

мораживания примесей (имеющих относительно высокую температуру конденсации) в ловушке, охлаждаемой жидким азотом. Методика определения количества растворенных инертных газов принципиально не отличалась от описанной выше. Растворимость газов была определена для сплава, находящегося при 300° С. Давление газов над сплавом поддерживалось равным 1 атм. Результаты определения и опубликованные данные для различных щелочных металлов [3] представлены на рис. 5. Отмечается соответствие данных по растворимости гелия в чистом калии после экстраполяции в область температур 300° С. Примечательно, что растворимость газов, сильно различающихся физическими свойствами, размерами молекул, атомным весом и т. п., изменяется не более чем в 10 раз, т. е. растворимость инертных газов в основном определяется природой растворителя, а не растворяемых газов.

Заметим также, что объемная концентрация растворенных инертных газов достигает 0,1 об. %. Скорость поглощения инертных га-

зов значительно замедлена по сравнению с поглощением водорода.

Точность полученных данных по растворимости водорода, азота, аргона и гелия в сплаве зависит от величины растворимости. Она достаточно велика для водорода и низка для инертных газов. Расчеты показывают, что максимальную относительную погрешность единичного определения концентрации растворенного водорода можно принять равной 10%, а в случае растворенных инертных газов 50—100%.

Поступила в Редакцию 24/IX 1968 г.
В окончательной редакции 23/I 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Compere, J. Savolainen. Nucl. Sci. and Eng., 28, 325 (1967).
2. D. M. C. Clute, G. Halsey. J. Phys. Chem., 69, 3542 (1965).
3. R. Blackburn. J. Inst. Metals, 94, No. 12, 159 (1966).

Экспериментальная термоядерная установка «Ураган»

В. Ф. АЛЕКСИН, О. В. БИРЮКОВ, А. В. ГЕОРГИЕВСКИЙ, Л. Х. КИТАЕВСКИЙ, Е. Г. КОМАР, А. С. ЛОГИНОВ, И. Ф. МАЛЫШЕВ, Н. А. МОНОСЗОН, А. В. ПОПОВИЧ, Б. В. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ, Г. Л. САКСАГАНСКИЙ, **К. Д. СИНЕЛЬНИКОВ**, Ю. А. СОКОЛОВ, В. А. СУПРУНЕНКО, В. Т. ТОЛОК, Г. Ф. ЧУРАКОВ, Л. А. ШАБЕЛЬНИКОВ

УДК 621.039.623

В настоящее время во всех странах развивается широкая программа стеллараторных исследований [1—6]. Анализ различных магнитных конфигураций показывает необходимость создания магнитных систем с большим «широм» и «магнитной ямой» [7—10]. Экспериментально показано, что величина шира, угла вращательного преобразования и глубина магнитной ямы влияют на время жизни плазмы [1—5].

Эксперименты подтверждают [11] возможность создания магнитных поверхностей в стеллараторе. В настоящее время имеется достаточно сведений по одночастичному удержанию.

Однако в рамках существующих теорий нельзя объяснить полностью аномально большие потери плазмы при удержании в стеллараторе. Поэтому актуальной задачей является окончательное выяснение причин аномальной диффузии в стеллараторе, а также влияния шира и магнитной ямы на удержание горячей и плотной плазмы. Эти вопросы и предполагается изучить на стеллараторе «Ураган»

(рис. 1), основная особенность которого — значительная (порядка 0,02 и 0,1) величина шира при высоком уровне напряженности магнитного поля H_0 (35 и 10 кэ соответственно).

Сооружение стелларатора «Ураган» было начато по предложению И. В. Курчатова и закончено в 1967 г. Физическое обоснование и техническое задание на разработку и сооружение комплекса были разработаны в Физико-техническом институте АН УССР под руководством К. Д. Синельникова, принимавшего активное участие в решении теоретических и технических вопросов. В разработке проекта и в сооружении комплекса принимали участие многие организации страны: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, электротехническое объединение «Электросила», Харьковский политехнический институт им. В. И. Ленина, Электромеханический завод и НИИЭлектроаппарат в Харькове, а также другие организации и предприятия страны.

