

Внедрение ионов водорода H^+ в поверхность нержавеющей стали

Е. С. Боровик, Н. П. Катрич, Г. Т. Николаев

Описывается установка для проведения опытов по определению коэффициента внедрения. Применение водородных и гелиевых конденсационных насосов обеспечивает ультравысокий вакуум в установке. Определен коэффициент внедрения ионов водорода H^+ при энергии 35 кэв. Коэффициент внедрения в области плотностей внедренных ионов 10^{18} — $2 \cdot 10^{19}$ равен 0,93 и не зависит от числа внедренных ионов.

В последнее время процесс внедрения газовых ионов в различные материалы интересует многих физиков, занимающихся исследованием горячей плазмы. Этот интерес вызван тем, что в магнитных ловушках с инжекцией быстрых частиц поддержание сверхвысокого вакуума существенно зависит от величины коэффициента внедрения. До настоящего времени измерения коэффициента внедрения были проведены в нескольких работах: для ионов He^+ с энергией 150—2600 эв [1], для ионов He^+ и D^+ с энергией 7—25 кэв [2]. Некоторые количественные характеристики процесса внедрения получены при исследованиях десорбции предварительно внедренных частиц, вызванной ионной бомбардировкой [3—5], и в связи с разработкой методики приготовления твердых газовых мишеней и разделением изотопов [6, 7].

Однако ни одна из этих работ не проводилась в вакуумных условиях, обеспечивающих достаточную чистоту бомбардируемой мишени. В настоящей работе приведены результаты первых измерений коэффициента внедрения ионов водорода H^+ с энергией 35 кэв в мишень из нержавеющей стали 1X18H9T. Вакуумные условия, в которых проводились измерения, обеспечивали достаточную чистоту поверхности бомбардируемой мишени.

Описание установки

Внешний вид установки, на которой проводились измерения, показан на рис. 1. Схема

основных элементов установки, расположенных по направлению движения пучка ионов H^+ , представлена на рис. 2. Пучок ионов водорода, получаемый при помощи высокочастотного ионного источника 1, фокусировался электростатической линзой 2, ускорялся в ускорительной трубке 3 до 35 кэв и через первую коллимирующую систему 8, 9 попадал в камеру магнитного анализатора 11. В этой камере ионы водорода H^+ разворачивались на 60° и через вторую коллимирующую систему 15, 17 попадали в камеру измерений 18 на мишень 21. Высокочастотный ионный источник с электростатической линзой позволял получать хорошо сфокусированный пучок ионов H^+ до 120 мкА (плотность тока на мишень до $160 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$). Расход водорода в высокочастотном ионном источнике, определяющийся геометрией вытягивающего электрода, не превышал $1,5 \text{ см}^3/\text{ч}$. Такой расход водорода в высокочастотном ионном источнике по сравнению с другими типами ионных источников считается небольшим. Однако в установках, где требуется получить и поддержать вакуум порядка $1 \cdot 10^{-7} \text{ н/м}^2$, такие газовые нагрузки являются очень большими, так как необходимые при этом скорости откачки должны превышать $3 \cdot 10^5 \text{ дм}^3/\text{сек}$.

Скорости откачки можно сократить до нескольких десятков тысяч кубических дециметров в секунду, если применить дифференциальный метод откачки. Однако и такие скорости откачки очень трудно обеспечить диффузионными насосами, не говоря уже о загрязнении реципиента. В связи с этим нами был применен многоступенчатый конденсационный метод откачки [8], обеспечивающий необходимую скорость откачки, высокую стабильность вакуума и достаточную чистоту мишени. На рис. 2 показано размещение гелиевых конденсацион-

