



Экспериментальная плазменная установка С-1 с винтовыми магнитными полями

*И. П. Афонин, Б. И. Гаврилов, Е. К. Завойский, Ф. В. Карманов,
Г. П. Максимов, А. Г. Пляхов, П. А. Черемных, В. В. Шапкин*

Кратко описываются конструкция и режим работы стелларатора, имеющего форму рейстрекка, с винтовыми магнитными полями, сооруженного в ордене Ленина Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова АН СССР. Приводятся некоторые результаты, характеризующие работу установки.

Впервые идея создания установки с винтовыми полями (стелларатора) была высказана Спитцером [1, 2]. В таких установках создается вращение магнитных силовых линий вокруг магнитной оси. Магнитной осью называется магнитная силовая линия, замыкающаяся сама на себя после одного обхода вдоль установки. Спитцером и его сотрудниками предложены методы получения замкнутых винтовых полей как путем топологического изменения конфигурации тора (установки в виде «восьмерки»), так и при помощи специальных винтовых обмоток. Установки со специальными винтовыми обмотками представляют больший интерес, чем установки типа «восьмерки», так как они, кроме вращения магнитных силовых линий вокруг магнитной оси, обладают и другими свойствами. В таких установках число винтовых обмоток и ток в них позволяют изменять область замкнутых магнитных поверхностей и угол поворота магнитных силовых линий на разных радиусах. Большой вклад в расчеты сложных конфигураций винтовых полей, созданных винтовыми обмотками, внесен советскими учеными [3—7].

Теория предсказывает, что в установках с винтовыми полями при отсутствии больших продольных токов плазма должна быть магнитодинамически устойчивой, поэтому решено было построить такую установку в Институте атомной энергии им. И. В. Кур-

чатова. Следует, однако, отметить, что экспериментальные данные по удержанию плазмы показали более быстрый уход заряженных частиц из разряда, чем ожидалось. Это может быть объяснено недостаточно точным выполнением необходимой конфигурации магнитных полей или может являться результатом пока не совсем ясных, по существенных процессов, происходящих в самой плазме. В связи с этим при конструировании установки особое внимание было обращено на точность выполнения необходимой конфигурации магнитных полей.

Конструкция установки

Установка имеет форму рейстрекка. Общий вид ее показан на рис. 1. Основные параметры установки: внутренний диаметр вакуумной камеры 10 см, длина прямолинейных участков 120 см; средний радиус закругления 60 см; периметр установки 617 см. Продольное магнитное поле может достигать 25 кэ; величина H_{\perp}/H_0 , характеризующая винтовое поле и введенная в работе [4], может принимать значения от 0,2 до 0,6. Максимальное напряжение обхода 400 в. Конденсаторная батарея для создания продольного магнитного поля имеет запас энергии 1700 кдж ($C = 3,45 \cdot 10^{-2} \text{ ф}$, $v = 10 \text{ кВ}$). Запас энергии конденсаторной батареи, питающей трансформаторы омического нагре-