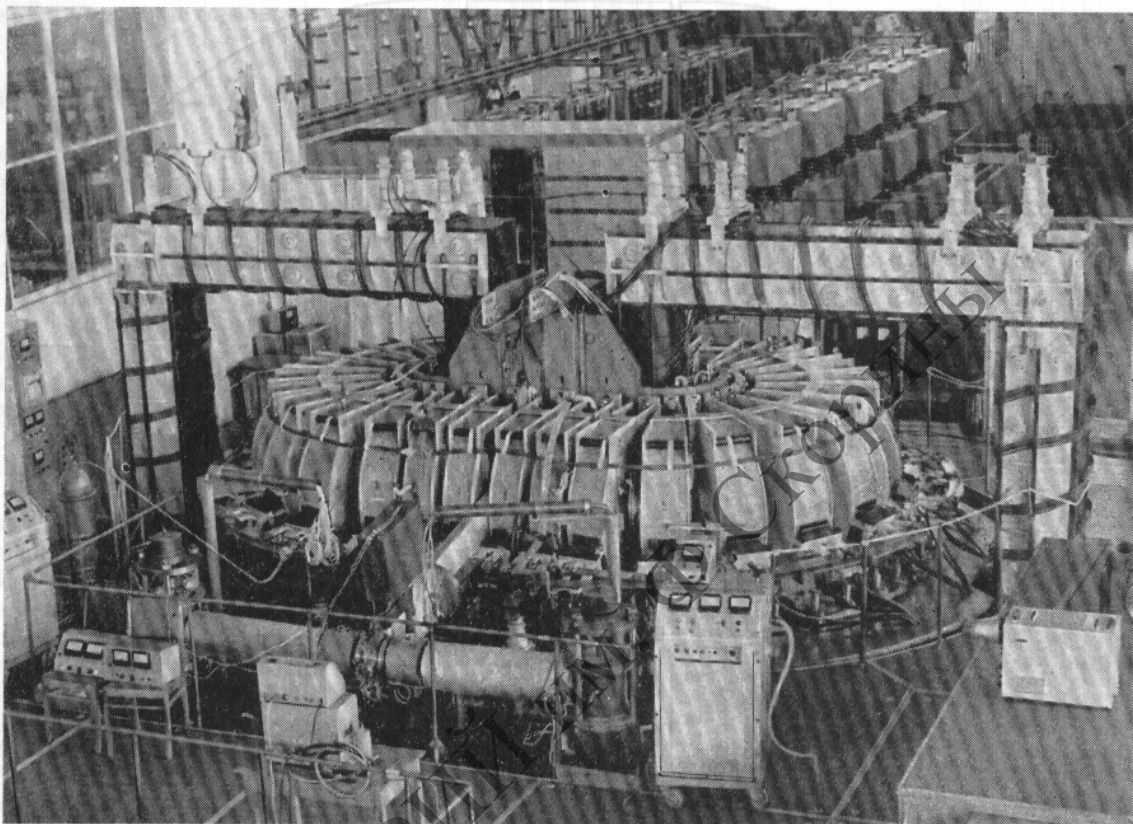


Рис. 1. Общий вид установки.

Значительный объем работ по разработке, изготовлению и наладке систем и узлов комплекса «Ураган» проведен в ФТИ АН УССР.

Ниже приводятся основные характеристики установки «Ураган».

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Стелларатор «Ураган» (рис. 2) выполнен в форме рейстрекса, что позволяет применять различные методы нагрева и диагностики плазмы. На установке применено трехзаходное винтовое поле с большой величиной перекрещенности силовых линий (шира).

Вакуумная камера ловушки состоит из двух полуторов со средним радиусом $R = 1100$ мм и двух прямолинейных участков длиной 1725 мм каждый, внутренний диаметр камеры 200 мм. Снаружи камеры на тороидальных участках расположены две винтовые обмотки с цилиндрическими катушками продольного маг-

нитного поля, расставленные равномерно вдоль установки. Максимальная величина напряженности магнитного поля 10 кэ в постоянном режиме и 35 кэ в импульсном с длительностью однородной части импульса 1 сек. В «Урагане» используются три обмотки: продольного магнитного поля, винтовая и поперечного магнитного поля.

