

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 533.9.07

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ПЛАЗМА-СТИМУЛИРОВАННОЙ
МОДИФИКАЦИИ БИОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

©2026 г. В. В. Андреев^а, А. В. Артемьев^а, И. А. Барыков^{а*}, Е. И. Грудиев^а,
С. А. Двинин^{а,б}, А. В. Калашников^а, Л. В. Коновальцева^а,
А. С. Критченков^а, Д. В. Чупров^а.

^а *Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

^б *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1*

**e-mail: barykov@list.ru*

Поступила в редакцию 17.09.2025 г.

После доработки 26.02.2026 г.

Принята к публикации 20.03.2026 г.

Представлено описание экспериментальной установки, позволяющей генерировать высокочастотный и сверхвысокочастотный разряды для создания плазменных потоков в широком диапазоне рабочих параметров. Описаны эксперименты по генерации ВЧ- и СВЧ-разрядов. Проведено численное моделирование пространственного распределения электромагнитных полей, обеспечивающих поддержание разряда для условий, соответствующих реальным параметрам существующей конструкции и схемы установки. Расчеты коэффициентов поглощения волн рабочих частот позволили определить области локализации зон поглощения разрядов и оценить эффективность вводимой в разряд мощности при заданных способах возбуждения разрядов. Экспериментально получены параметры плазмы (электронная температура и концентрация), приводятся их зависимости от начальных значений давления и мощности вводимого в разряд излучения. В области размещения биополимерных образцов определены параметры ионной компоненты плазменного потока. Приводятся результаты пилотных исследований влияния плазмы на физико-химические свойства биополимерных образцов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широкое применение находят газовые разряды низкого давления как источники плазменных потоков для модификации свойств биоорганических материалов. Природные полимеры и материалы на их основе в настоящее время интенсивно исследуются из-за возможности применения в биомедицине [1]. Большой интерес к ним вызван в первую очередь выраженной биосовместимостью, биodeградируемостью и отсутствием токсичности благодаря сходству с внутриклеточными биомолекулами и компонентами внеклеточного

матрикса. Многие работы в этой области были ориентированы на изучение объемных свойств материалов на основе природных полимеров [2]. В работах [3, 4] было показано, что биологическая реакция на материалы в значительной степени регулируется их поверхностными свойствами, включая химию и топографию поверхности. Наибольшая часть работ по изменению свойств поверхности материалов связана с ее химической обработкой, которая предполагает использование достаточно агрессивных и токсичных реагентов [5].

Ранее было продемонстрировано, что плазменная обработка биоматериалов при низких давлениях рабочего газа представляет собой альтернативный щадящий и экологически чистый метод модификации их поверхности [6, 7]. Кроме того, воздействие между химически активными частицами в плазме зачастую приводит к улучшению их биосовместимости, биофункциональности и гидрофильности. В настоящее время интенсивно исследуется использование газоразрядной плазмы для достижения упомянутых свойств материалов. Источниками плазмы могут быть разные типы газовых разрядов в различных газах и их смесях. Динамично развивается применение безэлектродных высокочастотных (ВЧ, 13.56 МГц) и микроволновых (СВЧ, 2.45 ГГц) разрядов, отличающихся чистотой плазмы и эффективной генерацией плотной низкотемпературной плазмы с варьируемым составом и параметрами.

На экспериментально-исследовательской базе института физических исследований и технологий РУДН была создана линейная магнитно-плазменная установка RAPIRA (Resonant Accelerated Plasma Installation Research & Application) – гибридный генератор низкотемпературной плазмы ВЧ- и СВЧ- газовых разрядов для обработки плазменными компонентами биополимерных материалов. Отличительная особенность установки – возможность генерации плазмы с помощью геликонного источника ВЧ-разряда или резонансного СВЧ-разряда, как по отдельности, так и совместно, а также возможность использования различных газов (аргон, кислород, водород, азот и другие) и их смесей с варьируемыми парциальными давлениями. Для облегчения генерации плазмы, формирования структуры и направления транспортировки плазменного потока, обеспечивающего обработку органических материалов при низких давлениях, плазма помещается в магнитное поле, создаваемое системой катушек. В работе описываются параметры установки RAPIRA и результаты экспериментов по генерации плазменных потоков, исследованию их параметров и обработке биополимерных пленок. Приведены методика обработки поверхности пленок модельных биополимеров плазменным потоком и описание методов химико-физической диагностики, применяемых для качественной и количественной оценок их модификаций.

Представлены результаты, характеризующие уровень плазменного воздействия и изменения поверхностных и структурных параметров образцов модельных полимеров.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка RAPIRA – исследовательская машина, предназначенная для обработки поверхностей материалов плазменным потоком в широком диапазоне параметров плазмы. Исследовательская установка RAPIRA предназначена для обработки поверхностей материалов плазменным потоком в широком диапазоне параметров плазмы. Фотография установки в режиме генерации ВЧ-разряда в аргоне (вводимая ВЧ-мощность 600 Вт, давление в кварцевой трубе $5 \cdot 10^{-3}$ торр) представлена на рис. 1. На переднем плане фотографии – блок подачи газа с пьезоэлектрическим одноканальным натекателем СНА-1 и измерителями давления. Газовый поток направлен в приемную вакуумную камеру на заднем плане.

Рис. 1. Установка RAPIRA

В состав установки RAPIRA входят системы откачки и газонапуска, создания магнитного поля, а также генерации ВЧ- и СВЧ-разрядов. Параметры установки следующие:

- полная длина установки равна примерно 4 м,
- диаметр канала плазмопровода равен 0.06 м,
- диаметр приемной вакуумной камеры составляет примерно 0.82 м,
- остаточное давление равно примерно $1.6 \cdot 10^{-6}$ торр,
- диапазон рабочих давлений $10^{-4} - 10^{-2}$ торр,
- максимальная напряженность магнитного поля в пробках равна 2800 Гс,
- максимальная мощность ВЧ-генератора (13.56 МГц) составляет 750 Вт,
- максимальная мощность СВЧ-генератора (2.45 ГГц) равна 3000 Вт.

Принципиальная схема расположения основных систем установки представлена на рис. 2. Базовый элемент установки – приемная вакуумная камера 1 объемом около 1 м^3 , оснащенная портами для установки диагностических, вспомогательных систем и элементов. Плазмопровод 2, изготовленный из кварцевой трубы диаметром 0.06 м и длиной 1.5 м, герметично соединен с камерой. В нем генерируется газовый разряд и формируется плазменный поток. Между камерой и плазмопроводом установлен шибер для разъединения вакуумных объемов установки при проведении различных операций.

Рис. 2. Схема установки

Предварительная откачка газа в рабочем объеме до низкого вакуума осуществляется вакуумным агрегатом АД-150/25 в составе соединенных последовательно двухроторного насоса Рутса НВД-600 и пластинчато-роторного насоса 2НВР-90Д. Откачка установки до высокого вакуума осуществляется системой из двух турбомолекулярных насосов MAG Integra W1300 (Германия) и агрегата АД-50/16 (НВД-200 и 2НВР-60Д).

Контроль давления в кварцевом трубопроводе и приемной камере осуществляется манометрическими термодинамическими преобразователями ПМТ-2 (3), инверсно-магнетронным манометрическим преобразователем с холодным катодом АВ3276 (4.1) и инверсно-магнетронным манометрическим преобразователем с холодным катодом ПММ-32-1 (4.2), расположенными в контрольных точках согласно схеме на рис. 2.

Рабочие газы и их смеси подводятся из газового баллона, подключенного к одноканальному пьезонатекателю СНА-1 (5). Натекатель обеспечивает плавно изменяемый газовый поток в кварцевой трубе в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-2} торр при расходе газа не менее $7 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$.

Магнитная система предназначена для обеспечения эффективной генерации плазмы разрядов и транспортировки плазменного потока в область обработки исследуемых материалов и образцов в приемной камере 1. Стационарное осесимметричное магнитное поле вдоль кварцевого трубопровода создается тремя катушками 6.1–6.3 с жидкостным охлаждением. Для независимого питания катушек используются три стабилизированных источника тока ГОРН-К-360В/20А с выходным напряжением до 360 В при силе тока до 20 А, что позволяет в имеющейся конфигурации системы получать значения индукции магнитного поля до 2800 Гс. На рис. 3 представлены типичные рабочие профили аксиального распределения магнитного поля вдоль плазмотрода. Приведенные в данной работе экспериментальные результаты получены для этих распределений индукции магнитного поля, если другое не оговорено дополнительно.

Рис. 3. Зависимость распределения индукции магнитного поля вдоль кварцевой трубы

Катушки 6.1 и 6.2 (рис. 2, 3) создают поле, необходимое для генерации геликонного ВЧ-разряда. Катушки 6.2 и 6.3 создают магнитное поле, обеспечивающее генерацию резонансного СВЧ-разряда. Кроме того, катушка 6.3 создает убывающее в сторону приемной камеры магнитное поле с градиентом около 100 Гс/см. Этот спад обеспечивает направленное ускоренное движение замагниченных электронов за счет диамагнитной силы

$$F = -e_z(\mu_e \nabla |B|) = -e_z \frac{E_{\perp e}}{B_z(z)} \frac{dB_z}{dz},$$

где μ_e – магнитный момент электрона, $E_{\perp e}$ – кинетическая энергия электрона, соответствующая его поперечному движению относительно силовой линии магнитного поля,

e_z – единичный вектор, направленный вдоль вектора магнитной индукции $B(z)$. Ионы увлекаются пространственным зарядом электронов в том же направлении.