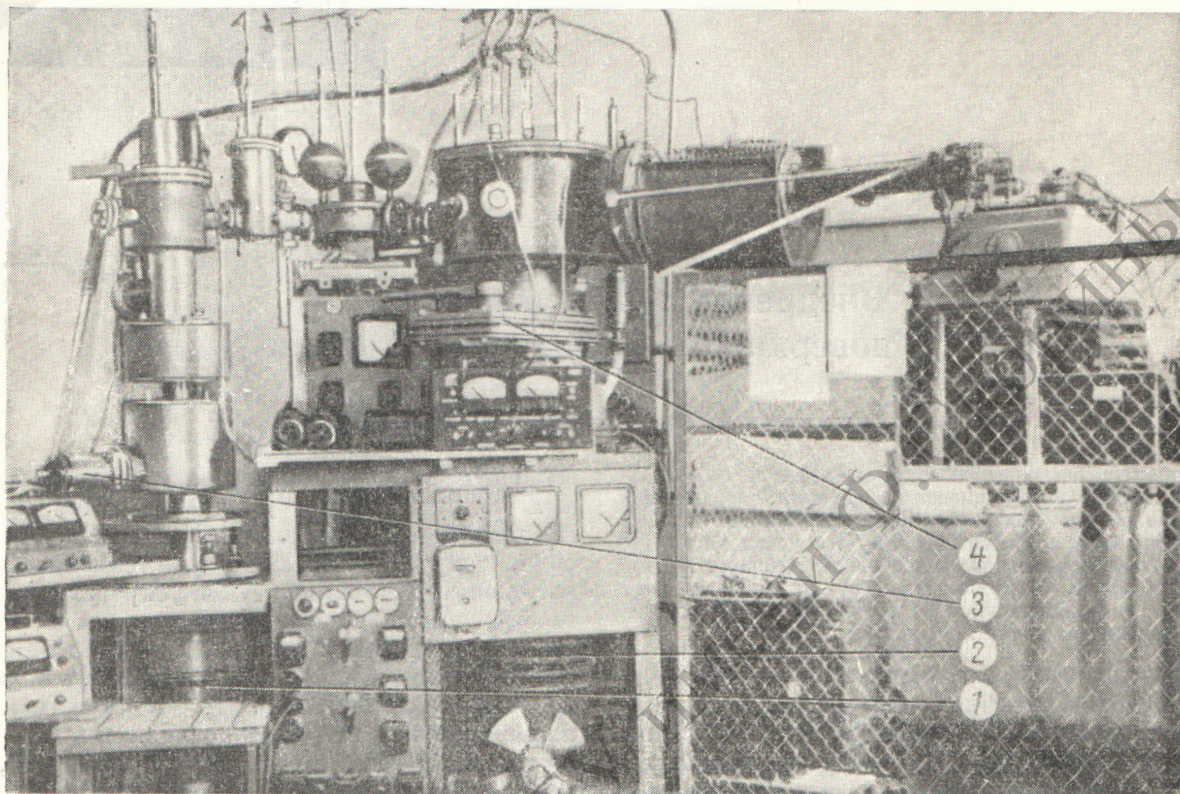


Рис. 1. Внешний вид установки:

1, 2 — диффузионные паромасляные насосы М-500 и М-2500 соответственно; 3, 4 — прогреваемый и непрогреваемый вакуумные клапаны соответственно.

ных насосов (ГКН) 10, 14, 16. Каждый насос представляет собой медный сосуд емкостью $0,5 \text{ дм}^3$ с расчетной скоростью откачки $1,2 \times 10^4 \text{ дм}^3/\text{сек}$. Предельный вакуум ГКН, определяющийся упругостью насыщающих паров водорода, становится достаточно высоким, если понизить температуру их поверхности ниже температуры кипения жидкого гелия. Необходимое уменьшение температуры поверхности легко достигается откачкой паров над жидким гелием. В наших насосах пары откачивались примерно до 18 н/м^2 , что соответствует предельному вакууму $\sim 1 \cdot 10^{-10} \text{ н/м}^2$ [9]. Продолжительность работы ГКН определяется тепловыми нагрузками и количеством залитого гелия. Залив жидкого гелия в конденсационные насосы обычным методом через переливалки под давлением не дал хороших результатов. Количество залитого гелия было незначительным и соответственно малой была продолжительность их работы.