Обмотка продольного магнитного поля

Обмотка продольного магнитного поля состоит из 30 катушек, установленных с шагом 345 мм вдоль оси рейстрекса (см. рис. 2). На тороидальных участках установлено по девять тороидальных скошенных катушек, а на прямолинейных — по четыре круглых цилиндрических. Между тороидальными и прямолинейными участками расположены четыре стыковых катушки. Каждая катушка состоит из двух двухслойных секций, причем катушки торо-

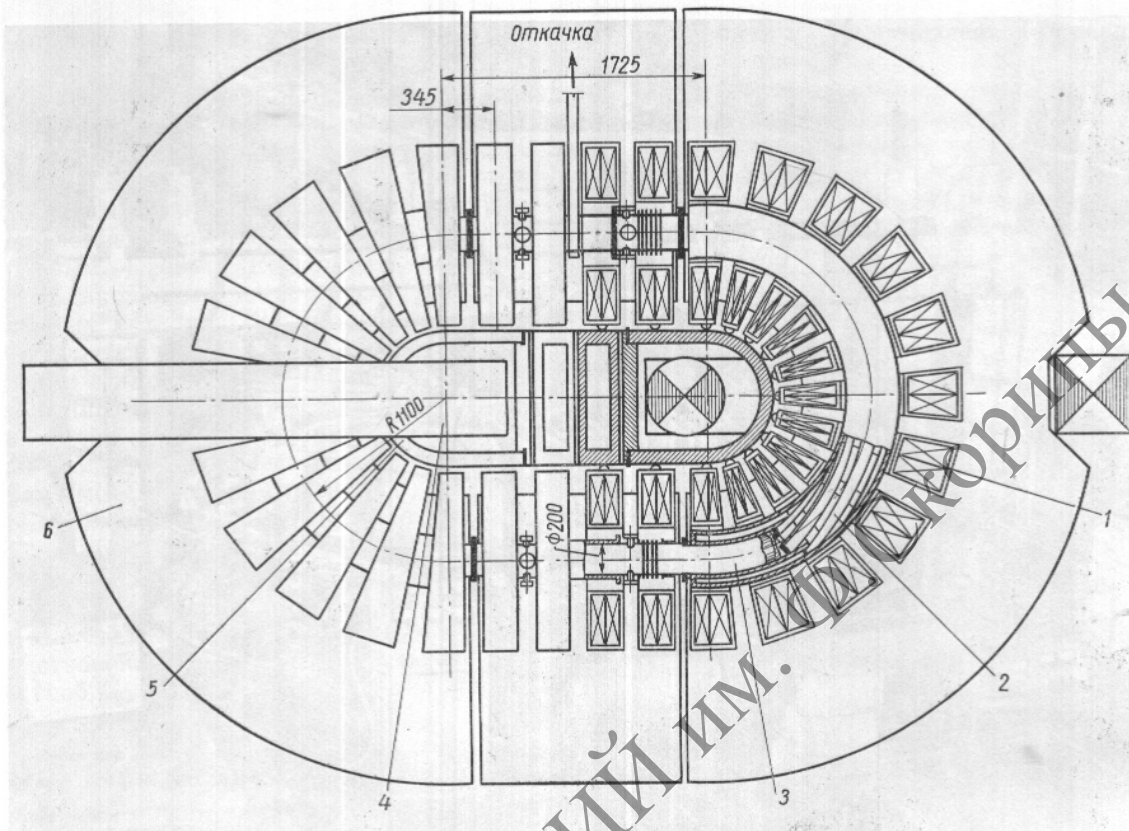


Рис. 2. Схема установки:

1 — катушки продольного поля; 2 — винтовая обмотка с цилиндрическими сердечниками; 3 — вакуумная камера; 4 — трансформаторы омического нагрева; 5 — опорная ферма; 6 — подставка.

идальных участков собраны из клинообразных секций, что обуславливает повышение коэффициента заполнения обмотки медью, уменьшение мощности источника электропитания, уменьшение нагрева обмоток, улучшение однородности магнитного поля.

Секции тороидальных участков намотаны медной шиной сечением 17×70 мм с внутренним отверстием диаметром 11 мм, секции прямоугольных участков — шиной сечением 17×45 мм с отверстием диаметром 11 мм. По внутренним каналам шины циркулирует дистиллированная вода. Каждая секция состоит из 33 витков. Внутренний и наружный диаметры катушек по меди равны 484 ± 8 и 1140 ± 8 мм соответственно. Витковая изоляция суммарной толщины 1,2 мм выполнена из стеклотенты, пропитанной эпоксидным компаундом, между секциями проложена изоляция, а секции отделены от корпуса катушки корпусной изоля-

цией, рассчитанной на напряжение 1500 в. Для обеспечения большей механической и электрической прочности катушки секции, уложенные внутри корпуса, залиты под вакуумом эпоксидным компаундом. Корпуса катушек изготовлены из маломангнитной стали. Каждая катушка имеет механизм для радиального и осевого перемещения и вращения вокруг вертикальной оси. Для компенсации паразитной составляющей магнитного поля, вызванной наклоном переходных витков при намотке секций, каждая катушка укомплектована двумя секциями с разными направлениями намотки; шины электрических выводов взаимно скомпенсированы.