В генераторах плазмы, включенных в состав стенда, применены источники с резонансными методами ее создания и поддержания с внешними источниками электромагнитного излучения ВЧ- и СВЧ-диапазонов. Изменяемые индукция и профиль магнитного поля предусмотрены в ВЧ- и СВЧ-генераторах плазмы для поддержания режимов, обеспечивающих высокие значения плотности в широком диапазоне значений давления применяемого плазмообразующего газа или смеси, а также осуществления динамического управления параметрами формируемого плазменного потока.

Индукционный ВЧ-разряд в магнитном поле с высокой плотностью плазмы (не более 10^{13} см^{-3}) при рабочих давлениях около 10^{-3} торр на сегодняшний день является один из наиболее перспективных и востребованных в современных плазменных технологиях [8–11]. Система генерации высокочастотного (ВЧ) геликонного разряда в составе стенда предназначена для возбуждения и поддержания разряда в диапазоне давлений от 10^{-3} до 10^{-2} торр. В установке используется разряд, в котором азимутальный ток в антенне возбуждает геликонную волну в замагниченной плазме. Источник высокочастотного излучения – генератор Epi OEM-6 (MKS Instruments, США) – работает на частоте 13.56 МГц с изменяемой выходной мощностью от 100 до 750 Вт и возможностью измерения мощностей падающей и отраженной волн с точностью 20 Вт. К выходу генератора через согласующее устройство подключена геликонная полуволновая (Н–Н) антенна 7 (рис. 2). Для эффективного ввода ВЧ-мощности в плазменную нагрузку была использована стандартная схема Г-образного емкостного согласователя, обеспечивающая расширенный диапазон подстройки параметров [12].

Источники на основе ЭЦР в настоящее время наиболее востребованы в широком спектре фундаментальных (например, источники многозарядных ионов различного применения [13]) и прикладных исследований, включая материаловедение. Для наиболее широко распространенного частотного диапазона (2.45 ГГц) [14–16] достигаемая плотность электронов генерируемой плазмы ограничена критической плотностью, значение которой составляет $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Этот верхний предел обусловлен тем, что электромагнитная волна в области плазменного объема проникает только на глубину скин-слоя. Эти ограничения могут быть сняты в режиме генерации поверхностных волн, что обеспечивает генерацию плазмы сверхкритической плотности [14].

Генерация резонансного СВЧ-разряда осуществляется в диапазоне давлений от 10^{-4} до 10^{-3} торр с помощью магнетронного генератора MH010KS-215BZ (Muegge, Германия),

работающего на частоте 2.45 ГГц, с изменяемой выходной мощностью от 1000 до 3000 Вт. Магнетрон интегрирован в единый корпус с ферритовым циркулятором и жидкостной согласованной нагрузкой, предусмотрено также измерение мощности падающей и отраженной электромагнитных волн с точностью 1%. По системе прямоугольных волноводов и коаксиально-волноводных переходов (КВП) излучение от генератора поступает в кольцевой волновод сечением $43 \times 87 \text{ мм}^2$, широкая стенка которого охватывает цилиндрический резонатор и является частью его боковой стенки δ (рис. 2). В кольцевом волноводе диаметрально противоположно запитываемому КВП установлена жидкостная согласованная нагрузка, чем обеспечивается режим двух синфазных бегущих от КВП волн. Резонатор, настроенный на моду H_{111} , путем изменения его высоты возбуждается посредством двух штыревых антенн, связанных с кольцевым волноводом и разнесенных в резонаторе по азимуту на 90° . Изменение взаимного расположения КВП и антенн позволяет управлять поляризацией колебаний в резонаторе. Кварцевая труба (плазмотрод) пронизывает резонатор осесимметрично через отверстия в его торцевых стенках. Для предотвращения потерь СВЧ-излучения через эти отверстия два цилиндрических запердельных волновода посредством резьбового соединения примыкают к торцевым стенкам резонатора.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ

Задача эффективного введения мощности генераторов электромагнитного излучения в плазму является критической для широкого спектра технологических устройств, использующих газовый разряд микроволнового и радиочастотного диапазонов.

Основной целью проведенных модельных расчетов являлся поиск условий, обеспечивающих наилучшее согласование и наиболее полную передачу энергии электромагнитного излучения используемых источников ВЧ- и СВЧ-диапазонов в плазму и, как следствие, расширение технологических возможностей стенда. Расчеты проведены для условий, соответствующих реальным параметрам существующей конструкции систем и схемы установки. Такой подход позволяет с высокой точностью определять области возникновения разрядов при высокой входной мощности и пониженном давлении.

Программный пакет Comsol Multiphysics [17] использовался для получения распределения электрического поля вдоль всех систем стенда. Для СВЧ-разряда область расчета включала плазмотрод в виде кварцевой трубы, запердельные волноводы, резонатор. Поле в резонаторе создавалось с помощью емкостных стержней связи, энергия к которым подводилась коаксиальными линиями передачи. Амплитуда волны, подводимой к резонатору по коаксиальному волноводу, считалась заданной. Для электрического поля на металлических

границах ставились условия идеального проводника. В области, где плазмопровод выходит за края запердельных волноводов, необходимо включить в расчет также некоторую область окружающего пространства. На границе этого пространства необходимо поставить граничные условия, обеспечивающие отсутствие отражения СВЧ-волны. В силу ограниченности возможностей математических алгоритмов такое условие выполнялось приближенно, что, однако, мало влияло на результаты расчетов вследствие малости энергии, проникающей через запердельные волноводы. При расчетах использовались два вида геометрии внешней области в виде цилиндра радиусом 30 см с длиной больше длины плазмопровода, или в виде полусферы.

Для ВЧ-разряда область расчета включала плазмопровод, окруженный металлическим цилиндром радиусом от 10 до 30 см. Поле в плазме возбуждалось с помощью антенны специальной формы [18], находившейся внутри расчетной области. В расчетах антенна возбуждалась с помощью двух коаксиальных линий передачи, к концам которых подводилось внешнее напряжение. Поскольку поле геликона сосредоточено внутри плазмы (что подтвердили проведенные расчеты), размер внешней области и граничные условия несущественны, поэтому для упрощения задачи на внешней границе ставились граничные условия идеального проводника.

При расчетах использовалось приближение холодной плазмы, для которого Comsol позволяет проводить вычисления для произвольных пространственных распределений плотности электронов и конфигураций постоянного магнитного поля. В рамках предварительных расчетов пространственные распределения плотности электронов и постоянного магнитного поля в поперечном сечении считались однородными.

Кроме расчета пространственных распределений электромагнитного поля рассчитывался коэффициент поглощения волны в плазме, и таким образом была получена оценка эффективности вложения мощности. Отдельные компоненты пакета Comsol Multiphysics позволяют рассчитывать параметры разряда с учетом сложного химического состава и протекающих химических реакций в дрейфово-диффузионном приближении, что является предметом дальнейших исследований.

Величина вводимой в разряд ВЧ/СВЧ-мощности, магнитное поле и давление рабочего газа значительным образом влияют на состав, плотность и температуру компонент генерируемой плазмы. При их изменении изменяется и плазменная нагрузка, в этой связи экспериментальные исследования были преимущественно посвящены изучению поведения плотности и температуры электронной компоненты в областях генерации плазмы, а также ионной компоненты в области обработки образцов от указанных рабочих параметров.

Определение и контроль параметров плазмы осуществляются по данным оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС), зондов и многосеточного анализатора. В области генерации газовых разрядов и интенсивных магнитных полей применяются методы ОЭС 12 (рис. 2). В зоне формирования направленного плазменного потока и малых магнитных полей применяется зонд Ленгмюра 11, вводимый в центральную область формируемого плазменного потока. В области размещения обрабатываемых органических пленок исследование параметров плазменного потока осуществлялось многосеточным анализатором 9.

Для спектрометрических измерений использовался спектрограф-монохроматор MS3504i (СОЛАР ТИИ, Беларусь, Япония). Характеристики используемых дифракционных решеток таковы: 2400 штр/мм (300–650 нм), 1800 штр/мм (300–900 нм). Ширина входной щели 20 мкм. Спектральные линии регистрировались цифровой камерой Proscan HS-102H с ПЗС-матрицей Namamatsu и сохранялись на ПК в виде панорамного спектра. Время экспозиции составляло 3 с.

Излучение разряда вводилось в спектрограф через оптоволоконный световод Opttran UV-200 (Германия), вход которого размещался вблизи области излучения плазмы СВЧ- или ВЧ-разряда 12 (рис. 2) на расстоянии 2 см от стенки плазмопровода. Размер входного и выходного окон световода прямоугольного сечения равен $1.86 \times 5.05 \text{ мм}^2$, коэффициент пропускания 99% в спектральном диапазоне 200–2000 нм. Числовая апертура световода 0.22 ± 0.02 . Положение входа световода было фиксированным (рис. 2) и не изменялось в ходе экспериментов.

Калибровка спектральной чувствительности системы проводилась при помощи светоизмерительной лампы СИРШ 6-40 с известной кривой распределения спектральной плотности мощности, измеренной во ВНИИОФИ в диапазоне длин волн 300–800 нм. Для питания лампы использовался специализированный источник PS-40 PU (ВНИИОФИ, РФ) с точностью установки тока/напряжения $\pm 1 \text{ мА}/1 \text{ мВ}$ и дрейфом выходного тока/напряжения $\pm 5 \text{ мА}/2 \text{ мВ}$ за 4 ч работы. Систематическая ошибка измерений интенсивности составила около 6%.

Для измерения концентрации и температуры электронов плазмы ВЧ/СВЧ-разряда использовались методы относительных интенсивностей [19, 20], в основе которых лежат результаты расчета столкновительно-излучательных моделей заселенности атомов Ar I с n_e и T_e в качестве параметров модели. При построении симуляционных спектров аргона в диапазоне 600–900 нм возможен выбор множества значений (n_e , T_e), при которых отношение расчетных интенсивностей излучения определенных пар линий аргона остается неизменным. Для любых отношений интенсивностей линий Ar I могут быть рассчитаны и построены такие

характеристические кривые (n_e, T_e) . При рассмотрении двух пар линий пересечение характеристик (n_e, T_e) дает оценку реальных значений n_e, T_e плазмы. По известным характеристикам (n_e, T_e) , рассчитанным в работе [20] для пар линий 696.6 нм / 750.4 нм и 801.5 нм / 794.8 нм, определялись оценочные значения n_e, T_e .

