

04:12

Магнитная ловушка Торнадо-Х для удержания и нагрева плазмы

© К.А. Абрамова, А.В. Воронин, Г.А. Галечян, М.Л. Лев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 23 июня 1995 г.)

Приводится описание магнитной ловушки Торнадо-Х для удержания и нагрева плазмы. Представлены результаты первых исследований распадающейся плазмы, которые позволяют сделать заключение, что потери плазмы определяются классической диффузией. Осуществлен нагрев плазмы с помощью дрейфа заряженных частиц в скрещенных магнитном и электрическом полях. На начальном этапе воспроизведены параметры вращающейся плазмы, полученные на установке Торнадо-650.

Исследования удержания и нагрева плазмы в магнитных ловушках (токамак и стелларатор) интенсивно и успешно развиваются во всем мире. Системы, получившие название левитрон, сфератор, торнадо, и поведение плазмы в них исследованы меньше, хотя и обладают определенными преимуществами по сравнению с первыми [1–4]. Основное их преимущество — лучшая структура магнитного поля и связанная с этим возможность достижения больших значений отношения давления плазмы к давлению магнитного поля. Меньшая активность в применении объясняется рядом конструктивных трудностей (которые к настоящему времени удалось преодолеть). Они связаны с тем, что токи и, следовательно, проводники, создающие поле, должны находиться "внутри" плазмы, удерживаемой этим полем, и не могут или почти не могут быть закреплены.

Модификация ловушки Торнадо, предложенная Б.П. Перегудом и А.А. Семеновым, исследуется в настоящее время [5]. Магнитное поле Торнадо создается двумя противоположно направленными токами, которые протекают по геометрически подобным сферическим концентрическим спиральным проводникам. Эксперименты на моделях [6] и численные расчеты [7] позволили установить, что центральная область с малой напряженностью магнитного поля окружена магнитным барьером вблизи сферической сепаратрисы с радиусом $r_c = \sqrt{r_{вн} \cdot r_{нар}}$, отделяющей магнитное поле ловушки от внешнего поля. Подробное описание ловушки приводится в работе [8], расчет структуры магнитного поля — в [7,9].

Результаты исследований удержания плазмы, получаемой разрядом в газе, позволили заключить, что основным механизмом ее ухода из ловушки является классическая диффузия поперек магнитного поля, а относительно большие возмущения поля ловушки не приводят к потерям плазмы, заметным по сравнению с классической диффузией [10,11]. Для нагрева плазмы по предложению Б. Ленерта [12] использовался дрейф заряженных частиц в скрещенных магнитном и электрическом полях. В результате дрейфа возникает вращение плазмы вокруг оси,

проходящей через полюса ловушки. Такое вращение является эффективным способом сообщения энергии плазме. Энергия затрачивается не только на придание плазменному образованию как целому скорости вращения, но в столкновительной плазме и на ее нагрев [13]. В замкнутом поле ловушки отсутствуют потери энергии вдоль магнитных силовых линий, что существенно облегчает получение больших скоростей вращения и температур чистой водородной плазмы. На установке Торнадо-650 превзойден альфвеновский предел скорости вращения плазмы в десять раз ($3 \cdot 10^7$ см/с). Плотность плазмы составляла 10^{13} см⁻³, температура ионов 200 эВ, энергия вращения протонов 1 кэВ. Указанные параметры получены на установке с объемом плазмы 80 л, энергоемкостью конденсаторных батарей 100 кДж и магнитным полем в барьере 0.15 Тл [14].

Эти результаты позволили планировать получение плазмы концентацией 10^{14} см⁻³, температурой ионов 1.5 кэВ и энергией направленного движения протонов 8 кэВ в ловушке Торнадо-Х с магнитным полем в барьере до 1 Тл. Первые результаты исследований удержания и нагрева плазмы в этой ловушке представлены в данной работе.

К настоящему времени предложено несколько способов, позволяющих создать механически жесткую, устойчивую систему, способную пропустить необходимый электрический ток по спиральям [15]. При разработке и изготовлении механически прочных спиралей ловушки Торнадо-Х выбран способ, использующий прочные и доступные материалы. Оптимальные материал, толщина проводника и количество витков определены на основании расчета допустимых механических нагрузок и перемещений витков в магнитном поле ловушки до 1 Тл [15].