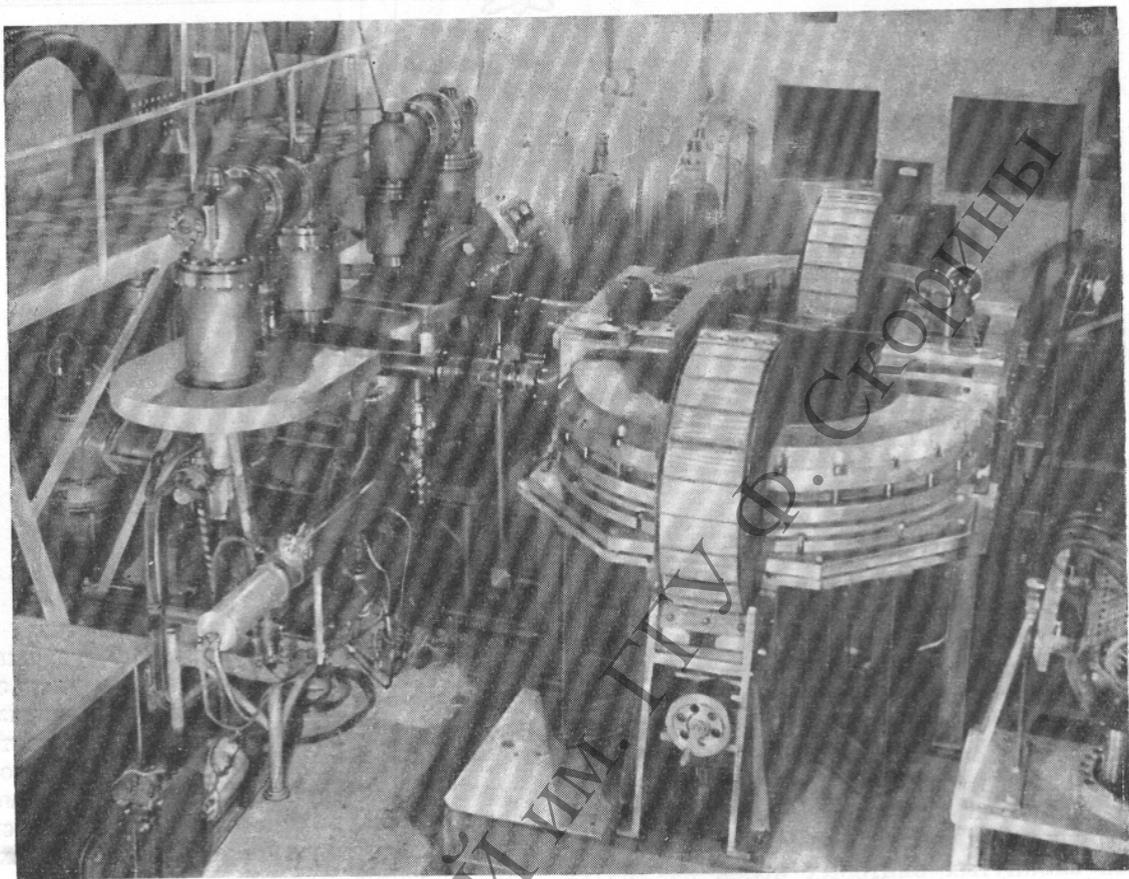


Рис. 1. Общий вид установки С-1.

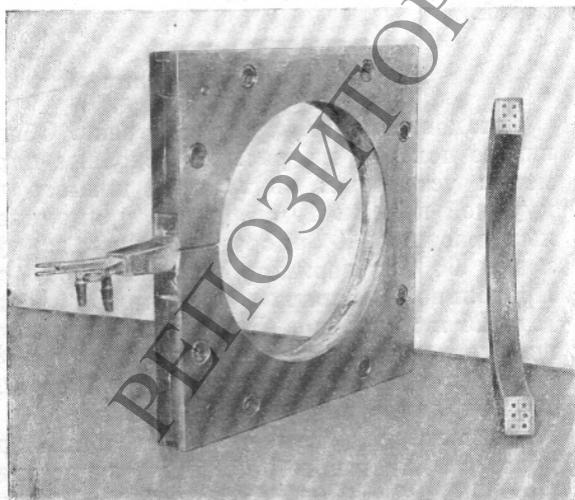


Рис. 2. Катушка в сборе и в разрезе.

ва, составляет 45 кдж ($C = 3,6 \cdot 10^{-3}$ ф, $v = 5$ кв).

Продольное магнитное поле создается магнитной системой, состоящей из катушек и соленоидов. Соленоиды расположены на закруглениях вакуумной камеры, а катушки — на прямолинейных участках. Средний диаметр катушек 34 см. В каждой из них намотано по шесть витков из медной квадратной трубки 10×10 мм² с отверстием 5×5 мм². При намотке между витками оставлялся изоляционный зазор, равный 1 мм. После заливки эпоксидным компаундом катушки закрепляются между щеками из нержавеющей немагнитной стали. Конструкция катушки показана на рис. 2. Расстояние между катушками 85 мм. Для лучшего «сшивания» магнитного поля между соленоидами и катушками в районе перехода с криволинейного участка на прямолиней-

ный изготовлены четыре катушки, имеющие по 12 витков и средний диаметр 200 мм.

