

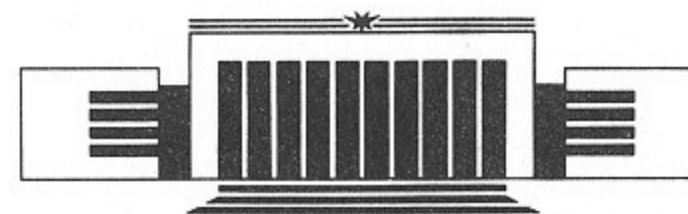


71
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.В. Аржанников, А.В. Бурдаков, В.С. Койдан,
В.С. Николаев, В.В. Поступаев, С.Л. Синицкий,
А.В. Смирнов

ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
РИУС-1М

ПРЕПРИНТ 91-61



НОВОСИБИРСК

ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА РИУС-1М.

Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Койдан В. С., Николаев В. С.,
Поступаев В. В., Сеницкий С. Л., Смирнов А. В.

АННОТАЦИЯ

Описан модернизированный вариант генератора электронного пучка РИУС-1М. При сохранении компоновки и габаритов ускорителя в ходе модернизации была увеличена емкость мегавольтного накопителя примерно в 3 раза, что позволило увеличить длительность пучка с 50-60 до 100-150 нс при сохранении значений тока пучка и энергии электронов. Представлены результаты экспериментов по инжекции в плазму пучка с увеличенным относительно исходного более чем в два раза энергосодержанием.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Генератор электронного пучка РИУС-1, первоначальный вариант которого описан в работе [1], использовался в экспериментах по инжекции пучка в плазму на установке ИНАР с 1972 г. В первых экспериментах [2] электронный пучок имел следующие параметры: энергия пучка в максимуме 0.7 МэВ, ток пучка 3-5 кА, длительность 70 нс и энергосодержание около 60 Дж. В дальнейшем параллельно с экспериментами по изучению взаимодействия пучка с плазмой проводилась работа по совершенствованию этого генератора и увеличению параметров пучка (см., напр. [3]), и в экспериментах [4-7] энергосодержание пучка возросло до 500-600 Дж (в основном за счет увеличения тока пучка до 20-25 кА). В указанных экспериментах плотность тока РЭП составляла 5-10 кА/см², эффективность передачи энергии от пучка к плазме достигала 30% при длине плазменного столба 2.4 м.

С точки зрения развития систем с магнитным удержанием и исследования нагрева плазмы мощными релятивистскими пучками микросекундной длительности представлял интерес провести соответствующие эксперименты с увеличением энергосодержания и длительности пучка при сохранении его мгновенных параметров. Для этого в 1985 г. была проведена существенная модернизация

генератора РИУС-1. Мегавольтная емкость, в которой с помощью трансформатора TESLA запасается энергия, была увеличена примерно в 3 раза. Соответственно была увеличена и емкость в первичном контуре. После этой реконструкции и проведения испытаний модернизированный генератор пучка РИУС-1М использовался в экспериментах по пучковому нагреву плазмы на установках ИНАР и ИНАР-2 [8].

2. УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА РИУС-1М.

Основой генератора РЭП РИУС-1 является резонансный трансформатор TESLA (см. рис.1). В качестве мегавольтного накопителя энергии используется конструктивная емкость, образованная стенкой газового бака 6 и цилиндрическим электродом 7, который соединен с выходом вторичной обмотки 4 резонансного трансформатора. Трансформатор, накопитель и главный разрядник 8 расположены в баке с элегазом (SF_6) под давлением до 8 атм. Разрядник срабатывает при самопробое на первом полупериоде напряжения.

При модернизации генератора в его накопительной емкости была применена новая система коаксиально расположенных цилиндрических электродов с развитой (приблизительно в 3 раза) поверхностью. Конструктивные элементы электродов изготовлены из тонколистовой (2 мм) нержавеющей стали. Кромки электродов оформлены тороидальными поверхностями, а сами разъемные электроды имеют необходимое для сборки системы число стыков в диаметральных плоскостях. Высоковольтные зазоры между элементами электродов равны 65 мм (в старом варианте зазор был 100 мм). Максимальная напряженность электрического поля на конструктивных элементах накопителя возросла почти до 300 кВ/см при напряжении на нем 1 МВ. Емкость модернизированного накопителя составила ~1800 пФ (~540 пФ в старом варианте).