Параметры магнитной ловушки Торнадо-Х следующие: индукция магнитного поля в барьере 1.0 Тл, длительность импульса магнитного поля 2.0 мс, радиус сепаратрисы 0.405 м, радиус внутренней спирали 0.339 м, радиус наружной спирали 0.484 м, относительный угол поворота спиралей 0–180 град, количество витков 8, радиус проводника спиралей 0.025 м,

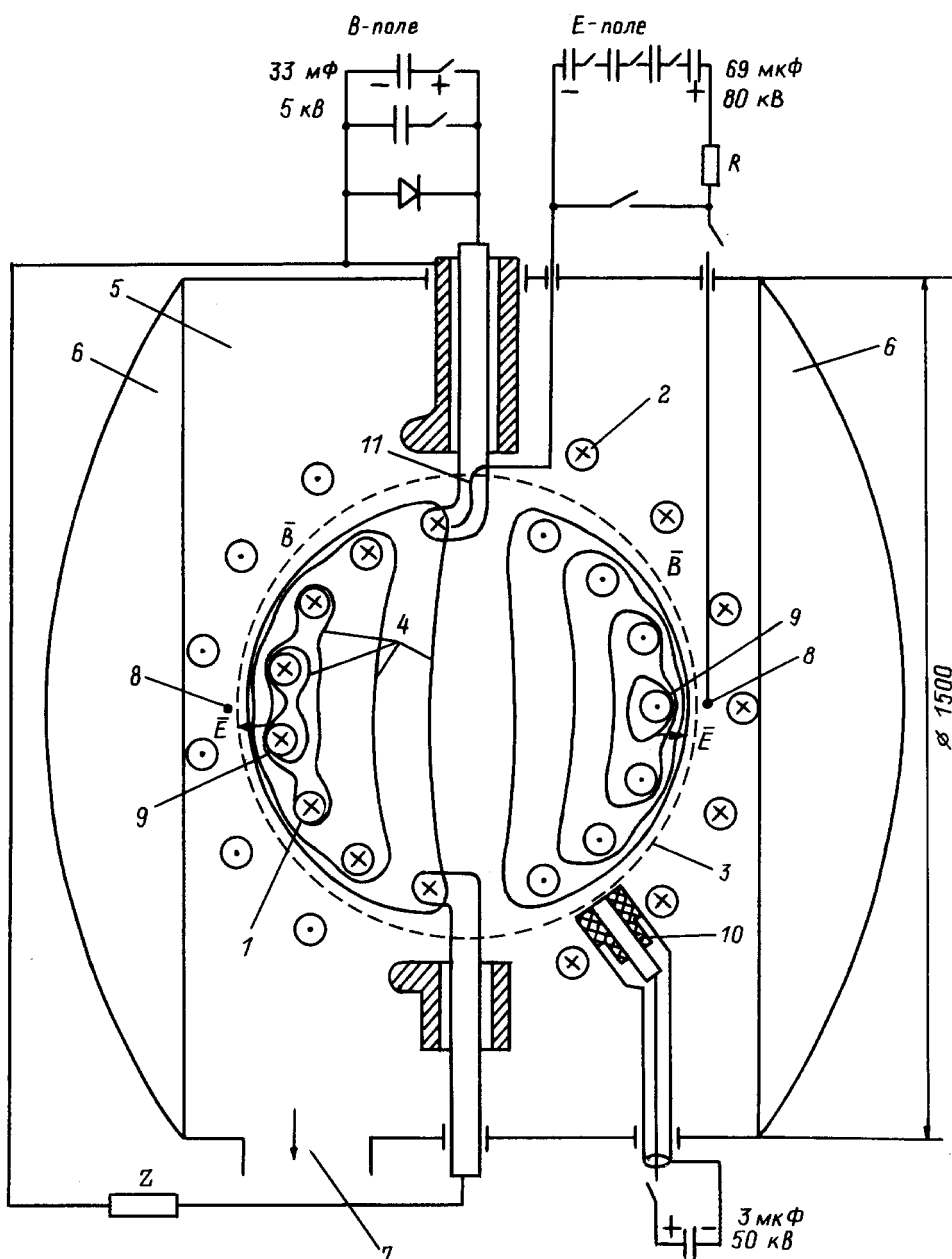


Рис. 1. Схема эксперимента с вращающейся плазмой в магнитной ловушке Торнадо-Х. 1 — витки внутренней спирали; 2 — витки наружной спирали, 3 — сферическая сепаратриса; 4 — магнитные силовые линии, 5 — цилиндрическая стенка камеры; 6 — эллиптические двери, 7 — канал для вакуумной откачки; 8 — катод; 9 — анод; 10 — инжектор плазмы; 11 — токоподвод к аноду, уложенный вдоль витков внутренней спирали.