В связи с этим были изготовлены переливалки специальной конструкции, позволяющие про-

изводить залив при непрерывной подкачке паров над жидким гелием. Это обеспечило надежность залива ГКН, в результате чего значительно повысилась продолжительность их работы (8—10 ч).

В нашей установке помимо ГКН используются два водородных конденсационных насоса 7, 20 с емкостью $0,5 \text{ дм}^3$ каждый и два масляных диффузионных насоса М-500 и М-2500 (см. рис. 1). Насос М-2500 предназначен для

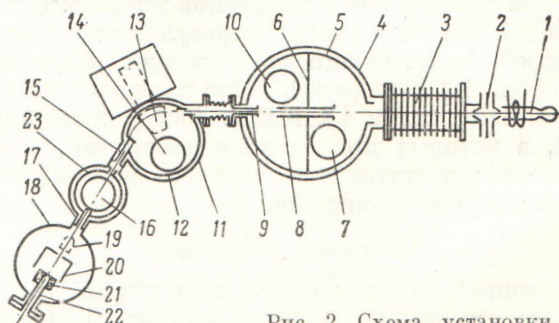


Рис. 2. Схема установки.

тренировки вакуумной системы и предварительной откачки водорода, поступающего из высокочастотного ионного источника в камеру 4 во время эксперимента. Насос М-500 предназначен для тренировки камеры измерений 18. Оба насоса имеют водяную и азотную защиту и в случае необходимости могут быть отделены от остальной части установки при помощи клапанов, показанных на рис. 1. В нижней части камеры 4 помещена азотная жалюзийная ловушка с припаянным к ней медным экраном 5, разделенным на две части перегородкой 6. Правая часть экрана представляет собой камеру, сообщающуюся с диффузионным насосом через жалюзи азотной ловушки. Внутри нее помещен водородный конденсационный насос 7, предназначенный для откачки фоновых газов. Левая половина азотного экрана представляет собой камеру, закрытую со всех сторон и сообщающуюся с правой половиной азотного экрана и с камерой магнитного анализатора посредством коллимирующих трубок 8, 9. Коллимирующая трубка 8 (диаметр 14 и длина 250 мм) с входным отверстием диаметром 12 мм впаяна в перегородку азотного экрана. Коллимирующая трубка 9 (диаметр 11 и длина 150 мм) с входным отверстием диаметром 9 мм соединяет левую половину азотного экрана с камерой магнитного анализатора. Такая геометрия коллимирующей системы обеспечивает небольшую проводимость между камерами и мало снижает ток пучка ионов водорода. Внутри левой части экрана расположен ГКН 10 со скоростью откачки водорода $1,2 \cdot 10^1 \text{ дм}^3/\text{сек}$. Таким образом, в сравнительно малом объеме размещены два конденсационных насоса, несущих основную нагрузку во время эксперимента, и практически полностью устранена возможность проникновения примесных газов в камеру измерений со стороны непрогреваемой части установки. Камера магнитного анализатора 11 изготовлена из нержавеющей стали 1Х18Н9Т и собрана посредством уплотнений из фторопласта. Полюсные наконечники магнита 13 находятся внутри камеры, остальная часть магнита расположена снаружи. Камера магнитного анализатора имеет азотный экран 12, внутри которого помещен ГКН 14. Ионы водорода H_2^+ , H_3^+ и быстрые нейтральные частицы, выходящие из высокочастотного ионного источника, попадая в камеру магнитного анализатора, частично внедряются в азотный экран, а невнедрившиеся частицы откачиваются гелиевым конденсационным насосом. Ионы H_1^+ из камеры магнитного анализатора через

коллимирующую трубку 15, отверстие в азотном экране 23 и трубку 17 попадают в камеру измерений на мишень. Азотный экран представляет собой цилиндрическую камеру, соединяющуюся с камерой измерений посредством трубки 17 заданной проводимости. В верхней части азотного экрана над ходом пучка размещен ГКН 16, предназначенный для откачки камеры измерений и защиты от попадания в нее водорода из камеры магнитного анализатора. Камера измерений 18 и присоединенные к ней узлы изготовлены из нержавеющей стали и собраны на медных уплотнениях, зажатых между коническими поверхностями. Такая конструкция позволяет осуществлять ее прогрев до температуры $400\text{--}450^\circ \text{C}$. Ниже камеры измерений расположен прогреваемый металлический клапан (см. рис. 1), отделяющий камеру измерений от диффузионного масляного насоса М-500.