Обмотка продольного магнитного поля обеспечивает получение заданного магнитного поля напряженностью 35 кэ при номинальном токе 14,5 ка. При этом за импульс обмотка нагревается до 80°C . Тепло снимается водой

в течение 2 мин, расход воды составляет 50 м³/ч.

Винтовая обмотка

Стелларатор «Ураган» оснащен двумя комплектами трехзаходных винтовых обмоток, один из которых рассчитан для работы в больших (~35 кэ) магнитных полях (рис. 3).

На силовом каркасе расположено шесть полюсов, в каждом из которых уложено по шесть медных проводников сечением 11 × 14 × 33 мм с отверстием для протока воды диаметром 6 мм. Между полюсами имеются стеклотекстолитовые клиновидные разделительные вставки.

Межвитковая и корпусная изоляции выполнены из стеклоленты, пропитанной эпоксидным компаундом. Винтовую обмотку охватывает каркас в виде массивных колец. Между вакуумной камерой и внутренним каркасом проложена теплоизоляция. Винтовая обмотка представляет собой спираль с шагом 2467 мм, расположенную на тороидальных участках установки.

Для преобразования формы магнитных поверхностей из треугольной в круглую на прямых участках по краям обмотки расположены цилиндрители, выполненные вместе с винтовой обмоткой. Угол наклона проводников цилиндрителя к продольной оси α_2 выбран таким, чтобы $\text{tg } \alpha_2 = 2 \text{tg } \alpha_1$, где α_1 — угол наклона проводников винтовой обмотки ($\alpha_1 = 20^\circ$). Лобовые участки винтовой обмотки скомпенсированы.

Так как число периодов поля установки равно восьми, расчетный угол преобразования вращения с учетом разрушения поверхностей вследствие тороидальности $i_0 \approx 230^\circ$ и расчетная величина шира $S \leq 0,05$, где $S = (di_0/dr) r_0^2 L_0^{-1}$ (общая длина установки $L_0 = 10,35$ м, максимальный радиус последней замкнутой магнитной поверхности на прямолинейных участках $r_0 = 52$ мм).

При протекании максимального полного тока в полюсе $I_B = 180$ ка сепаратриса вписывается в диаметр вакуумной камеры при $H_0 = 24$ кэ (при этом $\epsilon = h/H_0 \approx 2,1$, где h — амплитуда основной гармоники винтового поля).

Силовые каркасы обмотки рассчитаны на восприятие пондеромоторных сил, соответствующих $I_B = 180$ ка и $H_0 = 40$ кэ. За время импульса обмотка нагревается до 90° С. Тепло снимается дистиллированной водой за 2 мин, при общем расходе воды 25 м³/ч.

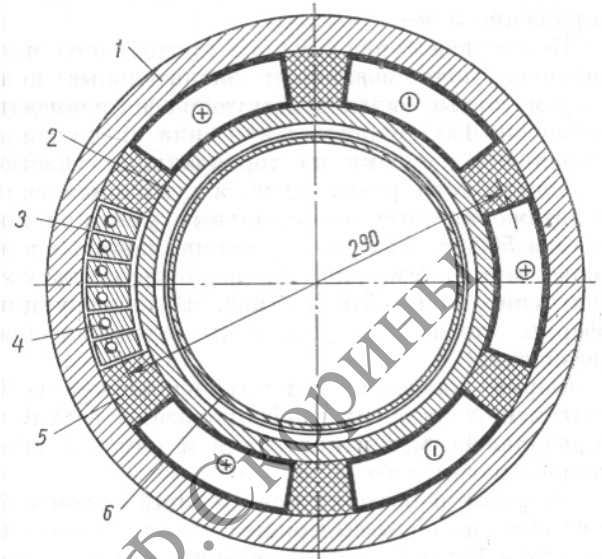


Рис. 3. Сечение винтовой обмотки:

1 — наружный силовой каркас; 2 — внутренний силовой каркас; 3 — межвитковая изоляция; 4 — медная шпилька; 5 — стеклотекстолитовые вставки; 6 — вакуумная камера.