максимальный ток по внутренней спирали 273 кА, максимальный ток по наружной спирали 228 кА, максимальное механическое напряжение в спиралях 500 МПа, максимальное смещение витков за время импульса тока по спиралям 0.003 м, отношение величин полей в барьере и центре ловушки 1.5.

Окончательное проектирование, выбор материала и изготовление спиралей осуществлено сотрудниками Отделения физики плазмы и термоядерных исследований Королевского технологического института в Стокгольме.

Магнитная ловушка Торнадо-Х (рис. 1) состоит из двух подобных сферических концентрических спиральных проводников 1, 2. Спирали навиты с равным угловым шагом из прута нержавеющей стали марки 2343. Диаметры спиралей выбраны равными диаметрам спиралей ловушки Торнадо-650: $D_{вн} = 0.678$ м, $D_{нар} = 0.968$ м. Токоподводом ловушки служат коаксиальные кабель и ввод в верхней ее части, соединенный с внутренней и наружной спиралями. Нижние полюса спиралей электрически соединены. Таким образом, спирали подключены к источ-

нику тока последовательно, а изменение отношения токов в них задается дополнительным сопротивлением Z , соединенным параллельно одной из спиралей. Магнитное поле создается при протекании импульса тока от емкостного накопителя энергией 425 кДж, напряжением до 5 кВ и существует в течение 1–2 мс. Емкостной накопитель разделен на две одинаковые батареи, которые включаются последовательно во времени с задержкой около 1 мс. Это позволяет создавать квазистационарное магнитное поле с неравномерностью вершины 20%.

Ловушка установлена в вакуумной камере объемом 2.5 м³. Камера выполнена в виде цилиндра 5 и двух эллиптических дверей 6, закрывающих ее торцы. Диаметр цилиндрической части и максимальное расстояние между дверьми 1.5 м. Стенки камеры, изготовленные из нержавеющей стали толщиной 10 мм, удалены от спиралей на расстояние, достаточное для того, чтобы поле ловушки снизилось в десять раз. Это позволяет исключить влияние индукционных токов камеры на магнитное поле ловушки. Полюса спиралей закреплены через фторопластовые изоляторы в диаметрально противоположных фланцах на цилиндрической стенке камеры. Между фланцами вдоль цилиндрической стенки установлены четыре шпангоута для защиты камеры от возникающих механических нагрузок при протекании электрического тока по спиральям. Эти нагрузки в закрепленных полюсах спиралей могут достигать 10 т. В камере используются уплотнения из вакуумной термостойкой резины марок ИРП-2043, ИРП-1636 и ИРП-1735. Форвакуумная откачка камеры производится агрегатом АВР-150 производительностью 150 л/с, высоковакуумная — абсорбционными титановыми насосами НМД и НДМВ-10 общей производительностью 11000 л/с до давления $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст. Предварительно камера прогревается десятью кварцевыми галогеновыми лампами марки КГТ-220-1000 при температуре более 100°С.

Основной нагрев плазмы (а также очистка от тяжелых примесей) в Торнадо-Х осуществляется при ее вращении в скрещенных магнитном и электрическом полях. Для этого снаружи сферической сепаратрисы 3 между спиральями ловушки установлены несколько протяженных электродов 8, выполненных из проволоки 3 мм из нержавеющей стали, которые занимают угловое расстояние 2π и являются катодом $E \times H$ разряда. Для устранения паразитных разрядов спиральи изолированы фторопластовой пленкой. Центральный виток внутренней спирали, покрытый молибденовой фольгой, служит анодом 9. Токоподвод к аноду — тонкий провод 11, который уложен вдоль витков внутренней спирали и выходит через верхний полюс ловушки. Электрическое поле между электродами 8 и 9 направлено перпендикулярно магнитным силовым линиям ловушки. Оно создается конденсаторной батареей энергией 220 кДж и напряжением

до 80 кВ. Батарея конденсаторов состоит из четырех одинаковых секций, заряжаемых до напряжения 20 кВ и соединяемых последовательно в момент подключения к электродам. Это обеспечивает надежную и безопасную работу установки. Длительность импульса электрического поля достигает 2 мс при токе через плазму до 100 А. Ограничение тока позволяет уменьшить распыление материала анода и катода и попадание примесей с электродов в водородную плазму.