Мишень из исследуемого материала укреплялась на медном блоке, который в свою очередь крепился на трубке-держателе 22. Открытый конец трубки-держателя позволял охлаждать мишень во время ее бомбардировки. Ток пучка ионов H_1^+ измерялся подвижным цилиндром Фарадея 19. Вакуум в камере измерений измерялся открытым ионизационным манометром типа Байярда — Альперта, помещенным внутри камеры измерений. Водородный конденсационный насос с экраном 20, окружающим мишень, предназначен для защиты мишени от попадания на нее фоновых газов.

Подготовка установки к измерениям

Камера измерений и клапан, отделяющий ее от диффузионного насоса перед началом эксперимента, прогревались в течение 3—4 ч до $\sim 400^\circ \text{C}$. Откачка установки во время прогрева осуществлялась масляными диффузионными насосами с азотными ловушками и водородным конденсационным насосом 7. К концу прогрева вакуум в камере измерений достигал $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ н/м}^2$.

После удаления нагревателей в водородный конденсационный насос 20 заливался жидкий водород. Температура камеры измерений и водородного конденсационного насоса к моменту залива оставалась еще около 400°C . Полный расход жидкого водорода при этом составлял 5 дм^3 . Одновременно с этим при помощи клапана камера измерений отсоединялась от диффузионного масляного насоса с азотной защитой. Это предохраняло камеру измерений от

проникновения в нее продуктов разложения масла и сводило к минимуму фон остаточных газов. Вакуум в камере измерений сразу же после залива водорода достигал $4 \div 5 \cdot 10^{-7}$ н/м². Залив жидкого гелия в ГКН 16 улучшал вакуум в камере измерений практически мгновенно до $1,3 \cdot 10^{-7}$ н/м², затем более медленно, так что через 1—1,5 ч составлял $6 \cdot 10^{-8}$ н/м² (5×10^{-10} торр). Однако эксперименты обычно начинались сразу же после залива жидкого гелия при вакууме $1,3 \cdot 10^{-7}$ н/м². При этом предполагалось, что основным остаточным газом в камере измерений является водород. Такое предположение вполне законно, если учесть наличие водородного конденсационного насоса в камере измерений, имеющего достаточно большую скорость откачки и способного откачивать все примесные газы, за исключением тех газов, которые трудно конденсируются при температуре 20,4° К. Процедура подготовки эксперимента обеспечивает достаточную чистоту поверхности мишени, практически полностью исключает возможность загрязнения ее после прогрева из-за адсорбции из окружающей среды.

Результаты измерений и их обсуждение

Метод измерения коэффициента внедрения заключается в следующем. Пучок ионов H_1^+ , бомбардируя мишень, внедряется в нее. Поток водорода из мишени за счет невнедрившейся части пучка и за счет водорода, диффузно выделяющегося из мишени, изменяет вакуум

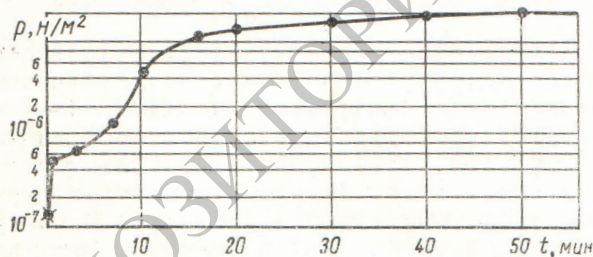


Рис. 3. Зависимость давления в камере измерений от времени.
✕ — начальное давление.