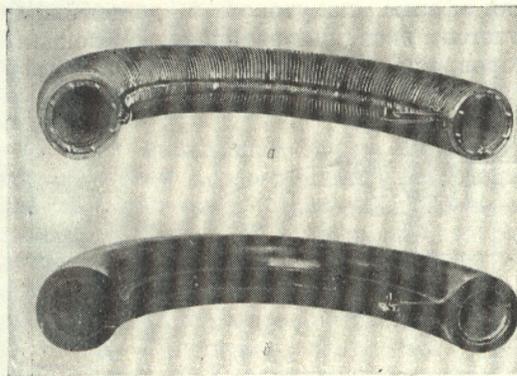


Рис. 3. Соленоид в сборке (а) и залитый эпоксидным компаундом (б).

Они выполнены из медной трубки диаметром 6×1 мм, также залиты эпоксидным компаундом и закреплены между щеками из нержавеющей стали.

Соленоиды собраны из медных колец. Основанием соленоида служит полукруг из текстолита. Средний диаметр колец 203 мм.

Они соединены последовательно фигурными перемычками, по которым ток протекает вдоль образующей полутора. Параллельно перемычкам проложен компенсирующий проводник, в котором направление тока противоположно. К кольцам припаяны медные трубки диаметром 6×1 мм для охлаждения водой. Соленоид залит эпоксидным компаундом. Конструкция соленоида показана на рис. 3.

Основанием винтовых обмоток служит каркас в виде полутора, собранный из специальных фигурных колец, спрессованных из смолы АГ-4. Кольца имеют пазы под углом 12° к направляющей полутора для укладки винтовых обмоток, выполненных в виде трехзаходного винта из медной трубки диаметром $8 \times 1,5$ мм и состоящих из шести секций. В соседних секциях, каждая из которых состоит из четырех проводников, токи направлены в противоположные стороны. Проводники в винтовой обмотке соединяются последовательно и после закрепления в пазах заливаются эпоксидным компаундом. Винтовые обмотки на закружении делают один оборот, следовательно, угол прокручивания их равен $0,0333$ рад/см. На рис. 4 показана кон-

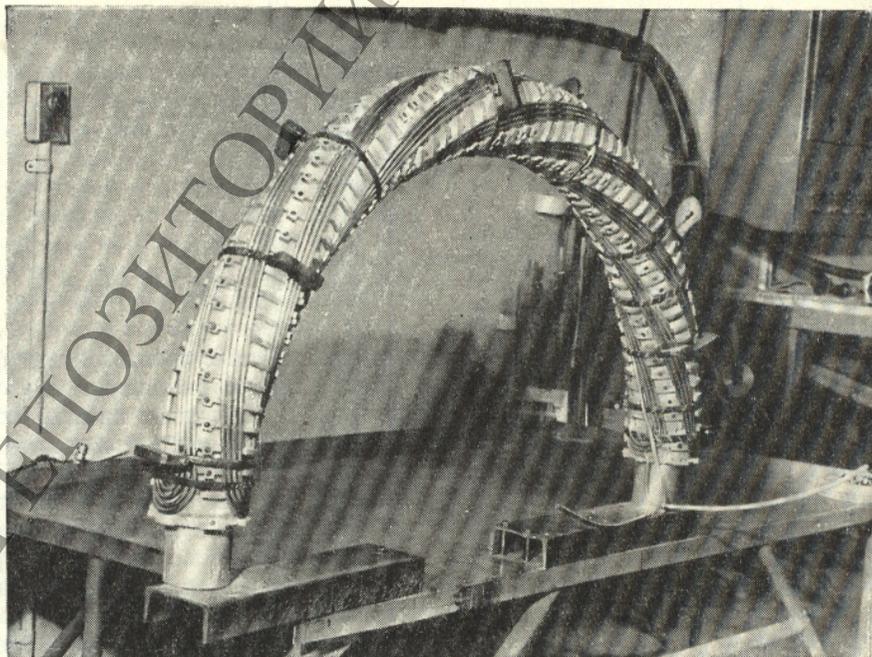


Рис. 4. Винтовая обмотка.

струкция винтовых обмоток до заливки эпоксидным компаундом. Полуторы винтовых обмоток вставляются внутрь соленоидов и центрируются в них.