Для определения зависимости температуры электронов в ВЧ- и СВЧ-разрядах дополнительно исследовалось отношение линий 811.5 нм и 750.4 нм. Заселенность верхнего уровня перехода 811.5 нм чувствительна к холодным электронам с энергиями около 1–3 эВ ввиду двухступенчатого заселения, обусловленного наличием атомов в метастабильном состоянии. При этом влияние температуры электронов на заселение верхнего уровня перехода 750.4 нм с другого метастабильного уровня менее значительно при $T_e < 3$ эВ.

Эти же параметры в области формирования плазменного потока и малых значений индукции магнитных полей измерялись с помощью ленгмюровских зондов. Молибденовый цилиндрический зонд, ориентированный поперек плазменного потока, имел длину 4 мм и диаметр 0.3 мм. На зонд подавалось синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и амплитудой 140 В. Регистрация напряжения и тока в цепи зонда (падение напряжения на нагрузочном сопротивлении 3 кОм) осуществлялась осциллографом TDS2024B (Tektronix, США) с последующим сохранением цифровых данных. Анализ ионной и электронной ветвей вольт-амперной характеристики зонда, а также определение искомых параметров проводились классическим методом [21].

Для анализа параметров ионной компоненты плазменного потока использовался четырехсеточный энергоанализатор. Сетки и коллектор анализатора помещены в корпус из нержавеющей стали, который не дает внешним полям проникать внутрь анализатора, а плазме попадать непосредственно на коллектор, минуя сетки. Для снижения паразитных наводок в цепях анализатора кабельная сборка помещалась в экранирующую трубку из нержавеющей стали. Графитовая входная диафрагма диаметром 8 мм ограничивает сечение плазменного потока, попадающего в анализатор. Сетки анализатора изготовлены из нержавеющей стали. Изоляция сеток между собой и корпусом анализатора выполнена из керамики, расстояние между сетками 2 мм. Первая экранирующая сетка была заземлена и имела квадратные ячейки размером 300 мкм из проволоки диаметром 120 мкм. Ячейки других трех сеток имеют размер 500 мкм при толщине проволоки 90 мкм [22]. Суммарная прозрачность составила около 20%. Ток коллектора анализатора определялся по падению напряжения на нагрузочном резисторе (в зависимости от режимов его номинал составлял 1, 10 или 50 кОм) при помощи цифрового осциллографа. Анализирующее напряжение подавалось на третью сетку. Последующая обработка полученных результатов с применением программного кода в среде LabView

позволила получить энергетический спектр анализируемой плазменной компоненты. Измерения кривых запираания проводились с усреднением по шестнадцати осциллограммам, полное время измерений составляло 0.16 с. Функция, полученная после дифференцирования кривой запираания по потенциалу анализирующей сетки, представляет собой энергетическое распределение ионов плазменного потока, под средней энергией ионов понималась энергия, соответствующая максимуму этого распределения.

Обработка биоорганических пленок в потоке плазмы газового разряда осуществлялась с помощью специально разработанной карусели 10 (рис. 2). Образцы крепились на стеклянных подложках из минерального стекла, расположенных на концах телескопических направляющих. Поворотный механизм позволяет обращать поверхность пленки к плазменному потоку. Одновременно в вакуумной камере может быть размещено до 12 обрабатываемых образцов, при этом карусель позволяет в одном эксперименте облучать поверхность только одной пленки, не подвергая воздействию остальные.

4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕНОК ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

В качестве полимерной матрицы для изготовления пленок в работе был использован высокомолекулярный хитозан (300 кДа) со степенью деацетилирования 90%. Средневязкостная молекулярная масса хитозана определялась вискозиметрически по уравнению Марка–Куна–Хаувинка–Сакурады. Степень деацетилирования устанавливалась по данным элементного (CHN) анализа. Хитозановые пленки были получены методом отлива. Для изготовления одного образца порция порошка хитозана массой 0.50 г растворялась в 1.00-процентной уксусной кислоте объемом 30.00 мл и глицерина массой 0.15 г в течение 24 ч. Формовочный раствор дегазировался, выливался на пластиковую подложку и сушился при комнатной температуре до постоянной массы.

ИК-спектры регистрировались на спектрометре Shimadzu IRSpirit (Япония) с приставкой НПВО в диапазоне $4700\text{--}350\text{ см}^{-1}$ (10 мг образца без какой-либо специальной подготовки).

Механические свойства полученных пленок – относительное удлинение при разрыве ϵ [%] и предел прочности σ [Мпа] – изучались в режиме одноосного растяжения на разрывной машине РЭМ.І-А (Россия) при температуре 20 ± 1 °С. Линейные размеры образцов составляли $5 \times 2\text{ см}^2$ при толщине 0.1 мм, а скорость одноосного растяжения равнялась 50 мм/мин.

Набухание пленок в течение 4 мин изучались гравиметрически в очищенной воде. Образцы размерами $1 \times 1\text{ см}^2$ взвешивались и помещались в очищенную воду при температуре

25 °С. Через 0,5, 1, 2, 4 мин образцы вынимались из воды, промокались фильтровальной бумагой и взвешивались на аналитических весах.

Растворимость пленок исследовалась также гравиметрическим методом. Предварительно взвешенные образцы размерами $1 \times 1 \text{ см}^2$ помещались в очищенную воду. Через 60 мин раствор фильтровался через стеклянный фильтр с использованием вакуумного водоструйного насоса. Полученный раствор помещался во взвешенные виалы и сушился лиофильно. Масса растворенной части пленки рассчитывалась как разница масс исходного образца и лиофилизата.

5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ЭЦР-разряде при малых плотностях плазмы вращающиеся с циклотронной частотой электроны находятся в резонансе с возбуждающим разряд полем, что позволяет ускорять их до высоких энергий [13]. Кроме того, изменение профиля магнитного поля дает возможность преобразовывать вращательную энергию электронов в поступательную, формируя ускоренные потоки плазмы [23]. При более высоких расходах газа циклотронный разряд используется как способ поджига разряда, а плотность плазмы может превышать критическую, и в этом случае с помощью подстроечного поршня, изменяющего высоту резонатора, можно добиться, чтобы резонатор с плазмой обеспечивал высокую долю передачи энергии СВЧ-волны в плазму.

Структура поля сильно зависит от глубины погружения в резонатор штыревых антенн. При небольшой глубине (1 см и менее), если плотность электронов много меньше критической, а антенны удалены от плазмы, то возбуждаемая мода близка к собственной моде резонатора. При высоких плотностях плазма существенно возмущает исходное поле. В силу того, что штыревые антенны имеют малые размеры, могут реализовываться режимы, когда возбуждается стоячая поверхностная волна, периодическая как в осевом, так и в азимутальном направлениях.

При большой глубине погружения антенн, когда расстояние между ними и стенкой плазмопровода менее 5 мм, ток протекает между антеннами и плазмой, а резонансные свойства выражены гораздо слабее, так как возбуждается большое количество нераспространяющихся мод. Из расчета также следует, что в некоторых режимах при наличии плазмы в плазмопроводе электромагнитная волна может распространяться по запердальному волноводу и излучаться в окружающее пространство.

Пример численного расчета приведен на рис. 4. На рисунке показано распределение напряженности электрического поля в резонаторе и в запердальных волноводах при плотности электронов $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и магнитном поле в окрестности резонатора 650 Гс. Распределение поля

во внешнем пространстве, окружающем плазмопровод, не отображено. Отношение эффективной частоты столкновений электронов (феноменологически учитывавшей также бесстолкновительный нагрев электронов) к частоте поля при расчете считалось равным 0.1. Возбуждающие стержни придвинуты близко к границе плазмы. Максимальное значение поля наблюдается в плоскости стержневых возбуждателей. Следует отметить несимметричность распределения поля вдоль оси резонатора, что связано с различными положениями левой и правой стенок резонатора относительно запердельных волноводов (правая стенка может перемещаться, что дает возможность подстройки резонатора).

Рис. 4. Распределение модуля напряженности электрического поля в резонаторе СВЧ-разряда и прилегающей области плазмопровода

В целом расчеты свидетельствуют о достаточно эффективном возбуждении, однако критерии оптимальной работы установки (размер резонатора, длина элементов связи) различны в разных режимах работы установки – требуемой плотности электронов, давления, рода газа и других параметров, зависящих от реализуемых технологий. Поиск оптимальных критериев работы установки – предмет отдельного исследования.

Геликонный разряд (или разряд, поддерживаемый волной Трайвелписа–Гоулда) используется при более высоких давлениях газа (до сотых долей торр), но также позволяет получить плазму с высокой плотностью электронов [23–26]. Для возбуждения электромагнитной волны с азимутальным числом $m=1$ использована биспиральная антенна, описанная в работах [9, 25]. Достоинством этого способа возбуждения можно считать формирование волны, распространяющейся вдоль всего плазмопровода и поддерживающей нагрев электронов на всем его протяжении. Недостатком является большой ток через антенну, что вызывает существенные омические потери, влекущие ее нагрев и малую индуктивность, вследствие встречного включения спиралей. Это приводит к сложностям в согласовании антенны с генератором, что подтверждается численным расчетом.

Пример расчета напряженности электрического поля, возбуждаемого этой антенной при постоянном магнитном поле 650 Гс, плотности электронов 10^{10} см^{-3} и отношении частоты столкновений к частоте поля, равного 0.1, представлен на рис. 5.