в камере измерений. Типичная кривая зависимости вакуума от времени бомбардировки мишени пучком ионов H_1^+ с энергией 35 кэ и силой тока 110 мка показана на рис. 3. Следует заметить, что изменение давления в камере измерений, вызванное пучком ионов, попадающих в камеру магнитного анализа-

тора, ничтожно мало. Давление изменяется только при бомбардировке мишени.

Зная ток пучка ионов, вакуум в камере измерений и скорость откачки водорода из камеры измерений, можно определить коэффициент внедрения

$$\eta = 1 - \frac{n(p-p_0)W}{10^5 i^+ / e},$$

где n — число частиц в 1 дм³ при нормальных условиях; p — рабочее давление, н/м²; p_0 — начальное давление, н/м²; W — скорость откачки, дм³/сек; i^+ — ток пучка ионов, а; e — заряд электрона, к; 10^5 — атмосферное давление, н/м².

В первых опытах коэффициент внедрения ионов H_1^+ , вычисленный для скорости откачки 8 дм³/сек, определяемой проводимостью трубки, был очень высок и в начале бомбардировки достигал значения, близкого единице (0,99). С ростом плотности внедренных частиц коэффициент внедрения снижался до 0,94 и затем оставался постоянным. Такой высокий коэффициент внедрения ионов был получен впервые. В связи с этим было высказано предположение, что водород дополнительно откачивается чистой поверхностью стенок камеры и водородным конденсационным насосом 20. Для проверки этого предположения были проведены измерения скорости откачки. Скорость откачки измерялась методом постоянного потока водорода через капилляр известной проводимости. Измерения показали, что чистые поверхности нержавеющей стали и меди в интервале температур от комнатной до 78° К не обладают заметной скоростью откачки.

Однако чистая поверхность водородного конденсационного насоса, изготовленного из меди, при температуре жидкого водорода 20,4° К откачивает водород. С ростом количества откачанного водорода скорость откачки быстро снижается и при концентрациях, равных примерно 0,01 монослоя, практически равна нулю. Этот эффект ранее никем не наблюдался и является несколько неожиданным для таких малых давлений. На рис. 4 приведена экспериментальная кривая 1 скорости откачки в зависимости от количества поступившего в камеру водорода. Пунктиром показана расчетная скорость откачки водорода гелиевым конденсационным насосом 16, определяемая проводимостью трубки 17 (см. рис. 2). Расхождение между экспериментальным (10 дм³/сек) и расчетным ($8 \pm 1,5$ дм³/сек) значениями скорости откачки в области $N > 10^{17}$ находится в пределах ошибки измерений.

В процессе бомбардировки в камере измерений находится атомарный водород, адсорбция которого отличается от адсорбции молекулярного водорода. В связи с этим были проведены опыты по определению количества водорода, адсорбированного во время бомбардировки при температурах 20,4 и 78° К, десорбируя его отпелением водородного насоса с экраном 20. Было установлено, что адсорбция атомарного и молекулярного водорода имеет место только при

$W, \text{дм}^3/\text{сек}$

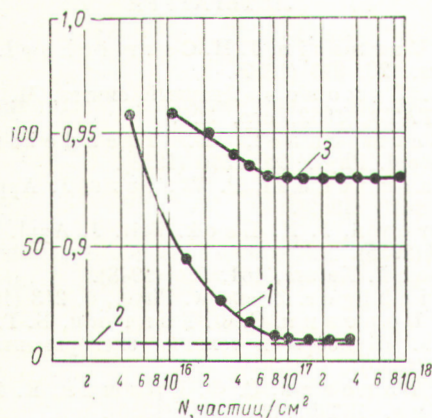


Рис. 4. Зависимость скорости откачки W и коэффициента внедрения η от количества газообразного водорода, поступившего в камеру измерений:

1 — суммарная скорость откачки водорода из камеры измерений; 2 — расчетная скорость откачки водорода гелиевым конденсационным насосом; 3 — коэффициент внедрения.