Соленоиды, катушки и винтовые обмотки соединены последовательно. Параллельно

Они изготовлены из нержавеющей стали 1Х18Н9Т штамповкой из листа половинок, сваренных по образующим полутора. Правильная форма полуторов в дальнейшем достигается экспандированием. К концам полуторов приварены прямолинейные уча-

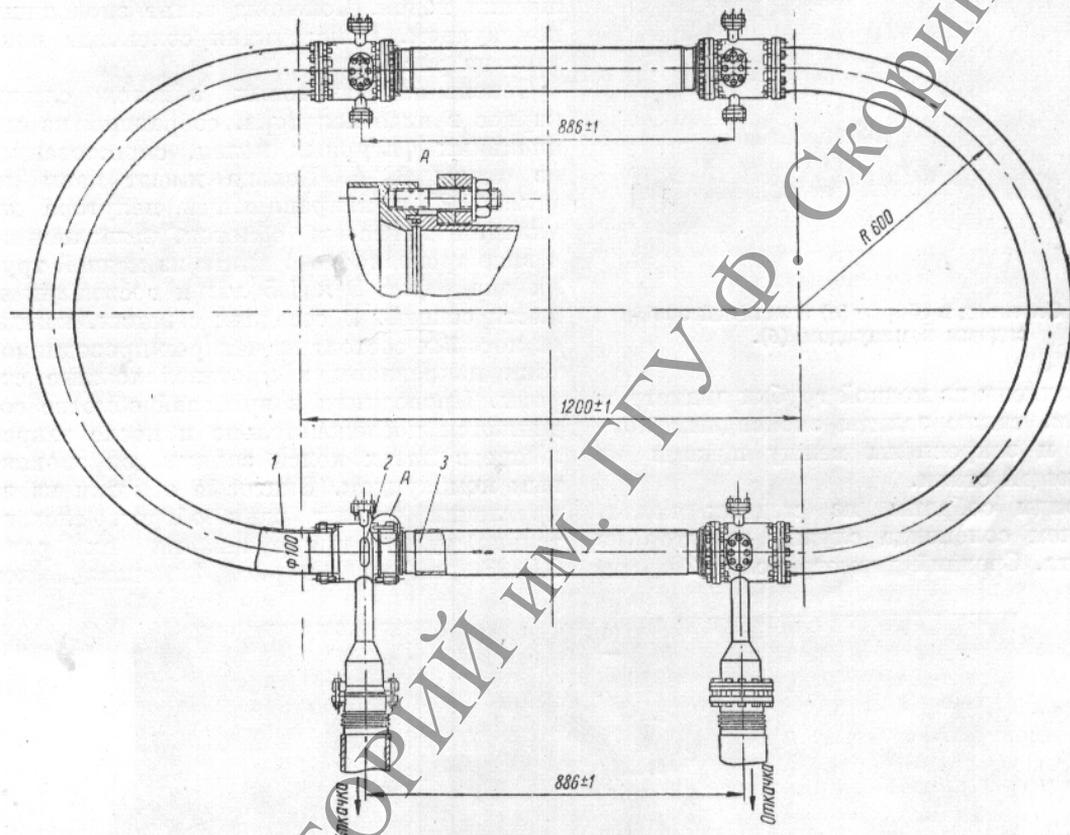


Рис. 5. Вакуумная камера:

1 — полутор; 2 — вкладыш; 3 — прямолинейный участок; А — место уплотнения.

винтовым обмоткам включен шунт, при помощи которого регулируется проходящий через них ток.

В вакуумную систему установки входят вакуумная камера, откачные устройства и устройства для напуска газа. На рис. 5 показан чертеж вакуумной камеры, состоящей из двух полуторов, двух прямолинейных участков и четырех вкладышей, соединяющих полуторы с прямолинейными участками.

Средний радиус полуторов 60 см, внутренний диаметр 10 см, толщина стенки 0,2 см.

стки длиной 5 см с прижимными фланцами для соединения с вкладышами.

Прямолинейные части камеры состоят из стеклянных участков, изготовленных из стекла ЗС-5, внутренним диаметром 10 см и толщиной стенки 0,5 см и переходников. Переход от стекла к металлу осуществляется через коваровые кольца, к которым приварены сильфоны для предохранения стекла от перенапряжений при его установке и обезгаживании камеры. К сильфонам приварены фланцы для соединения с вкладышами.