Рис. 5. Распределение модуля напряженности электрического поля в области антенны геликонного разряда и прилегающей области плазмопровода

На рис. 5а приведено распределение модуля напряженности электрического поля в плоскости xz (z – направление оси плазмопровода). Вне трубки поле близко к нулю, исключая окрестность проводников антенны. Коаксиальные кабели, подводящие напряжение к антенне, направлены вдоль оси y и расположены за плоскостью рисунка. На рис. 5б показано

распределение поля в плоскости, перпендикулярной оси трубки. В целом распределение электрического поля качественно соответствует геликонной волне. Рисунок 5в представляет распределение поля вблизи антенны.

Следует отметить, что аналитический расчет возбуждения поля в разряде обычно учитывает только ток, протекающий по антенне. В реальной антенне существует также ток смещения между концами проводников антенны, к которым подводится возбуждающее напряжение. Поскольку, в отличие от обычной цилиндрической катушки, эти точки расположены близко друг к другу, в этой области возбуждаются сильные поля, приводящие к локальному вложению энергии и нарушающие однородность плазмы. Эта особенность ставит задачу оптимизации формы антенны в области подвода энергии.

Тем не менее из расчетов следует, что антенна действительно позволяет возбудить электромагнитную волну, распространяющуюся по плазменному каналу и способную поддерживать существование плазмы. Один из дополнительных результатов – это изменение структуры поля вдоль плазменного канала, что может быть как результатом недостаточной точности расчетов на данном этапе, так и следствием одновременного возбуждения нескольких мод с разными амплитудами.

В целом предварительные расчеты и проведенные эксперименты показывают достаточную эффективность функционирования установки во всех заявленных режимах.

Кроме предварительного математического моделирования были проведены экспериментальные исследования свойств плазмы в режимах генерации как ВЧ-, так и СВЧ-разряда. Рабочим газом для генерации разрядов выбран аргон.

СВЧ-разряд инициировался в диапазоне давлений от 10^{-4} до 10^{-3} торр. Мощность генератора СВЧ-излучения менялась от 0.5 до 2.4 кВт, при этом отношение мощности падающей волны к мощности отраженной в волноводе волны составило 4:1. Изменения индукции магнитного поля на осях катушек 6.2 и 6.3 (рис. 2, 3) позволяют определить область резонансных значений, обеспечивающих эффективную передачу энергии падающей волны в плазму. Профиль поля, обеспечивающий данный режим, представлен на рис. 3.

ВЧ-разряд инициировался в диапазоне давлений от 10^{-3} до 10^{-2} торр. Мощность генератора ВЧ-излучения менялась от 0.3 до 0.7 кВт, система согласования позволяет вводить практически всю мощность в плазму разряда. Магнитное поле на оси катушек 6.1. и 6.2 (рис. 2, 3) в области локализации антенны, обеспечивающее режим эффективной генерации разряда, составляло 700 Гс.

Спектральный состав плазмы ВЧ-разряда включает спектральные линии атомов (Ar I, H_{α} , H_{β} , N I, O I) и низкоинтенсивные полосы второй положительной и первой отрицательной

систем азота. В диапазоне 690–850 нм доминируют спектральные линии Ar I (рис. 6а). При фиксированных рабочих режимах эксперимента наблюдается удовлетворительная повторяемость спектров излучения разряда.

В плазме СВЧ-разряда кроме линий атомов (Ar I, H α , H β , N I, O I) наблюдаются линии однозарядных ионов (Ar II, N II), а также низкоинтенсивные полосы второй положительной и первой отрицательной систем азота. В диапазоне 350–520 нм преобладают преимущественно линии Ar II, в диапазоне 690–850 нм доминируют линии Ar I (рис. 6б).

Рис. 6. Качественный спектральный состав плазмы

Помимо линий аргона, в спектре присутствуют компоненты, характерные для остаточных газов – воздуха и H₂O. Полоса гидроксильного радикала (OH) шириной 308–315 нм наблюдается в спектре СВЧ-разряда при раскрытии входной щели монохроматора до 100 мкм. Измерения, проведенные масс-спектрометром MKS Microvision plus (США), также подтверждают наличие остаточных газов в откачанной системе.

Рис. 7. Зависимость концентрации электронов от давления аргона

В ВЧ-разряде при увеличении давления аргона интенсивность всех регистрируемых линий аргона увеличивается, что связано с ростом плотности плазмы. На рис. 7а представлена полученная в расчетах зависимость концентрации электронов от давления аргона при фиксированном значении вводимой ВЧ-мощности, равном 600 Вт. Аналогичное поведение наблюдается при увеличении вводимой мощности. Зависимости концентрации и температуры электронной компоненты при изменении вводимой в разряд ВЧ-мощности приведены на рис. 8а, 9а. Значения указанных параметров и тенденции их изменений при варьировании разрядных условий типичны для индуктивного ВЧ-разряда.

Рис. 8. Зависимость температуры электронов от вводимой мощности

Рис. 9. Концентрация электронов как функция вводимой мощности

В СВЧ-разряде при увеличении давления аргона в пределах от $2 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ торр при фиксированной вводимой мощности интенсивность всех линий аргона значительно возрастает – это напрямую связано с увеличением концентрации нейтральной компоненты, при этом отмечается спад концентрации электронов.

С ростом вводимой мощности увеличивается интенсивность линий Ar II и уменьшается интенсивность линий Ar I. Интенсивность линий Ar I достигает насыщения при мощности выше 600 Вт, при дальнейшем ее увеличении до 2400 Вт интенсивность претерпевает незначительный спад. Ионизация метастабильных атомов приводит к уменьшению числа заселенных состояний Ar I. Выраженная нестабильность заселенности метастабильных

состояний Ar I не позволяет ограничиваться лишь замкнутой моделью заселения уровней Ar I и требует дополнительного учета ионизационных процессов и заселения состояний однозарядных ионов Ar II. Полученные значения температуры электронов и концентрации электронов (рис 8б, 9б) практически не зависят от вводимой СВЧ-мощности.

Параметры плазмы в плазменном потоке на выходе из магнитной ловушки (кривые 1, 2 на рис. 3) измерялись зондом Ленгмюра. В экспериментах с максимальным током в катушке 6.3 (рис. 2, 3) магнитное поле в области размещения зонда Ленгмюра II (рис. 2) достигает величины 600 Гс. Применение классической методики восстановления параметров плазмы из вольт-амперной характеристики одиночного зонда Ленгмюра [21] сопряжено с рядом трудностей. В работах [28, 29] показано, что ионная ветвь вольт-амперной характеристики зонда применима для определения концентрации ионов плазмы. Концентрация электронов в силу квазинейтральности может быть принята равной той же величине. Полученные результаты (по ионной части) приведены на зависимостях, представленных на рис. 10.

Рис. 10. Концентрация электронов в области создания плазменного потока

Генерируемый плазменный поток используется для облучения поверхности органических пленок, установленных в приемной камере. На данном этапе работ обработка образцов осуществлялась в плазменном потоке, сформированном с помощью СВЧ-разряда, со следующими параметрами: давление газа на входе в кварцевую трубу $5 \cdot 10^{-4}$ торр, вводимая СВЧ-мощность 1200 Вт, мощность отраженной волны составила 300 Вт.

Программа исследований подразумевала серийную обработку идентичных образцов пленок (серия из 6 образцов по времени экспозиции от 0 до 140 с). Типичные значения экспозиций указанных образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения экспозиций образцов пленок

№ образца	1	2	3	4	5	6
Время обработки, с	10	35	70	105	140	0

Тип воздействия (активация, субимплантация, имплантация) и ее степень существенным образом зависят от энергии ионов и плотности тока. Известно, что активация поверхностных свойств пленок при их обработке низкотемпературной плазмой происходит, когда энергия ионов в плазменном потоке не превышает 100 эВ. В этой связи были проведены измерения энергетического распределения ионов в области размещения образцов. На рис. 11 представлено энергетическое распределения ионов аргона, полученное по кривым запирающего тока коллектора многосеточного анализатора при работе СВЧ-генератора плазмы в указанном режиме.

Рис. 11. Типичная кривая запирания ионного тока коллектора

Определено, что средняя энергия ионов в данном режиме составила 77 эВ при плотности ионного тока в 65 мкА/см².

Обработанные согласно временам экспозиции (табл. 1) образцы были подвергнуты физико-химическому анализу. На рис. 12 приведены ИК-спектры образцов 1–5 в соответствии с ранее указанной экспозицией облучения плазмой. В спектрах всех облученных пленок появляются полосы поглощения 1260 см⁻¹ и 800 см⁻¹, которые характерны для оксианового цикла. Кроме того, наблюдаются полосы в области 1100–1000 см⁻¹, соответствующие образованию простых эфирных связей. Наличие новых полос вызвано, как минимум, химическими изменениями на поверхности пленок, т. е. химической модификацией поверхности. Подобные изменения обычно приводят к выраженной трансформации физико-химических свойств поверхности, гидрофильно-гидрофобного баланса, смачиваемости, адгезионной способности и, как следствие, биологической активности.

Рис. 12. ИК-спектры поглощения исследуемых пленок

Обработка плазмой сказывается на растворимости (рис. 13а) хитозановых пленок. Десятисекундная обработка хитозановой пленки №1 плазмой не сказывается на растворимости в сравнении с необлученной пленкой № 6 (растворимость обеих пленок составляет 67%). Дальнейшее увеличение времени обработки плазмой ведет к падению растворимости (43% для пленки № 2), при этом растворимость постепенно достигает наиболее низкого значения (15% в случае пленки № 3). При более длительной обработке (105 и 140 с для пленок № 4 и № 5) растворимость снова резко возрастает – приблизительно до 60%. Согласно результатам ИК-спектроскопического анализа, поверхность всех облученных пленок претерпевает аналогичные химические изменения. Вероятно, повышенная растворимость некоторых пленок обусловлена физическими процессами. Таковыми могут быть физическая модификация поверхности, облегчающая процесс растворения, или изменение конформации поверхностных макромолекул, способствующее их переходу в растворитель. Результаты исследования набухания пленок приведены на рис. 13б.

