импульсов на среду пренебрежимо мало

и не оказывает заметного влияния на температуру исследуемых образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00125).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения низкой интенсивности / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: ИРЭ АН СССР, 1987.
2. Applications of High-Power Microwaves. / Ed. A.V. Garopov-Grekhov, V.L. Granatstein. L.: Artech House, 1994.
3. *Месяц Г.А.* Эктоны. Екатеринбург: Наука, 1993. Ч. 3.
4. *Месяц Г.А., Яландин М.И.* // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175. № 3. С. 225.
5. *Девятков Н.Д., Чернов З.С., Бецкий О.В. и др.* // Биофизика. 1982. Т. 28. № 3. С. 558.
6. *Девятков Н.Д., Плетнев С.Д., Чернов З.С. и др.* // Докл. РАН. 1994. Т. 336. № 6. С. 826.
7. *Девятков Н.Д., Плетнев С.Д., Бецкий О.В. и др.* // Биомедицинская радиоэлектроника. 2000. № 10. С. 29.
8. *Большаков М.А., Бугаев С.П., Гончарик А.О. и др.* // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 5. С. 691.
9. *Чантурия В.А., Гуляев Ю.В., Лунин В.Д. и др.* // Докл. РАН. 1999. № 5. С. 680.
10. *Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. и др.* // Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. № 4. С. 95.
11. *Вдовин В.А., Гуляев Ю.В., Чантурия В.А., Черепенин В.А.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 9. С. 1129.
12. *Котов Ю.А., Месяц Г.А., Филатов А.Л. и др.* // Докл. РАН. 2000. Т. 372. № 5. С. 654.
13. *Вдовин В.А., Осипов Б.П., Черепенин В.А.* // Тр. X Всерос. школы-семинара “Физика и применение микроволн”. Звенигород Моск. обл., 2005. Секция 6. С. 11.
14. *Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 3. С. 375.
15. *Грибский М.П., Григорьев Е.В., Старостенко В.В. и др.* // Прикладная радиоэлектроника. 2006. Т. 5. № 2. С. 294.
16. *Hong J.I., Hwang S.M., Nuh C.S.* // J. Electromagn. Waves Appl. 2008. V. 22. P. 2451.
17. *Вдовин В.А., Гераськин А.А., Горбоконенко П.А. и др.* // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.13>
18. *Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Вдовин В.А. и др.* // РЭ. 2015. Т. 60. № 10. С. 1051.
19. *Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Вдовин В.А. и др.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 2. С. 189.
20. *Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Таранов И.В. и др.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 1. С. 61.
21. *Costa J.A., de Oliveira P.X., Pereira L.S. et al.* // IEEE Trans. 2021. V. DEI-28. № 6. С. 1850.