Вкладыши изготовлены из нержавеющей стали. Каждый вкладыш имеет четыре патрубка, которые используются для экспериментальных целей, откачки камеры и напуска газа. Для напуска водорода используется подогревный палладиевый натекагель, а для напуска гелия — игольчатый натекагель.

К двум вкладышам через соответствующие патрубки подсоединяются параллельно два паромасляных высоковакуумных агрегата типа ВА-0,5-2Р. Они имеют две расположенные последовательно ловушки, охлаждаемые жидким азотом. Максимальная скорость откачки агрегатов составляет 100 л/сек и может изменяться вентилями ДУ-100. Предварительный вакуум создается насосами ВН-1.

Все узлы вакуумной системы до форвакуумной части соединяются на медных уплотнениях. В принципе собранная вакуумная система может прогреваться при 450° С. Однако в настоящее время вакуумная камера в собранном виде полностью пока не прогревается, а производится обезгаживание отдельных узлов вакуумной системы перед сборкой на специальном вакуумном стенде. В собранной вакуумной системе возможна обработка стенок камеры разрядами. Вакуум, достигнутый в установке, составляет $0,8 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.

На криволинейных участках установки расположены два трансформатора для создания высокоионизованной и горячей плазмы в режиме омического нагрева. Торoidalные сердечники трансформаторов намотаны в виде спирали из листовой стали марки Э-330. Сечение сердечника 600 см^2 . Первичная обмотка трансформатора содержит 25 витков, равномерно распределенных по сердечнику, из медной проволоки сечением 15 мм^2 . Вторичным витком трансформаторов является плазма в вакуумной камере, предварительно создаваемая слабой ионизацией рабочего газа высокочастотным полем от специального генератора.

На прямых участках стеклянных участков помещаются высокочастотные контуры для изучения воздействия на плазму поля высокой частоты. Для таких исследований предназначена генератор мощностью 1 Вт в импульсе длительностью 1,5 мсек, работающий на частоте 20 Мгц. Контур помещается в герметичные экраны, в которых

можно создавать вакуум до 10^{-6} мм рт. ст. или нагнетать азот или элغاز до давления 10 атм для повышения электрической прочности контура.

Установка смонтирована на специальной станине из немагнитного материала. Все крепежные детали магнитной системы также сделаны из немагнитного материала.

Питание установки

Магнитная система и трансформаторы питаются энергией, запасенной в конденсаторных батареях. Конденсаторная батарея, питающая магнитную систему, состоит из двух групп конденсаторов типа ИМ-150/5 по 458 конденсаторов в каждой группе. Конденсаторы в группе соединены параллельно, а группы последовательно. Каждый конденсатор для предохранения от перегрузки в случае пробоя подключен к батарее через предохранитель. Схема питания магнитной системы показана на рис. 6. Батарея заряжается от выпрямителя БМ-135 через сопротивление R_3 , равное $\sim 2 \text{ ком}$, изготовленное

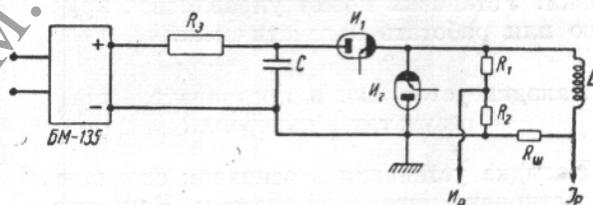


Рис. 6. Схема питания установки С-1.

из нихромовой проволоки диаметром 1 мм, а разряжается через игнитрон I_1 типа ИВС-100/15. Параллельно нагрузке включен второй игнитрон I_2 такого же типа. Этот игнитрон зажигается при небольшом обратном напряжении на батарее. Он затягивает импульс тока. Последовательно с нагрузкой включено калиброванное сопротивление $R_{ш}$, импульс напряжения с которого, поданный на осциллограф, используется для наблюдения величины и формы импульса тока в магнитной системе. Импульс с сопротивления R_2 высокоомного делителя, включенного параллельно нагрузке, служит для наблюдения величины и формы импульса полного напряжения на магнитной системе.