Рис. 13. Результаты исследования...

Все пленки демонстрируют ограниченное набухание. Динамика набухания необлученной пленки № 6 и облученной за минимальное время 10 с пленки № 1 практически идентична и характеризуется ограниченным набуханием до 50–70%, достигающим насыщения за 1 минуту после начала эксперимента. Пленка № 2 набухает больше всего (более чем в 3 раза). Представленные результаты набухания пленок согласуются с результатами, полученными в ходе

исследований их растворимости (частичная растворимость характерна для пленок с ограниченным набуханием).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан, изготовлен и протестирован экспериментальный стенд для моделирования и исследования воздействия плазменных потоков, генерируемых ВЧ- и СВЧ-разрядами, на биополимерные материалы. Описаны основные системы стенда, функционирующего в широких диапазонах давлений рабочих газов и их смесей, вводимой в разряд мощности ВЧ- и СВЧ-диапазонов, а также изменяемого профиля магнитостатического поля. Приведено описание диагностических средств для измерения параметров разрядов и генерируемого плазменного потока, а также методик обработки экспериментальных данных. Кратко представлена информация о подготовке образцов и способах диагностики поверхностных физико-химических изменений, возникающих в результате воздействий на хитозановые пленки.

Полученные в модельных расчетах результаты показали, что существующие системы генерации разрядов обладают возможностью тщательной настройки ввода мощности в разряд для конкретных рабочих режимов, что было экспериментально верифицировано.

Получены пространственные распределения концентрации и температуры плазмы в области генерации разрядов и в области плазменного потока при различных давлениях газа и мощностях вводимого в плазму излучения. В области размещения обрабатываемых плазмой образцов проведены измерения средней энергии ионов плазменного пучка, отмечена возможность ее варьирования.

Представлены результаты исследований изменения свойств органических образцов на примере хитозановых пленок под воздействием плазменных потоков СВЧ-разряда. При всех экспозиционных дозах воздействия были отмечены повышение энергии поверхности и изменение гидрофобности, что свидетельствует об эффективности активации поверхности пленок аргоновой плазмой. Анализ ИК-спектров также показал, что при выбранном режиме СВЧ-разряда наблюдается значительная активация поверхности пленок, что, в свою очередь, свидетельствует о перспективности предлагаемого подхода.

В настоящее время продолжают работы по модернизации диагностического комплекса стенда путем его дооснащения методами диодной лазерной спектроскопии и микроволновой интерферометрии. Текущие исследования направлены на поиск режимов, обеспечивающих оптимальные параметры плазменных потоков в различных газах и газовых смесях для достижения целевых параметров модификации поверхностей хитозановых пленок. Разработанная конструкция стенда позволяет провести автоматизацию процесса поддержания рабочих

режимов при оптимизации процессов обработки, что также является предметом выполняемых на стенде работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ FSSF-2026-0043) в рамках федерального проекта “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Puertas-Bartolomé M., Mora-Boza A., García-Fernández L.* // *Polymers*. 2021. V. 13. № 8. P. 1209. <https://doi.org/10.3390/polym13081209>
2. *Volova T.G., Vinnik Yu.S., Shishatskaya E.I., Markelova N.M., Zaikov G.E.* *Natural-Based Polymers for Biomedical Applications*. Apple Academic Press, 2021. ISBN 9781774636329
3. *Andreeva T.D., Dér A., Kelemen L., Krastev R.* // *Polym. Adv. Technol.* 2020. V. 3. № 7. P. 1562. <https://doi.org/10.1002/pat.4885>
4. *Satchanska G., Davidova S., Petrov P.D.* // *Polymers*. 2024. V. 16. № 8. P. 1159. <https://doi.org/10.3390/polym16081159>
5. *Коршак В.В.* // *Успехи химии*. 1980. Т. 49. № 12. С. 2286.
6. *Ясуда Х.* *Полимеризация в плазме*. Москва: Мир. 1988.
7. *Ricard A.* *Reactive Plasmas*. Paris: Société française du vide, 1996.
8. *Popov O.A.* *High Density Plasma Sources*. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1995.
9. *Chen F.F.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2015. V. 24. P. 014001. <http://doi.org/10.1088/0963-0252/24/1/014001>
10. *Черкез Д.И., Бобырь Н.П., Спицын А.В., Ананьев С.С.* // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. 2020. Т. 43. № 3. С. 101. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44089878>
11. *Кузьмин Е.И., Шиховцев И.В.* // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 6. С. 507. <https://doi.org/10.31857/S0367292121060111>
12. *Miljak D., Chen F.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1999. V. 7. P. 61. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/7/1/009>
13. *Geller R.* *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*. New York: Routledge, 1996. <https://doi.org/10.1201/9780203758663>
14. *Sakudo N.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. V. 71. № 2. P. 1016. <https://doi.org/10.1063/1.1150376>
15. *Seong Bong Kim, Dae Chul Kim, Won Namkung, Moohyun Cho, Suk Jae Yoo* // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81. P. 083301. <http://doi.org/10.1063/1.3477998>

16. *Gammino S., Celona L., Ciavola G., Maimone F., Mascali D.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81. P. 02B313. <https://doi.org/10.1063/1.3266145>
17. Comsol Multiphysics. Version 6.2. 2023. Reference Manual. <https://www.comsol.com> .
18. *Miliak J., Chen F.F.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1998. V. 7. P. 61. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/7/1/009>
19. *Siepa S., Danko S., Tsankov T.V., Mussenbrock T., Czarnetzki U.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. V. 47. P. 44520. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/44/445201>
20. *Iordanova S., Koleva I.* // *Spectrochim. Acta, Part B.* 2007. V. 62. № 4. P. 344.
21. *Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А.* Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. Москва: Энергоатомиздат, 1996
22. *Baloniak T., Reuter R., Flötgen C., Keudell A.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. № 5. P. 55203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/5/055203>
23. *Bardet R., Consoli T., Geller R.* // *Nuclear Fusion.* 1965. V. 5. P. 7.
24. *Boswell R.W.* // *Plasma Phys. Control. Fusion* 1984. V. 26. P. 1147. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/26/10/001>
25. *Chen F.F.* // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1992. V. 10. P. 1389. [10.1116/1.578256](https://doi.org/10.1116/1.578256)
26. *Chen F.F., Sudit I.D., Light M.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1996. V. 5. P. 173. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/5/2/009>
27. *Shinohara Sh.* High Density helicon plasma science. From Basics to Applications. Springer Series in Plasma Science and Technology. Springer, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-2900-7>
28. *Rynn N., D'Angelo N.* // *Rev. Sci. Instr.* 1960. V. 31. № 12. P. 1326. <https://doi.org/10.1063/1.1716884>
29. *Рябый В.А., Обухов В.А.* // *Прикладная физика.* 2012. № 5 С. 46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18037429>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Установка RAPIRA.

Рис. 2. Схема установки: 1 – приемная вакуумная камера, 2 – кварцевая труба (плазмотрод), 3 – вакуумметр ПМТ-2, 4.1 – вакуумметр АВ3276, 4.2 – вакуумметр ПММ-32-1, 5 – СНА-1, 6.1–6.3 – магнитные катушки, 7 – геликонная антенна, 8 – СВЧ-резонатор, 9 – многосеточный анализатор, 10 – карусель с образцами, 11 – зонд Ленгмюра, 12 – оптоволокно ОЭС.

Рис. 3. Зависимость распределения индукции магнитного поля вдоль кварцевой трубы: кривая 1 – СВЧ-разряд, кривая 2 – ВЧ-разряд.

Рис. 4. Распределение модуля напряженности электрического поля в резонаторе СВЧ-разряда и прилегающей области плазмотрода: а – осевое сечение в плоскости xz ; б, в – сечения перпендикулярны оси z и расположены на 3 см левее и правее плоскости возбуждения соответственно, г – плоскость возбуждения. Цифрами обозначены: 1 – плазма, 2 – плазмотрод, 3 – область пространства между кварцевой трубой и трубой запредельного волновода, 4 – резонатор; 5, 6 – штыревые антенны. Цветовая палитра рисунка соответствует напряженности электрического поля, определяемой по шкале справа (В/см).

Рис. 5. Распределение модуля напряженности электрического поля в области антенны геликонного разряда и прилегающей области плазмотрода: 1 – плазма, 2 – кварцевая труба, 3 – область пространства, окружающая плазмотрод, 4 – антенна, 5, 6 – подводящие ВЧ-мощность к антенне провода и коаксиальные кабели. Цветовая палитра рисунка соответствует напряженности электрического поля, определяемой по шкале справа (В/см).

Рис. 6. Качественный спектральный состав плазмы: а – ВЧ-разряд, $P = 4 \cdot 10^{-3}$ торр, $W = 200$ Вт; б – СВЧ-разряд, $P = 4 \cdot 10^{-4}$ торр, $W = 1200$ Вт.

Рис. 7. Зависимость концентрации электронов от давления аргона: а – ВЧ-разряд, $W = 600$ Вт; б – СВЧ-разряд, $W = 200$ Вт.

Рис. 8. Зависимость температуры электронов от вводимой мощности: а – ВЧ-разряд, $P = 3.5 \cdot 10^{-3}$ торр, б – СВЧ-разряд, $P = 8 \cdot 10^{-4}$ торр (звездочки – вычисление по методу [20], точки – отношение спектральных линий 811.5 нм и 750.4 нм).