Ранее первичным накопителем энергии служил конденсатор 5 мкФ, 50 кВ, который коммутировался воздушным разрядником. После модернизации первичная емкость 15 мкФ была собрана из конденсаторов ИК50-3 и коммутировалась сдвоенными игнитронами ИРТ-6. Новая система коммутации оказалась более стабильной и устойчивой в работе. Зазор в главном разряднике можно изменять и в описываемых экспериментах он составлял обычно 33-37 мм при давлении элегаза 6.5-7 атм. Заметим, что повышение давления

газа выше 5 атм практически не приводило к росту электрической прочности разрядника. В ходе экспериментов первичная батарея заряжалась до 39-42 кВ. Время от запуска игнитронов до первого максимума напряжения составляло 18 мкс. Пробой мегавольтного разрядника происходил несколько раньше максимума.

При модернизации ускорителя путём конструктивных улучшений была повышена также электрическая прочность проходного изолятора вакуумного вывода 9. Остальные элементы вакуумной части генератора, в том числе и собственно диодная часть, были оставлены практически без изменений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГЕНЕРАЦИИ РЭП.

На рис.2 приведены осциллограммы напряжения на катоде ускорителя и тока пучка в типичных выстрелах до и после модернизации генератора. Видно, что кроме роста длительности пучка возросло среднее значение тока и напряжения, вырос его энергозапас. До модернизации среднее значение инжектируемой в плазму энергии при диаметре катода 20 мм составляло 550 Дж (максимальное 660 Дж), после модернизации - соответственно 1350 Дж и 1900 Дж. Максимальный ток пучка составлял 50 кА, ток короткого замыкания - около 90 кА. Типичный зазор анод-катод в этих экспериментах составлял 5 мм, что обеспечивало среднюю напряженность электрического поля в диоде около 2 МВ/см.

Такой режим работы диода при повышенной длительности пучка привел и к несколько большей нестабильности его параметров. Однако поскольку для нагрева плазмы важно получение максимально возможной плотности тока пучка, то менее напряженные режимы работы диода (с большей площадью катода и большим межэлектродным зазором), в которых генерация пучка происходит с лучшей воспроизводимостью его параметров, нами тщательно не исследовались. В нескольких выстрелах в процессе отработки нового накопителя при работе диода с диаметром пучка 40 мм непосредственно на коллектор его энергозапас колебался в пределах 1750-1950 Дж, что, по-видимому, и является предельным значением этого параметра модернизированного ускорителя.

При инжекции пучка с увеличенным энергозапасом в плазму с плотностью $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ наблюдалось соответствующее увеличение энергосодержания плазмы. Результаты диамагнитных измерений поперечного давления плазмы $p_{\perp S}$ в примерно одинаковом режиме

по мгновенным параметрам пучка и плазмы приведены на рис.3. В этих экспериментах измерялась также температура электронов плазмы по лазерному рассеянию. Увеличенная длительность пучка позволила впервые провести такие измерения непосредственно во время инжекции пучка. Температура основной части плазмы в момент окончания пучка выросла с 20 эВ в предыдущих экспериментах [5] до 30-40 эВ в случае повышенного энергосодержания пучка (при прочих равных условиях).

В дальнейшем генератор пучка РИУС-1М использовался в экспериментах на установке ИНАР-2, основной особенностью которой являлось наличие сильного ведущего магнитного поля (до 8 Т в районе катода). Меньший диаметр анодного цилиндра и ряд конструктивных особенностей установки ИНАР-2 привели к значительным токам утечки с поверхности катододержателя и вакуумного ввода. В типичных условиях экспериментов на установке ИНАР-2 вне полезной апертуры протекало в максимуме до 50-60% тока генератора. Средний энергосодержание пучка в этих экспериментах составлял 850 Дж, максимальный - 1300 Дж.