Вращающаяся плазма эффективно нагревается при условии полной ионизации. В частично ионизованной плазме существует дополнительный канал потерь энергии из-за перезарядки ионов на частицах нейтрального газа. В нашем случае протекание через плазму электрического тока меньшего 100 А не обеспечивает ее полной ионизации, если концентрация больше 10^{12} см⁻³. Поэтому в экспериментах используется дополнительный источник, заполняющий ловушку ионизованной плазмой к началу ее вращения.

Плазма в Торнадо-Х создается эрозионным инжектором 10 (рис. 1), режим работы которого позволяет получать сгусток полностью ионизованной плазмы. В качестве рабочего вещества используется полиэтилен, разлагаемый электрическим разрядом на ионизованный водород и углерод (67% водорода и 33% углерода). При последующем вращении плазмы тяжелая примесь углерода выносится из ловушки. Разряд развивается по поверхности полиэтиленовой шайбы, расположенной между торцами коаксиальных электродов, выполненных из нержавеющей тонкостенных труб диаметром 40 и 20 мм соответственно. Ток к инжектору подводится от емкостного накопителя энергией 4 кДж и напряжением до 50 кВ. Концентрация плазмы в ловушке (до 10^{14} см⁻³) задается напряжением на конденсаторной батарее. Инжектор располагается снаружи сферической сепаратрисы ловушки. Для приготовления чистой водородной или дейтериевой плазмы могут быть использованы пленочно-гидридные титановый, палладиевый и др. инжекторы.

Первые эксперименты на Торнадо-Х проводились с целью исследования удерживающих свойств ловушки. Ловушка заполнялась плазмой в течение 150 мкс, к моменту достижения магнитным полем квазистационарного значения ее заполнения заканчивалось. Исследовался распад плазмы. Средняя концентрация электронной компоненты плазмы измерялась с помощью HCN-лазерного интерферометра на длине волны 337 мкм по диаметру ловушки в ее экваториальной области. Это позволило измерить время жизни заряженных частиц τ в ловушке при постоянном магнитном поле в зависимости от отношения токов в спиральях, величины индукции удерживающего магнитного поля и от тока инжектора.

Из рис. 2, а видно, что τ достигает максимального значения при отношении токов в спиральях

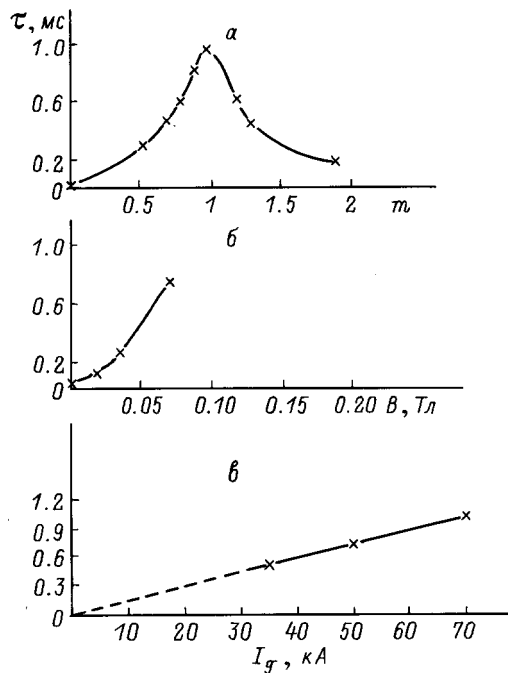


Рис. 2. Время жизни заряженных частиц в ловушке τ в зависимости от отношения токов в спиральных ($B = 0.1$ Тл, $n_e = 2 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$) (а), величины магнитного поля в барьере ловушки ($I_g = 50$ кА) (б), тока инжектора ($B = 0.2$ Тл) (в)