Конденсаторная батарея, питающая трансформаторы, состоит из 24 конденсаторов ИМ-150/5, включенных параллельно. Схема

питания трансформаторов отличается от схемы, приведенной на рис. 6, лишь тем, что второй игнитрон I_2 может зажигаться при той же полярности напряжения на нагрузке, при какой зажигается и первый. Это позволяет получать прямоугольный импульс напряжения. Длительность импульса может меняться в зависимости от времени зажигания второго игнитрона. Для получения аperiodического разряда в цепь последовательно с трансформаторами включено сопротивление. Импульсы с делителя, включенного параллельно нагрузке, и с калиброванного сопротивления, включенного последовательно с ней, дают возможность наблюдать форму и величину импульсов напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора.

Высокочастотный генератор питается от мощного модулятора. Установка управляется с пульта, на который вынесено управление выпрямителями, модулятором, генератором, вакуумной системой, зарядкой обеих конденсаторных батарей и блокировкой. На пульте имеется также программное устройство для задания цикла работы установки. Установка может управляться вручную или работать автоматически.

Наладка установки и предварительные результаты измерений

Наладка установки в основном сводилась к юстировке магнитной системы. Компенсационным методом были промерены продольный компонент H_z магнитного поля на оси

системы и на разных радиусах, а также влияние металлических частей вакуумной камеры. На рис. 7 показан график H_z вдоль оси вакуумной камеры. Кривые 2 и 3 приведены для случая, когда в районе вкладышей помещены катушки с 20 и 12 витками. Пунктиром показан провал поля, когда поставлены катушки с шестью витками. На этом же рисунке приведен график сдвига фазы переменного магнитного поля в разных участках установки из-за влияния металлических частей камеры. Из графика видно, что максимальный сдвиг фазы в районе вкладышей и кожухов не превышает 5° .

Для наблюдения сложных конфигураций магнитных полей ранее была разработана методика вращающихся электронных пучков. Собранный магнитная система установки была проверена электронными пучками, ось магнитной системы совмещена с осью вакуумной камеры выбором положения компенсирующих проводников. Внутренняя область сепаратрисы была вписана в сечении вакуумной камеры путем подбора тока в винтовых обмотках. При этом величина H_z/H_0 оказалась равной 0,55. Магнитное поле достигало максимума через 10 мсек после начала разряда и спадало за 15 мсек.

На данной установке для исследования плазмы в настоящее время применяются различные методы. Определяются форма и величина импульсов напряжения вдоль камеры и тока в плазме. Методом пропускания электромагнитных волн с длинами волн 3 и 0,8 см определяется концентрация элек-

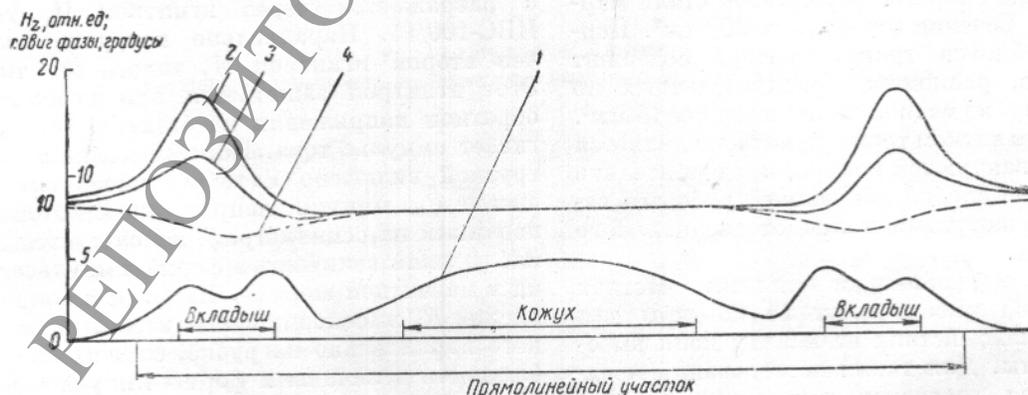


Рис. 7. Графики сдвига фазы и амплитуда магнитного поля в районе прямолинейного участка:

1 — сдвиг фазы переменного магнитного поля; 2—4 — амплитуда H_z в относительных единицах (в районе вкладыша катушка имеет: 2 — 20 витков, 3 — 12 витков, 4 — шесть витков).