Рис. 9. Зависимость концентрации электронов от вводимой мощности: а – ВЧ-разряд, $P = 3.5 \cdot 10^{-3}$ торр, б – СВЧ-разряд, $P = 8 \cdot 10^{-4}$ торр.

Рис. 10. Зависимость электронной концентрации от рабочего давления газа (Ar) в канале плазмотрода при фиксированных значениях вводимой мощности: а – ВЧ-разряд,

$W = 600$ Вт, **б** – СВЧ-разряд, $W = 1200$ Вт. Поведение электронной концентрации от вводимой мощности при фиксированном давлении плазмообразующего газа: **в** – ВЧ-разряд, $P = 3 \cdot 10^{-3}$ торр; **г** – СВЧ-разряд, $P = 7.5 \cdot 10^{-4}$ торр.

Рис. 11. Типичная кривая запирающего ионного тока коллектора для СВЧ-разряда при $W = 1200$ Вт и $P = 5 \cdot 10^{-4}$ торр: 1 – измеренные значения с восстановленной огибающей (левая шкала), 2 – восстановленное энергетическое распределение ионов (правая шкала).

Рис. 12. ИК-спектры поглощения исследуемых пленок.

Рис. 13. Результаты исследования растворимости (**а**) и набухания (**б**) пленок.

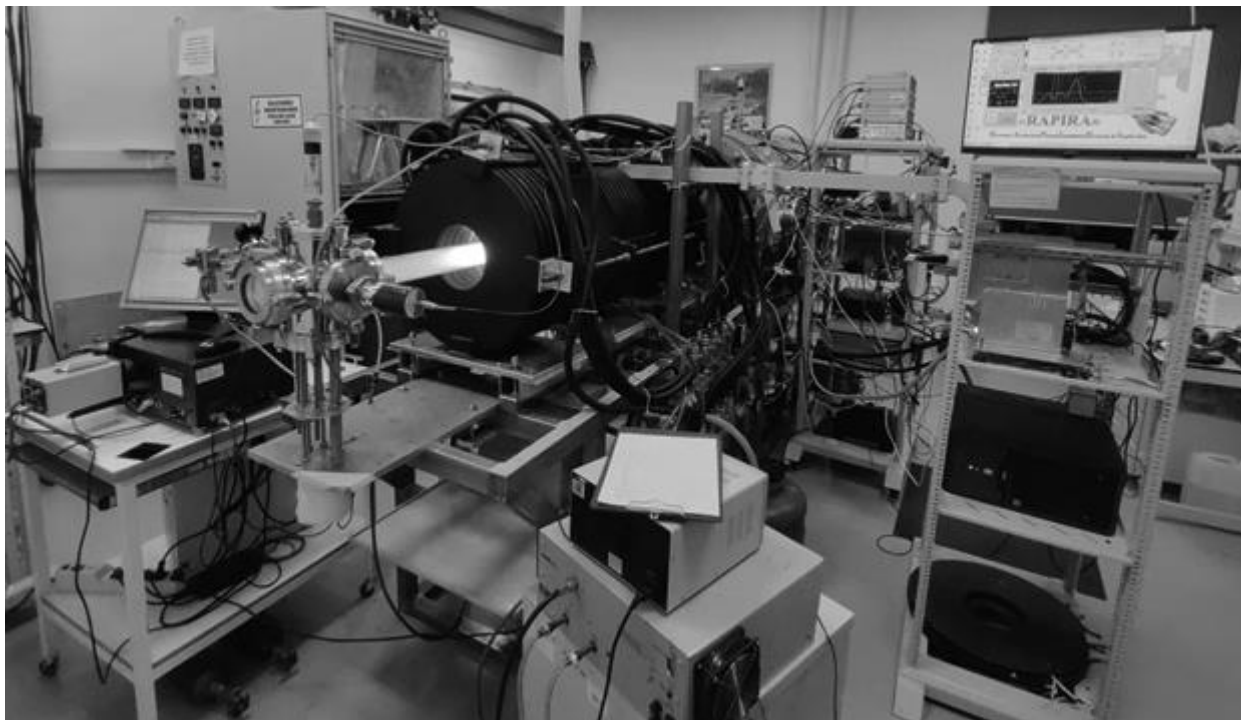


Рис. 1.

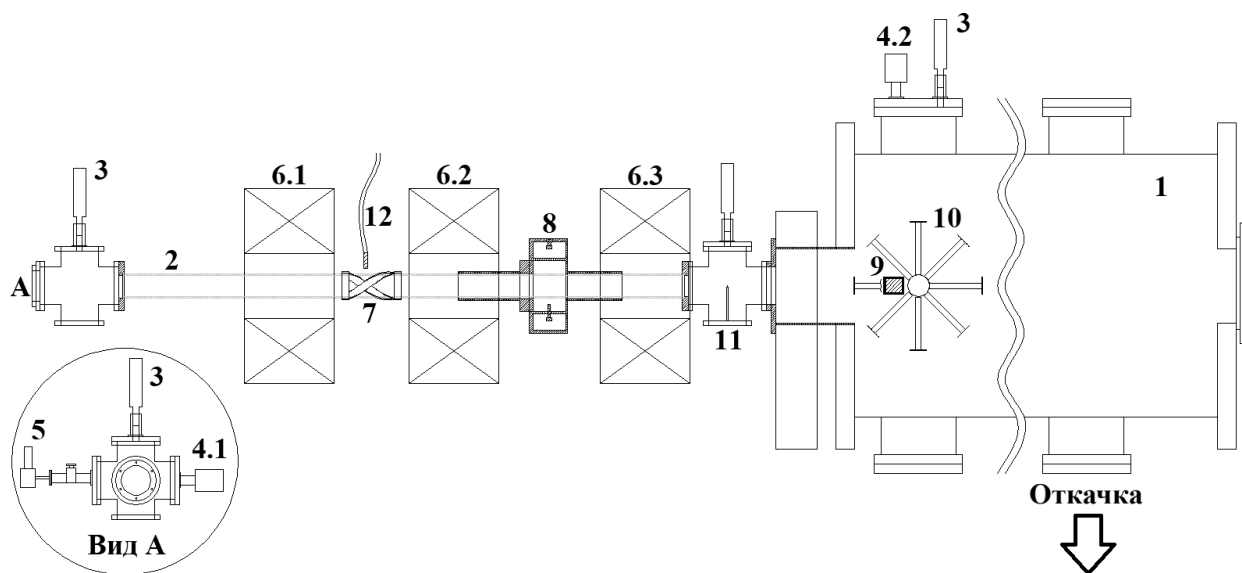


Рис. 2.

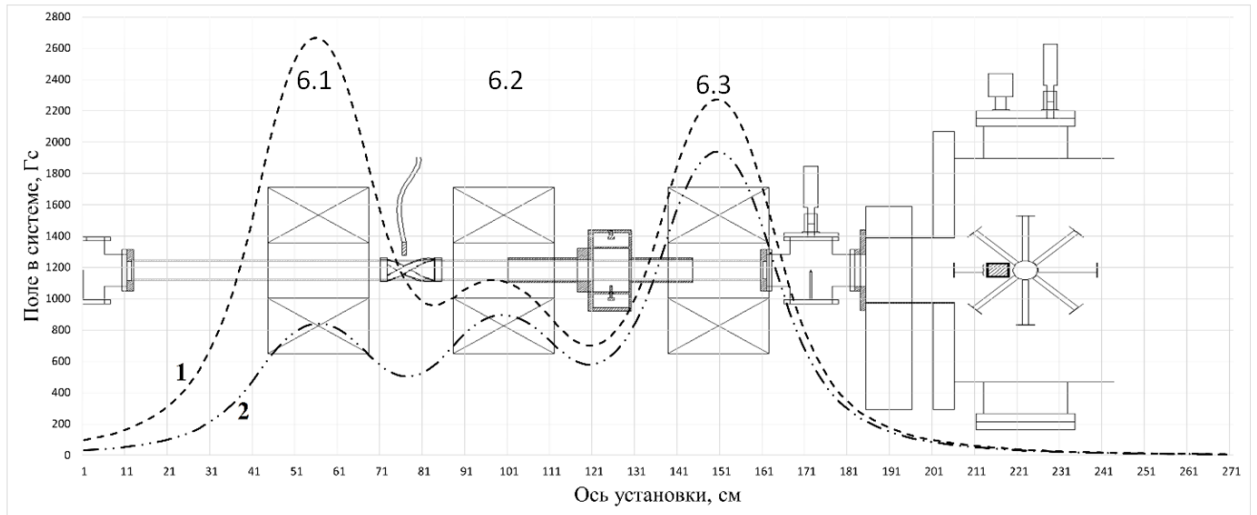


Рис. 3.

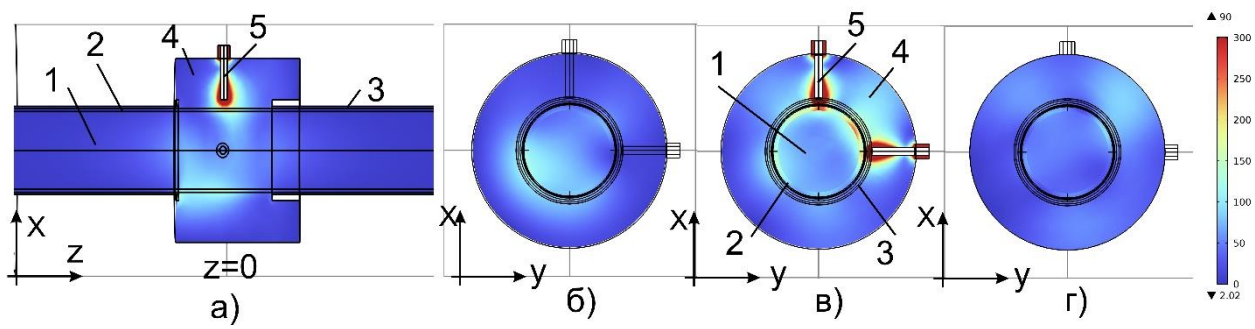


Рис. 4.