$m = I_{нар}/I_{вн} = 1$, т.е. когда ловушка практически замкнута (теоретическое значение m , при котором должна существовать сепаратриса, равно 0.85). По-видимому, расхождение между экспериментальным и теоретически предсказанным m вызвано, в частности, неоднородностью распределения токов в спиральных, диаметр провода которых далек от расчетного, т.е. бесконечно тонкого. С ростом индукции магнитного поля время жизни заряженных частиц увеличивается по квадратичному закону и становится равным 950 мкс при $B = 0.07$ Тл (рис. 2, б). Дальнейшее увеличение магнитного поля не изменяло времени жизни плазмы вследствие ее гибели из-за объемной электрон-ионной рекомбинации. Из рис. 2, в следует, что время жизни плазмы может быть увеличено при увеличении тока инжектора, что скорее всего связано с неполной ионизацией заполняющей ловушку плазмы. Поэтому в дальнейших экспериментах для получения полностью ионизованной плазмы и подавления влияния процесса рекомбинации в течение времени существования магнитного поля ловушки необходимо значительно увеличить ток инжектора с одновременным сокращением его длительности.

Фотографии объема, занимаемого плазмой в собственном, интегральном по времени излучении, показали, что плазма находится внутри сферической сепаратрисы, свечение ее относительно однородно по объему и резко падает к периферии в области сепаратрисы.

Таким образом, проведенные эксперименты свидетельствуют в пользу замкнутости ловушки Торнадо-Х. Уход плазмы из нее определяется классической диффузией, а время жизни заряженных частиц оказывается максимальным при отношении токов в спиральных, близком к теоретическому.

Дальнейшие эксперименты проводились с вращением плазмы в скрещенных магнитном и электрическом полях с целью ее нагрева. Для этого перед заполнением ловушки плазмой инжектора между анодом и катодом включалось электрическое поле. При впрыскивании плазмы между электродами перпендикулярно магнитному полю ловушки зажигался разряд и протекал электрический ток, ограничиваемый сопротивлением R (рис. 1). По напряжению на плазме делали заключение о возможной величине скорости ее вращения вокруг оси, проходящей через полю-

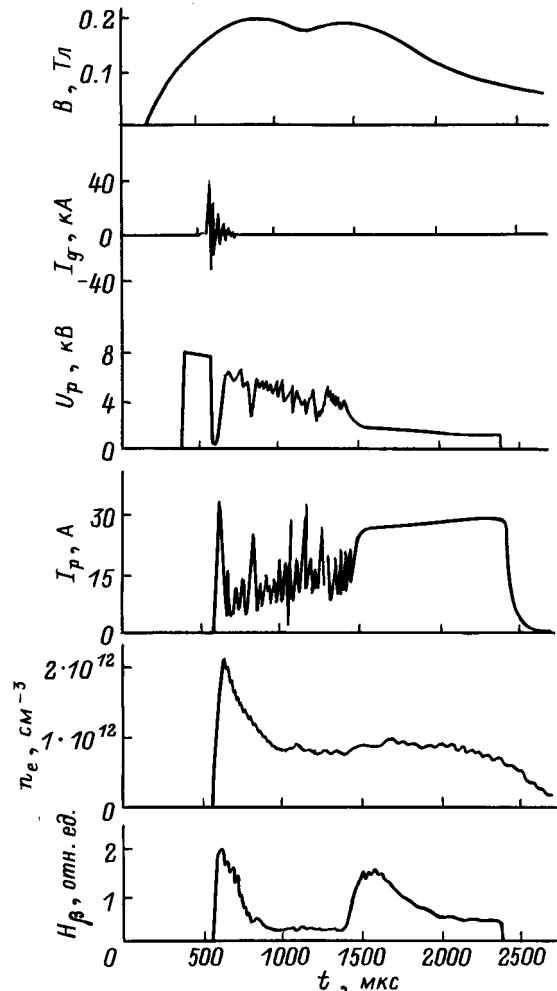


Рис. 3. Измерения в экспериментах с вращающейся плазмой. B — магнитное поле в барьере ловушки; I_g — ток инжектора; U_p — напряжение на плазме в промежутке анод-катод; I_p — ток через плазму; n_e — усредненная по диаметру ловушки концентрация электронной компоненты плазмы; H_β — интенсивность излучения плазмы на длине волны, соответствующей водородной линии.

са спиралей. После окончания импульса магнитного поля промежутки анод-катод шунтировался цепью короткого замыкания.