Обмотка поперечного магнитного поля

Обмотка поперечного магнитного поля, служащая для компенсации поперечной составляющей поля Земли и других паразитных магнитных полей, состоит из четырех витков, расположенных снаружи катушек вдоль всей установки.

Силовая и несущая конструкции

Катушки продольного магнитного поля укреплены на подставке (см. рис. 2), состоящей из четырех независимых частей — двух криволинейных и двух прямолинейных. Прямолинейные участки подставки, выполненные на тележках, можно выкатывать, освобождая при монтаже доступ к тороидальным участкам вакуумной камеры. Криволинейные участки подставки с установленными на них катушками можно перемещать вдоль прямолинейных участков установки при помощи домкратов. Подставка несет нагрузку только от веса магнитной и вакуумной систем. На ней установлены механизмы азимутального перемещения катушек и домкраты для установки их по высоте. Все четыре участка подставки изолированы друг

от друга; изоляция рассчитана на рабочее напряжение 5 кВ.

Вследствие тороидального продольного магнитного поля возникают значительные ponderomotorные силы, действующие на элементы обмотки. Так, максимальная сила притяжения отдельной катушки на тороидальном участке к центру тора равна 80 т, а суммарная сила притяжения двух тороидальных участков порядка 500 т. Эти силы воспринимаются опорной фермой (см. рис. 2), в которую катушки упираются «башмаками». В конструкции фермы также предусмотрены электрические развязки.

Ферма является базовым элементом всей магнитной системы: к ней привязаны катушки продольного магнитного поля и обмотка винтового магнитного поля.

Несущая и опорная конструкции магнитной системы способны выдерживать электродинамические нагрузки, соответствующие продольному магнитному полю 40 кэ. В случае нарушения однородности продольного магнитного поля в аварийном режиме могут возникнуть значительные силы, действующие в продольном направлении между катушками, что вызовет их взаимное перемещение. Поэтому между катушками установлены распорные клинья. Кроме того, разработана система защиты, обеспечивающая уменьшение на порядок величины аварийных сил [12].

Все металлические элементы конструкции установки изготовлены из маломагнитной стали 1Х18Н9Т. Проводился контроль магнитной проницаемости и отбраковка материалов с магнитной проницаемостью $\mu > 1,05$.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ

Охлаждение обмоток магнитного поля осуществляется по замкнутому циклу. Рабочее давление охлаждающей воды на входе составляет 10 атм. Для охлаждения используется обессоленная катионированная вода с высокими диэлектрическими свойствами ($\rho \leq 10^6$ ом·см). Чтобы избежать растворения в воде углекислого газа из атмосферы и образования кислот, вызывающих коррозию трубопровода, вода в системе находится под давлением азота. Для поддержания диэлектрических свойств воды часть ее проходит через катионитовый фильтр. Во всех ветвях охлаждения установлены струйные реле с термодатчиками для контроля, аварийной сигнализации и блокировки.

Производительность первичного контура теплообменной установки 75 м³/ч, вторичного 500 м³/ч.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Система электропитания установки «Ураган» обеспечивает получение в рабочем объеме продольного магнитного поля напряженностью до 35 кэ и соответствующего ему винтового поля. Импульс тока имеет однородную часть продолжительностью ~ 1 сек, стабилизированную по амплитуде с точностью до 0,25%. Длительность фронта импульса по условиям нагрева обмоток не более 2 сек для продольного магнитного поля при максимальном токе 14,5 кА и не более 1 сек для винтового поля при максимальном токе 28 кА. Частота чередования рабочих импульсов — до 1 импульса в 1 мин.

В качестве источника питания используются три преобразовательных агрегата с генераторами постоянного тока суммарной мощностью 75 Мвт в импульсе. В состав агрегата входят два генератора типа П22-33-17к мощностью 2745 кВт при напряжении 785 в, приводной асинхронный двигатель типа АТ19А15-12 мощностью 3600 кВт при напряжении 6000 в и максимальном числе оборотов 500 об/мин, два маховика с маховым моментом по 375 тм² каждый.