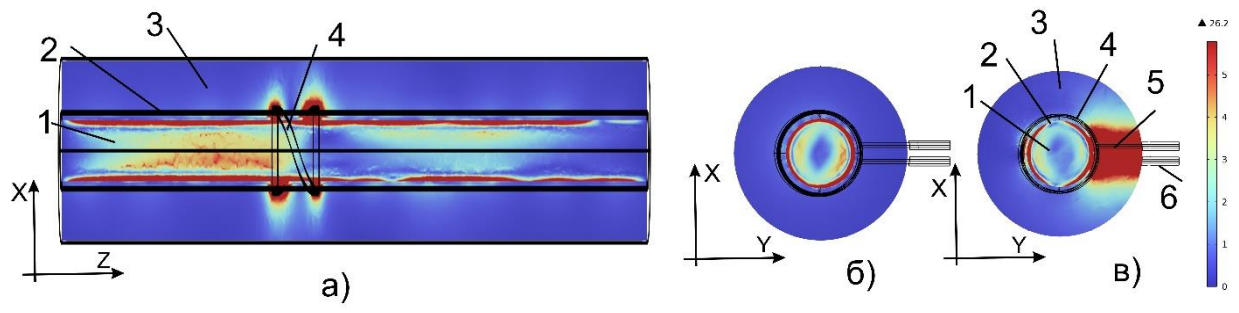


Рис. 5.

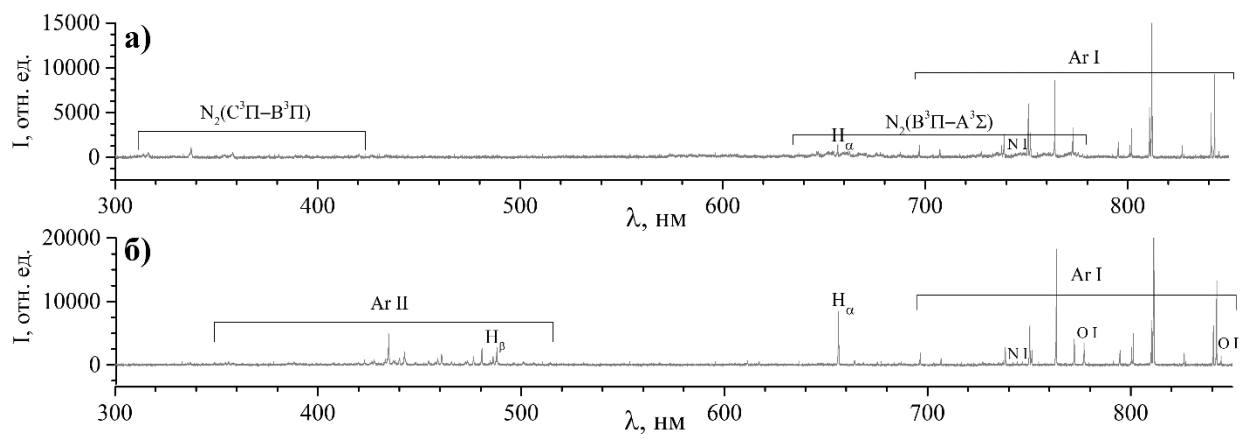


Рис. 6.

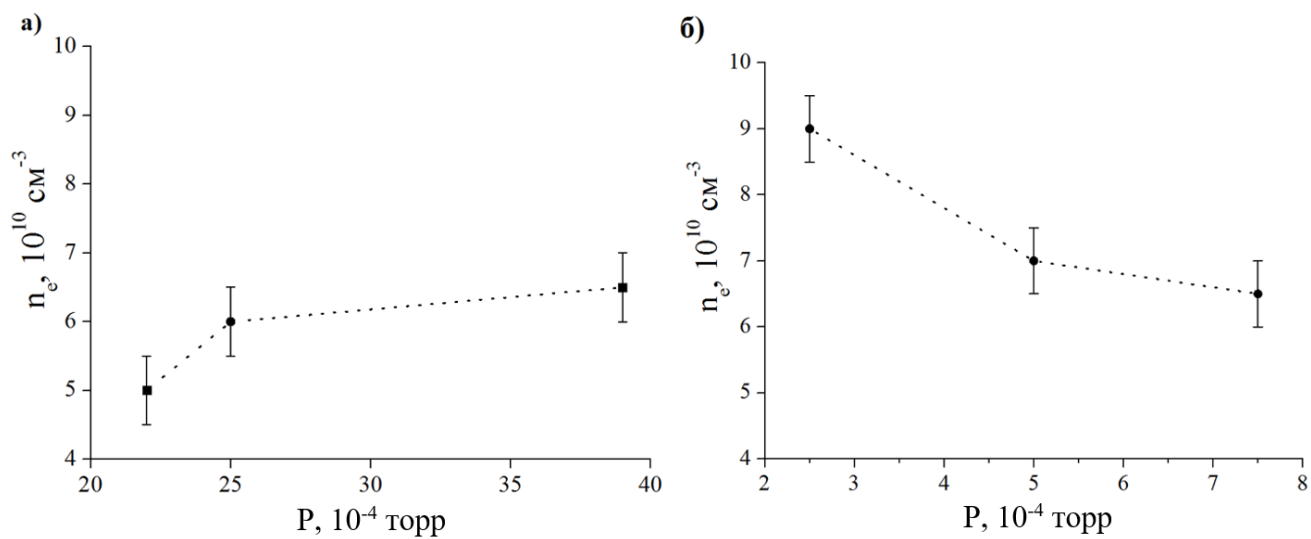


Рис. 7.

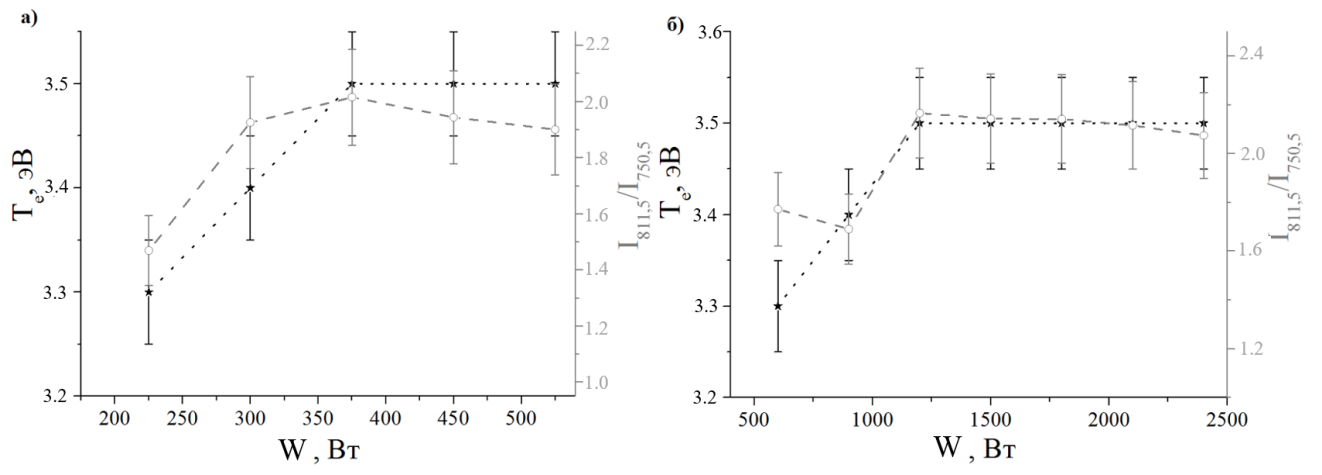


Рис. 8.