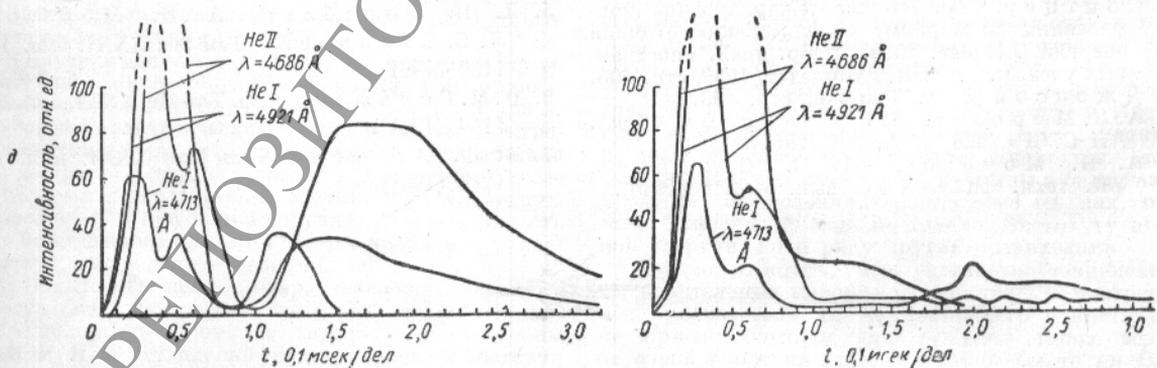
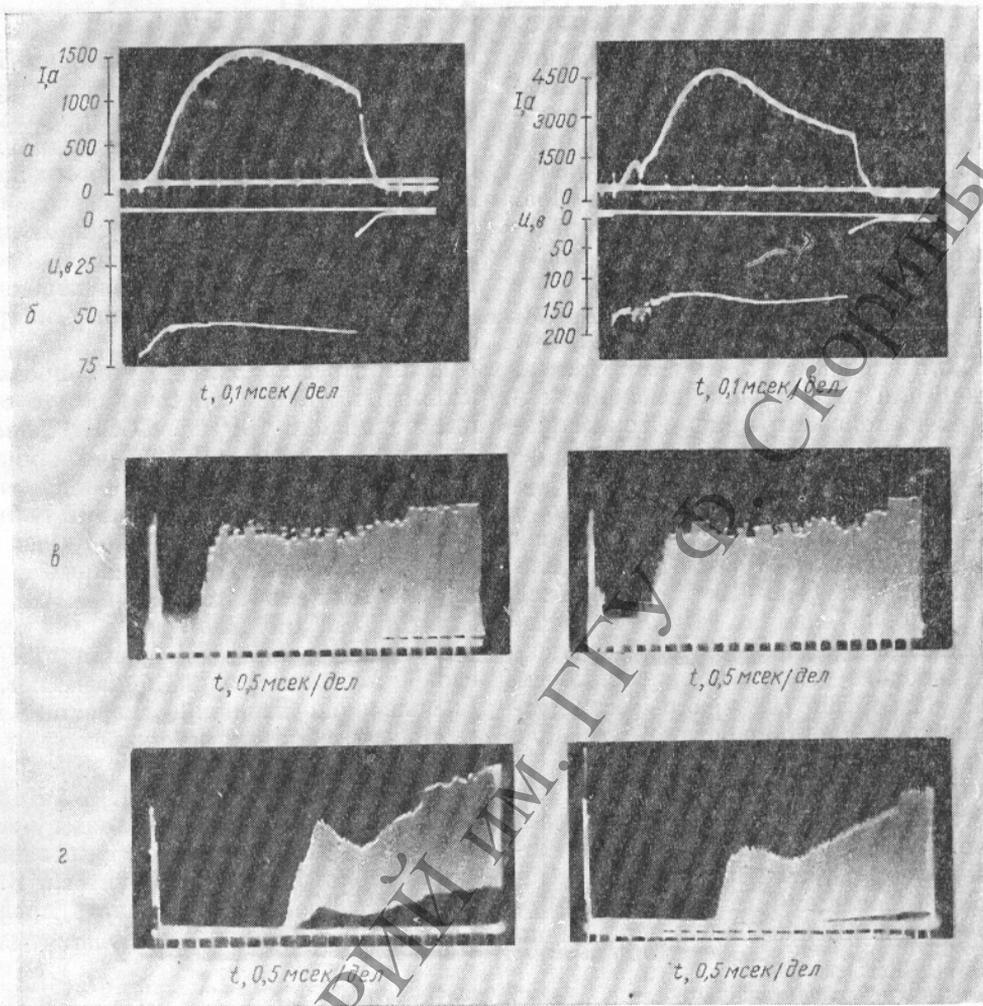