Выбранная схема позволяет питать катушки продольного поля от одного, двух, трех и четырех генераторов. Винтовая обмотка питается от двух генераторов, включенных параллельно. Управление агрегатами независимое. Агрегаты могут работать как в импульсном, так и в постоянном режиме.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Для обеспечения условий проведения плазменного эксперимента в рабочей камере необходимо поддерживать сверхвысокий вакуум. Вакуумная камера установки представляет собой рейстрек с внутренним диаметром 200 мм и полезным объемом 325 л. Давление остаточных газов $1 \cdot 10^{-9}$ торр поддерживается в камере с помощью двух сверхвысоковакуумных парогутных агрегатов РВА-1-3 производительностью 300 л/сек. Тороидальные участки камеры и часть прямолинейных изготовлены из нержавеющей немагнитного сплава ЭП-125. На одном из прямолинейных участков установлена керамическая камера длиной 500 мм для контура ВЧ-нагрева плазмы.

На вакуумной камере установлены четыре группы диагностических окон. Для компенсации тепловых расширений и удобства монтажа тороидальные участки соединены с прямолинейными через сильфоны.

Все уплотнения на сверхвысоковакуумных участках системы металлические с медными прокладками.

Для предварительного обезгаживания стенок камеры производится вакуумная тренировка с прогревом всех элементов до температуры 450°C . Нагрев криволинейных участков и сильфонов осуществляется прямым пропуском постоянного тока, при этом сильфоны шунтируются. Нагрев керамического откачного участка, блоков диагностических окон и всех вспомогательных элементов осуществляется накладными нагревателями. Для уменьшения газовой выделенности после механической обработки и сварки все элементы вакуумной системы электрополировались и подвергались ультразвуковой очистке.

Перед монтажом на установку вакуумная система подвергалась многократной вакуумной тренировке на стенде в течение 150 ч, благодаря чему газовыделение стало порядка 10^{-18} л·торр/сек·см².

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

Система предварительной ионизации на установке «Ураган» предназначена для облегчения пробоя рабочего газа в вакуумной камере. Эта система состоит из импульсного генератора, модулятора с накопительным устройством и запитывающей системой и измерительных приборов. Генератор работает в диапазоне частот 70—200 кГц, длительность импульса может изменяться от $1 \cdot 10^{-4}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ сек, мощность в импульсе 360 квт.

Система омического нагрева служит для нагрева плазмы в режиме постоянного напряжения и для тренировки вакуумной камеры током разряда. Принципом действия системы является индуцирование замкнутого газового разряда в камере стелларатора и поддержание постоянного напряжения на обходе плазменного витка в течение $3 \cdot 10^{-3}$ сек. В режиме нагрева плазмы система может создавать напряженность электрического поля $E = 0,2$ в/см с временем нарастания менее 50 мксек и временем спада, не превышающим 20% длительности импульса. Система имеет

два трансформатора омического нагрева (см. рис. 2) с суммарным активным сечением магнитопровода 2800 см². Обмотка выполнена из 20 витков высоковольтного кабеля, рассчитанного на рабочее напряжение 50 кв.

Нагрев плазмы ионно-циклотронными волнами осуществляется с помощью мощного ВЧ-генератора. Особенность генератора — работа импульсами большой длительности [приведенный импульс 5 мсек при частоте повторения шесть раз в 1 мин в широком диапазоне частот (6—30 Мгц) при мощности 2 Мвт в нагрузку].

Оборудование генератора «Янтарь» состоит из тракта высокой частоты, анодного импульсного генератора, сеточных манипуляторов, системы электропитания, измерительных устройств и эквивалентной нагрузки.

На стеллараторе предусмотрена система для инжекции плазменных сгустков.

Для обеспечения широкой программы физических исследований в комплекс стелларатора «Ураган» входит система диагностики, состоящая из разнообразных измерительных устройств, помещаемых непосредственно внутри разрядной камеры (электрические и магнитные зонды, микроволновые рупорные антенны, микроволновой интерферометр Фабри — Перо), и оптической аппаратуры, перекрывающей широкий диапазон спектра электромагнитного излучения (от вакуумного ультрафиолетового до субмиллиметрового). Эта аппаратура размещена в непосредственной близости от установки в экранированном диагностическом помещении.

В систему диагностики также входит кибернетическая система извлечения информации, служащая для автоматической обработки экспериментальных данных по разомкнутой схеме объект — машина — оператор.

Строгая последовательность работы комплекса в заданных режимах обеспечивается системой автоматической синхронизации, в основу которой положен цифровой принцип задания временных интервалов. Система синхронизации позволяет управлять одновременно 40 объектами с обеспечением временного распределения прохождения сигналов на входах объектов.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам организаций, принимавших участие в выполнении работ, связанных с сооружением комплекса «Ураган».