температуре меньше 30° К и практически полностью прекращается при концентрациях адсорбированного водорода, равных примерно 0,01 монослоя. Полное количество десорбированного водорода соответствует расчетному. Кроме того, эти опыты показали, что во время бомбардировки из мишени выделяется некоторое количество более тяжелых веществ (1—2% от числа падающих ионов).

Зависимость скорости откачки от количества поступившего в камеру водорода вызывает некоторые затруднения в расчете коэффициента внедрения. Действительно, чтобы определить коэффициент внедрения, необходимо знать скорость откачки. Но скорость откачки зависит от количества поступившего в камеру водорода, т. е. от коэффициента внедрения. В связи с этим для расчета η был применен метод последовательных приближений, где в нулевом приближении принималась скорость откачки, равная $10 \text{ дм}^3/\text{сек}$.

Результаты измерений коэффициента внедрения ионов H_1^+ в поверхность нержавеющей

стали при энергии бомбардирующих ионов 35 кэв и токе 110 мка (плотность тока $150 \text{ мка}/\text{см}^2$) в зависимости от концентрации внедренного водорода показаны на рис. 5. На рис. 4 (кривая 3) приведены эти же результаты в зависимости от количества поступившего в камеру водорода. Следует отметить, что большая часть кривой попадает в область, где скорость откачки — величина постоянная. Поэтому коэффициент внедрения здесь вычислялся без поправки на скорость откачки водородным конденсационным насосом. Как видно из кривой рис. 5, с ростом концентрации внедренных

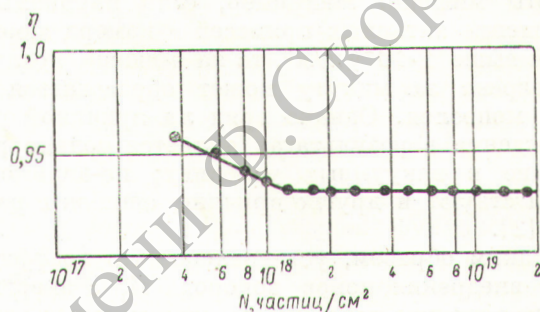


Рис. 5. Зависимость η от числа внедренных частиц на единицу поверхности.

атомов до $N = 10^{18} \text{ частиц}/\text{см}^2$ наблюдается снижение коэффициента внедрения от 0,96 до 0,93. С дальнейшим ростом концентрации внедренных атомов никакого снижения коэффициента внедрения не замечается вплоть до $N = 2 \cdot 10^{19} \text{ частиц}/\text{см}^2$. Можно полагать, что он остается неизменным и при существенно больших концентрациях.

В дополнение к этим измерениям проведены опыты по определению количества внедренного водорода взвешиванием. В результате установлено, что концентрация внедренного водорода достигает значений $2 \cdot 10^{19} \text{ частиц}/\text{см}^2$.

Полученные нами результаты значительно отличаются от результатов работы [2]. В этой работе коэффициент внедрения ионов D^+ в мишень из нержавеющей стали в интервале энергии 7 — 25 кэв изменяется от 0,2 до 0,35. В исследованной области энергии обнаружено насыщение мишени, определяемое равенством потоков дейтерия на мишень и из мишени. Так, например, при энергии ионов D^+ , равной 15 кэв, насыщение наблюдается при концентрации внедренных частиц $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Расхождение между результатами, полученными в настоящей работе и [2], по-видимому, не может быть отнесено ни за счет различия

в массах, ни за счет различия в энергии внедряемых частиц. Можно полагать, что некоторую роль в этом сыграли вакуумные условия, определяющие чистоту поверхности мишени. Хотя специальные эксперименты по исследованию влияния чистоты поверхности мишени на коэффициент внедрения нами не проводились, некоторые результаты показывают, что с ухудшением чистоты величина η снижается. В работе [2] вакуум в камере измерений был равен $1,3 \div 4 \cdot 10^{-6}$ н/м², причем $\sim 30\%$ составляли примеси. Такие вакуумные условия не достаточны для поддержания необходимой чистоты мишени. Например, если парциальное давление активных примесей в камере измерений выше $1 \cdot 10^{-7}$ н/м², то на мишени после ее прогрева за минуту может образоваться до 0,1 монослоя. Однако вряд ли причиной расхождения в результатах является только различие в вакуумных условиях; по-видимому, существуют и другие причины ошибок в работе [2].