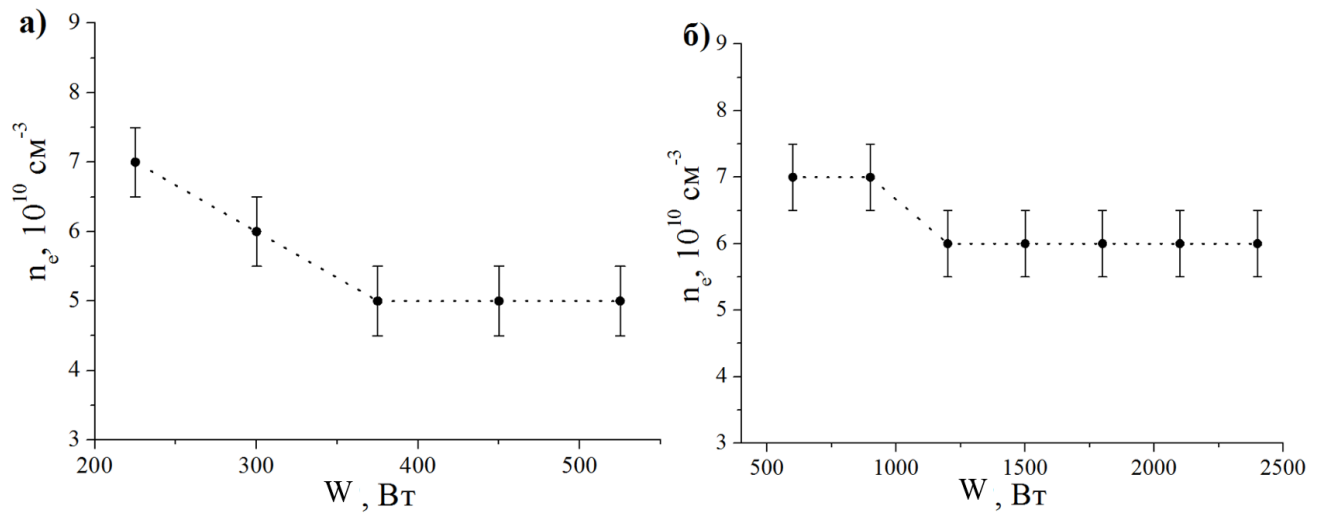
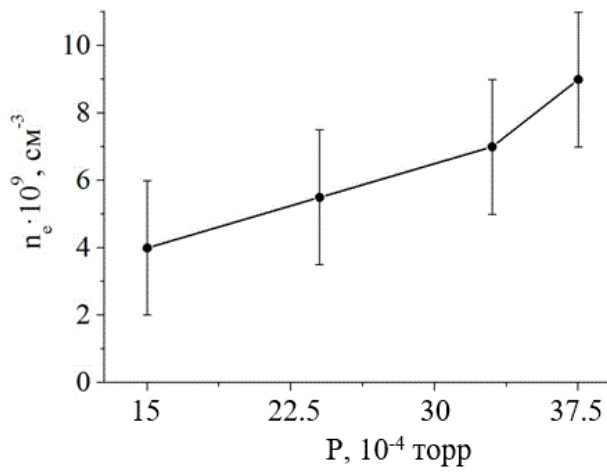
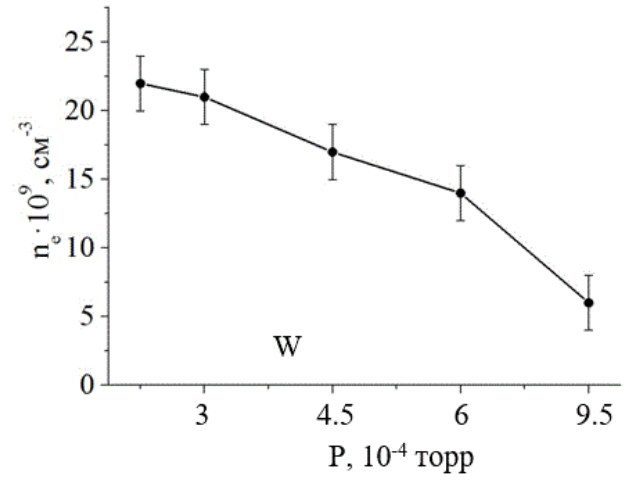


Рис. 9.

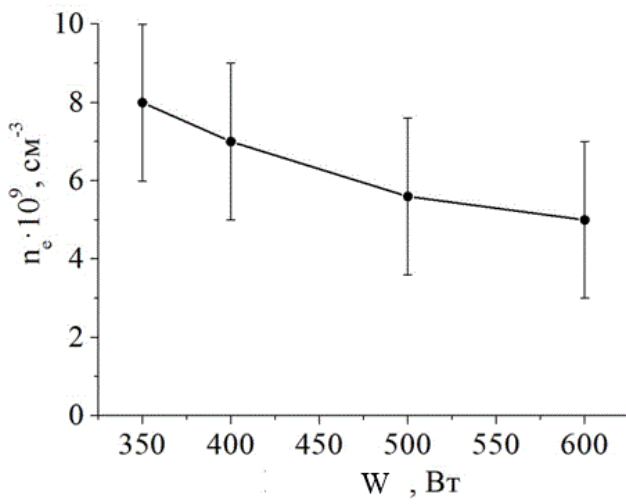
a)



б)



в)



г)

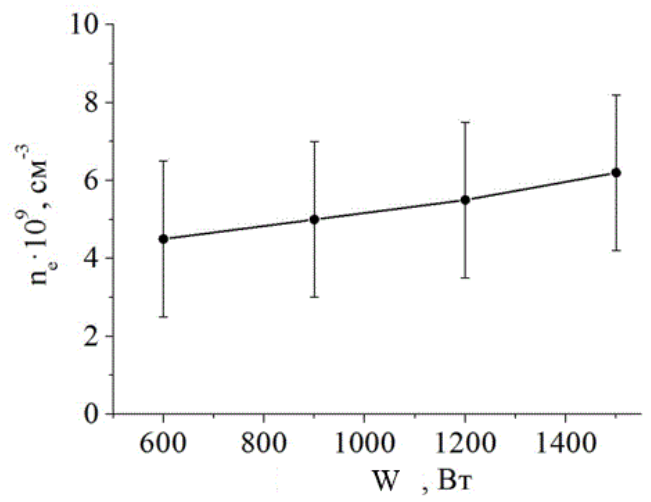


Рис. 10.

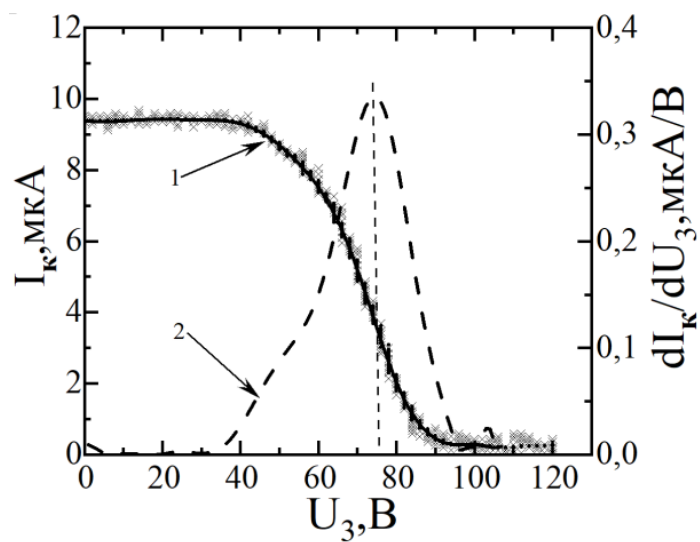


Рис. 11.

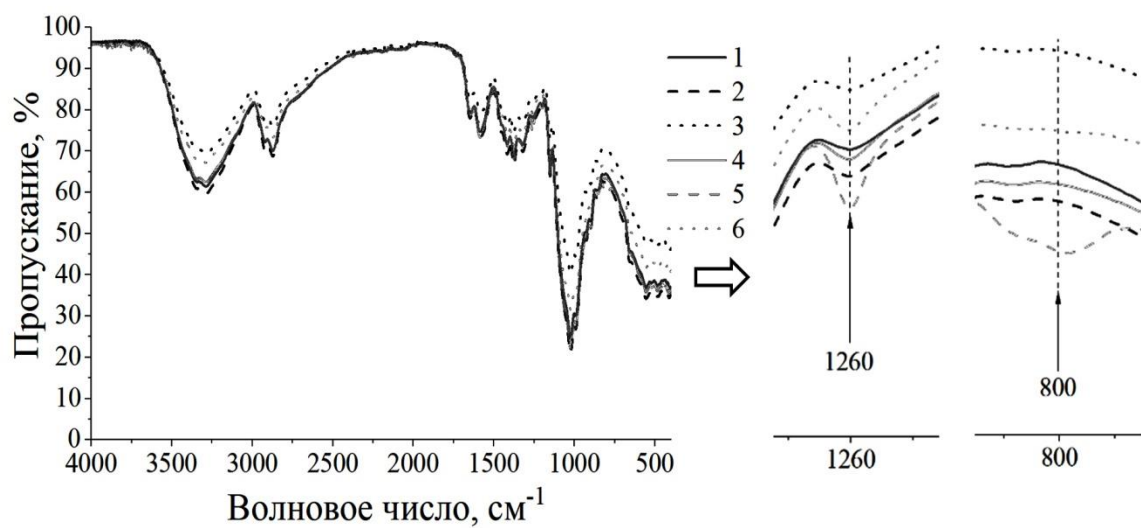


Рис. 12.

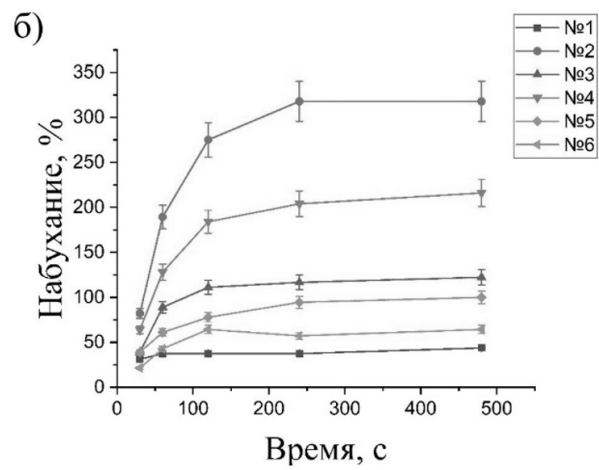
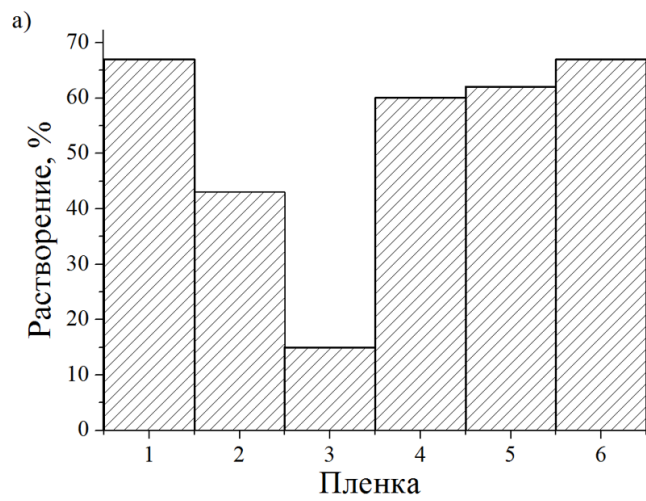


Рис. 13.