На рис. 3 представлены характерные для режима вращающейся плазмы временные зависимости. Видно, что магнитное поле достигало квазистационарного значения 0.2 Тл в барьере на 550 и существовало таким до 1750 мкс. Между катодом и анодом включалось напряжение за 100 мкс до начала заполнения ловушки плазмой. Плазма заполняла ловушку начиная с 550 до 700 мкс. В момент заполнения ловушки плазмой напряжение на промежутке анод-катод резко падало до нескольких сот вольт, а после 100 мкс также резко возрастало до 5 кВ. Продолжительность высокого напряжения на плазме могла изменяться от разряда к разряду, но к моменту окончания существования квазистационарного магнитного поля уменьшалось и становилось менее 1 кВ. Для ограничения длительности разряда на 2400-й микросекунде напряжение между анодом и катодом снималось включением цепи короткого замыкания. Максимальный ток через плазму достигал 30 А при минимальном напряжении на плазме и становился около 40 А при напряжении 5 кВ. Мощность, вкладываемая в плазму, достигала максимального значения 100 кВт в начальный момент ускорения плазмы и стабилизировалась на уровне 50 кВт в процессе ее вращения с постоянной скоростью. Усредненная по диаметру ловушки концентрация электронной компоненты плазмы резко возрастала до $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ в момент заполнения ловушки плазмой инжектора, уменьшалась в момент окончания тока инжектора до 10^{12} см^{-3} и практически не изменялась в течение процесса вращения. Заметная интенсивность излучения плазмы на длине волны, соответствующей водородной линии H_{β} , существовала в течение времени заполнения ловушки плазмой инжектора и подъема напряжения на плазме, затем исчезала при максимальном напряжении на плазме и вновь появлялась при уменьшении напряжения в конце разряда. Это дает основание надеяться на выгорание нейтрального водорода и на его полную ионизацию в процессе вращения плазмы. Оценки, основанные на результатах измерений индукции магнитного поля и напряжения между анодом и катодом, позволяют предполагать, что плазма вращалась со скоростью $5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ и температура ее ионов достигала 0.5 кэВ. Измерение температуры, скорости и энергии вращения, а также определение спектрального состава плазмы оптическими методами — задача дальнейших экспериментальных исследований на установке Торнадо-Х.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что магнитная ловушка Торнадо-Х является замкнутой, уход плазмы из нее определяется классической диффузией. Результаты анализа измеренных параметров позволяют надеяться, что плазма полностью ионизована, вращается, скорость ее вращения значительно превышает предел Альфвена, а температура ионов достигает нескольких сот электрон-вольт.

Авторы выражают благодарность персоналу лаборатории магнитогидродинамических явлений Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (С.-Петербург) и лаборатории Альфвена Королевского технологического института (Стокгольм) за помощь в подготовке и проведении исследований.

Работа частично поддержана грантом Сороса по решению Американского физического общества от 17.02.93, а также Министерством науки России.

Список литературы

- [1] *Lehnert B.* // J. Nucl. Energy. 1959. Vol. 1. N 1. P. 40.
- [2] *Freeman R., Johnson L., Okabayshi M. et al.* // IV Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Rome, 1970.
- [3] *Скорняков Г.В.* // ЖТФ. 1962. Т. 32. С. 261–268.
- [4] *Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 3. С. 305–316.
- [5] *Перегуд Б.П., Семенов А.А.* // ЖТФ. 1971. Т. 60. Вып. 11. С. 2297–2304.
- [6] *Абрамова К.Б., Галечян Г.А., Перегуд Б.П.* // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 8. С. 1426–1434.
- [7] *Козырев А.Н., Кузнецов В.М., Перегуд Б.П., Федичкина З.В.* // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 11. С. 2305–2315.
- [8] *Lehnert B., Peregood V.P.* Nucl. Instrum. and Methods. 1981. V. 180. P. 357.
- [9] *Абрамова К.Б., Воронин А.В., Галечян Г.А., Лев М.Л. и др.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 30–34.
- [10] *Галечян Г.А., Перегуд Б.П.* // ЖТФ. 1969. Т. 39. С. 1696–1702.
- [11] *Воробьев Г.М., Галечян Г.А., Перегуд Б.П.* // III Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Utrecht (Netherland), 1969.
- [12] *Lehnert B.* // Physica Scripta. 1975. Vol. 12. P. 166.
- [13] *Lehnert B.* // Nuclear Fusion. 1971. Vol. 11. P. 485.
- [14] *Перегуд Б.П., Кузнецов В.М., Воронин А.В. и др.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1984. № 3 (16). С. 46–51.
- [15] *Воронин А.В., Кузнецов В.М., Перегуд Б.П. и др.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 469–476.