Таким образом, установлено, что коэффициент внедрения ионов водорода H_1^+ с энергией 35 кэ в чистую поверхность нержавеющей стали 1Х18Н9Т превышает 93%. Это значение η остается неизменным вплоть до концентраций

внедренных атомов $2 \cdot 10^{19}$ см⁻², причем тенденции к его снижению не наблюдается.

Полученный результат позволяет считать, что в условиях магнитных ловушек скорость откачки медленных нейтральных частиц может быть взята по крайней мере на порядок меньше величины, определенной по скорости ухода быстрых частиц из области плазмы.

Поступила в Редакцию 15/VII 1963 г.
В окончательной редакции 22/VI 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. J. Vagnerin, J. H. Carmichael. J. Appl. Phys., 28, 913 (1957).
2. В. А. Симонов. Ядерный синтез. Ч. I. Вена, МАГАТЭ, 1962, стр. 325.
3. J. Carmichael, E. Trendelenburg. J. Appl. Phys., 29, 1570 (1958).
4. J. Carmichael, P. Waters. J. Appl. Phys., 33, 1470 (1962).
5. E. Brown, J. H. Leck. Brit. J. Appl. Phys., 6, 161 (1955).
6. J. Koch. Nature, 161, 566 (1948).
7. K. Fiebigler. Z. angew. Phys., 9, 213 (1957).
8. Е. С. Боровик, С. Ф. Гришин, Б. Г. Лазарев. «Приборы и техника эксперимента», № 1, 145 (1960).
9. Е. С. Боровик, С. Ф. Гришин, Е. Я. Гришина. ЖТФ, 30, 539 (1960).

УДК 533.9

Возмущения движения частиц в стеллараторе

А. П. Попрядухин

Дается вывод условий, при которых малые возмущения не разрушают замкнутых поверхностей траекторий ведущих центров заряженных частиц в стеллараторе. В линейном приближении доказано, что тороидальный стелларатор с возмущениями магнитного поля является абсолютной ловушкой для отдельных частиц.

Как известно, идеальный стелларатор в дрейфовом приближении является абсолютной ловушкой для отдельных заряженных частиц. Под идеальным стелларатором следует понимать ловушку с магнитным полем, обладающим винтовой симметрией $[H = H(r, \varphi - az)]$ и представляющим собой комбинацию поля, созданного винтовыми проводниками, и однородного поля, параллельного оси z . Уход частиц через торцы в системе с конечной длиной $2\pi R$ исключается, так как концы системы совмещены, т. е. плоскости $z_0 + 2\pi Ri = \text{const}(i =$

$= 0, 1, 2, \dots)$ совпадают и представляют собой одну плоскость. Будем называть эту плоскость изображающей.

В реальном стеллараторе существуют различные виды возмущений движения частиц: тороидальность, неточность выполнения магнитной системы, токи в плазме, электрические поля в плазме. Влияние тороидальности и возмущений магнитного поля на силовые линии исследовалось в ряде работ [1—6]. В настоящей работе рассматриваются особенности влияния этих возмущений на движение частиц.

Движение частиц в винтовом магнитном поле

Рассмотрим в дрейфовом приближении движение частиц в идеальном стеллараторном поле.

Для статических полей [7]

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{v_{||}}{H} \left[\mathbf{H} + \frac{mc}{e} \text{rot } v_{||} \boldsymbol{\tau} - \frac{mc v_{||}}{e} \boldsymbol{\tau} (\boldsymbol{\tau} \text{rot } \boldsymbol{\tau}) \right], \quad (1)$$