Рис. 8. Омический нагрев гелиевой плазмы при двух значениях напряжения обхода (напряженность продольного магнитного поля $9,6 \text{ кэ}$, давление гелия в камере до пробоя $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$).
 В левой колонке сверху вниз для $E = 0,125 \text{ в/см}$ даны: а — ток плазмы; б — напряжение обхода; в — запыряние сверхвысокочастотного сигнала с $\lambda = 3 \text{ см}$; г — запыряние сверхвысокочастотного сигнала с $\lambda = 3 \text{ см}$; д — свечение линий гелия в зависимости от времени. В правой колонке то же для $E = 0,32 \text{ в/см}$.

тронов. Оптические и спектроскопические измерения с применением электронно-оптического преобразователя позволяют изменять геометрию свечения плазмы во времени в обычном и монохроматическом свете, развертывать во времени участки спектров. Масс-спектроскопическим методом определяется газовый состав в камере до и после разряда.

На установке были проведены первые опыты по омическому нагреву гелиевой плазмы. На рис. 8 для давления $4,5 \cdot 10^{-4}$ мм^{рт. ст.} и двух значений напряжения на конденсаторной батарее показаны кривые тока плазмы, напряжения обхода, запирающие сверхвысокочастотных сигналов с длиной волны 3 и 0,8 см, кривые свечения нейтрального и ионизованного гелия. Для обоих случаев характерна сравнительно высокая концентрация электронов ($1,75 \cdot 10^{13}$ см⁻³) после прекращения тока плазмы. Кривые свечения линий гелия получены с помощью электронно-оптического усилителя света методом временной развертки спектра с последующей фотометрической обработкой снимков.

В свечении всех линий гелия, в том числе и линии HeII ($\lambda = 4686 \text{ \AA}$), отчетливо наблюдаются две стадии. Первая стадия интенсивного свечения заканчивается к моменту исчезновения тока плазмы. Затем снова возникает довольно интенсивное и длительное свечение. Это особенно ясно видно

из опытов с напряжением обхода 0,125 в/см. При увеличении напряжения обхода до 0,32 в/см картина в общих чертах сохраняется с той лишь разницей, что как во время протекания тока, так и после его прекращения существенный вклад в свечение плазмы вносит ионизованный гелий (линии нейтрального гелия заметно ослабевают). Это свидетельствует о повышении электронной температуры при увеличении напряжения обхода.

Если предположить, что проводимость плазмы постоянна по сечению, то ее значение порядка $6 \cdot 10^{14}$ ед. CGSE. Температура электронов, оцененная из проводимости, составляет 14 эв, а определенная из отношения интенсивностей свечения линий гелия 40 эв.

Если предположить, что концентрация плазмы уменьшается по экспоненте, то средняя величина постоянной времени распада будет равна 0,5 мсек.

Предварительные измерения при различных давлениях гелия показывают, что с уменьшением давления возрастает влияние винтовых обмоток на характер развития разряда.

Авторы признательны Л. В. Кораблеву, А. И. Морозову, Л. С. Соловьеву за полезные обсуждения при конструировании установки и благодарят А. В. Титова, В. А. Филатову за участие в ее конструировании.

Поступила в Редакцию 17/IV 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спитцер. Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Избр. докл. иностранных ученых. Т. 1. М., Атомиздат, 1959, стр. 505.
2. Джонсон и др. Там же, стр. 193.
3. А. И. Морозов, Л. С. Соловьев. «Докл. АН СССР», 128, № 3, 506 (1959).
4. А. И. Морозов, Л. С. Соловьев. «Ж. техн. физ.», XXX, вып. 3, 271 (1960).
5. Л. В. Кораблев, А. И. Морозов, Л. С. Соловьев. Там же, XXXI, вып. 10, 1153 (1961).
6. И. М. Гельфанд и др. Там же, XXXI, вып. 10, 1164 (1961).
7. В. Ф. Алексин. Там же, XXXI, вып. 11, 1284 (1961).