Поступила в Редакцию 28/III 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Бережецкий и др. Доклад CN-24/Д-5, представленный на Третью конференцию по исследованиям в области физики плазмы и управляемых термоядерных реакций (Новосибирск, 1968).
2. В. И. Бочаров и др. Там же, доклад GN-24/Д-7.
3. J. Adlam et al. Там же, доклад CN-24/Д-8.
4. D. Grove et al. Там же, доклад CN-24/Д-2.
5. E. Berkl et al. Там же, доклад CN-24/Д-4.
6. П. Я. Бурченко и др. Там же, доклад CN-24/Д-6.
7. Л. С. Соловьев, В. Д. Шафранов. В сб. «Вопросы теории плазмы». Под ред. М. А. Леонтовича. Вып. 5. М., Атомиздат, 1967, стр. 3.
8. V. Aleksin, V. Sebko. Nucl. Fusion, 8, 145 (1968).
9. H. Furth, M. Rosenbluth. Phys. Fluids, 7, 764 (1964).
10. C. Gourdon et al. Bull. Amer. Phys. Soc., 13, 281 (1968).
11. A. Gibson et al. См. [1], доклад CN-24/Д-1.
12. П. Я. Бурченко и др. «Атомная энергия», 23, 135 (1967).

Десорбция газов при облучении ионами H^+ металлов и систем металл—металлическая пленка

Н. П. КАТРИЧ, Л. Н. КАЛАШНИКОВ, Н. А. КОСИК

УДК 531.1.04

В последние годы накоплен значительный экспериментальный материал о внедрении быстрых ионов водорода, даны соответствующие рекомендации о выборе металлов для термоядерных устройств [1, 2]. Так, титан, тантал, цирконий, образующие с водородом прочные химические связи, при коэффициенте внедрения, близком к единице, имеют практически неограниченную емкость для внедренного водорода. Однако десорбция растворенных газов под действием быстрых частиц и технология получения достаточно чистых поверхностей пока еще мало изучены [2].

Учитывая, что при столкновении с металлами быстрые ионы водорода проникают преимущественно на значительную глубину [3] и коэффициент распыления металлов невелик ($\alpha \approx 0,01$), представляется возможным получить такие комбинации металла и металлической пленки, для которых коэффициент внедрения будет достаточно высоким, а коэффициент десорбции растворенных газов низким. Согласно имеющимся экспериментальным данным для этого необходимо выполнение следующих условий: 1) облучаемый металл (подложка) должен характеризоваться высоким коэффициентом внедрения и высокой емкостью по внедряемому водороду (например, титан, тантал, цирконий); 2) металлические пленки должны быть из металлов, слабо растворяющих газы (никель, платина, золото); 3) толщина пленок должна быть меньше глубины пробега ионов водорода.

В настоящей работе излагаются результаты исследования десорбции газов из титана и нержавеющей стали и систем: титан — никелевая пленка, нержавеющая сталь — титан,

никелевая пленка, нержавеющая сталь — нержавеющая сталь (пленка), приведены результаты исследования зависимости коэффициента внедрения ионов водорода от энергии бомбардируемых частиц для титана, никеля и титана, покрытого никелевой пленкой разной толщины.

Метод исследования

Установка, на которой проводили эксперименты, описана в работе [1]. Методика измерений десорбции заключалась в следующем. В камеру измерений (рис. 1) помещали изготовленный из нержавеющей стали полый держатель, к которому посредством уплотнения из медной фольги вакуумно плотно прижималась предварительно механически полированная и промытая в бензине и спирте мишень 1. Затем камеру измерений вместе с мишенью прогревали в течение 3—4 ч при температуре $600^\circ K$. Откачку камеры во время прогрева производили диффузионным насосом с водяной и азотной защитой и водородным конденсационным насосом, расположенным ниже прогреваемого клапана 3.

После остывания камеры измерений до комнатной температуры на мишень наносили металлические пленки. Испаритель из металлической фольги размерами $0,1 \times 5 \times 50$ мм, смонтированный на фланце-держателе мишени, после предварительного обезгаживания прогревом при $T \approx 1000^\circ K$ нагревался до температуры, близкой к температуре плавления. Напыление производили в течение 3—5 мин. Затем спустя 5—10 мин после напыления пленки клапан 3 перекрывали и мишень бомбардировалась пучком ионов H^+ .