В процессе эксплуатации модернизированного генератора выявились и некоторые его недостатки. В первую очередь это относится к обмоткам трансформатора TESLA, которые конструктивно не изменялись, поскольку в старом варианте ускорителя работали достаточно надежно. После нескольких десятков выстрелов на новой накопительной емкости при ревизии было обнаружено в обеих обмотках некоторое число следов межвитковых пробоев, возникающих, видимо, при перенапряжениях, которые появляются во время зарядки накопительной емкости и в момент срыва генерации пучка из-за раннего пробоя вакуумного диода. Для устойчивой работы генератора в течение длительного времени требуется, по-видимому, усиление межвитковой электрической прочности, в особенности вторичной обмотки трансформатора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате проведенной модернизации генератора пучка удалось повысить энергосодержание инжектированного в плазму пучка в 2.5-3 раза и довести его до 1.3 кДж. При этом повышение энергосодержания происходит, в основном, за счет увеличения длительности пучка и его средних по времени параметров при сохранении максимальных значений тока пучка и напряжения на

диоде. По-видимому, можно найти режимы стабильной работы генератора с пучком, имеющим энергосодержание до 1.8-2 кДж.

Важным физическим результатом экспериментов по нагреву плазмы явился, на наш взгляд, вывод о том, что энергосодержание плазмы возрастает с ростом длительности пучка.

В процессе работы было продемонстрировано, что генератор РИУС-1М прост в управлении и обслуживании. Отмеченные же выше недостатки связаны, скорее всего, с весьма напряженным режимом работы вакуумного диода.

К настоящему времени физические эксперименты на установках ИНАР и ИНАР-2 с использованием генератора РЭП РИУС-1М завершены. Всего с модернизированным вариантом генератора было сделано около 500 выстрелов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лагунов В.М., Пономаренко А.Г., Фоминский Л.П. ЖТФ, 1972, т.42, вып.9, с.1947-1957.
2. Koidan V.S., Lagunov V.M., Lukyanov V.N., Mekler K.I., Sobolev O.P. Proc. 5th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. - Grenoble, 1972, Vol. 1, p.161.
3. Койдан В.С. Дусс. на соук. уч. ст. доктора физ.-мат. наук. - Новосибирск, 1986.
4. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Mekler K.I., Rogozin A.I., Vyacheslavov L.N. Proc. 3 Intern. Conf. on High Power Electron and Ion Beam Research and Technology. - Novosibirsk, 1979. - Vol.1, p.29-42.
5. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Koidan V. S., Vyacheslavov L.N. Physica Scripta, 1982, Vol. T2/2, p.303-309.
6. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Meshkov O.I., Koidan V.S., Postupaev V.V., Sinitskij S.L., Vyacheslavov L.N. Proc. 1984 Intern. Conf. on Plasma Physics. - Lausanne, Switzerland, 1984. - Invited Papers, Vol.1, p.285-308.
7. Arzhannikov A. V., Astrelin A. V., Avrorov A. P., Breizman B.N., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Chikunov V.V., Kandaurov I. V., Kapitonov V. A., Khil'chenko A. D., Knyasev B. A., Koidan V. S., Konyukhov V. V., Kruglyakov Eh.P., Lebedev S.V., Mekler K.I., Meshkov O.I., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Sanin A.D., Shcheglov M.A., Sinitskij S.L., Voropaev S.G., Vyacheslavov L.N. Proc. 11th Intern. Conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Res., 1986, Kyoto. IAEA, Vienna, v.2, p.323-336 (1987).
8. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kapitonov V. A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Shcheglov M.A., Sinitskij S.L., Voropaev S.G., Vyacheslavov L.N. Plasma Physics and Controlled Fusion (Proc. 15 European Conf., Dubrovnik, 1988) - Vol.30, N 11, p.1571-1588.

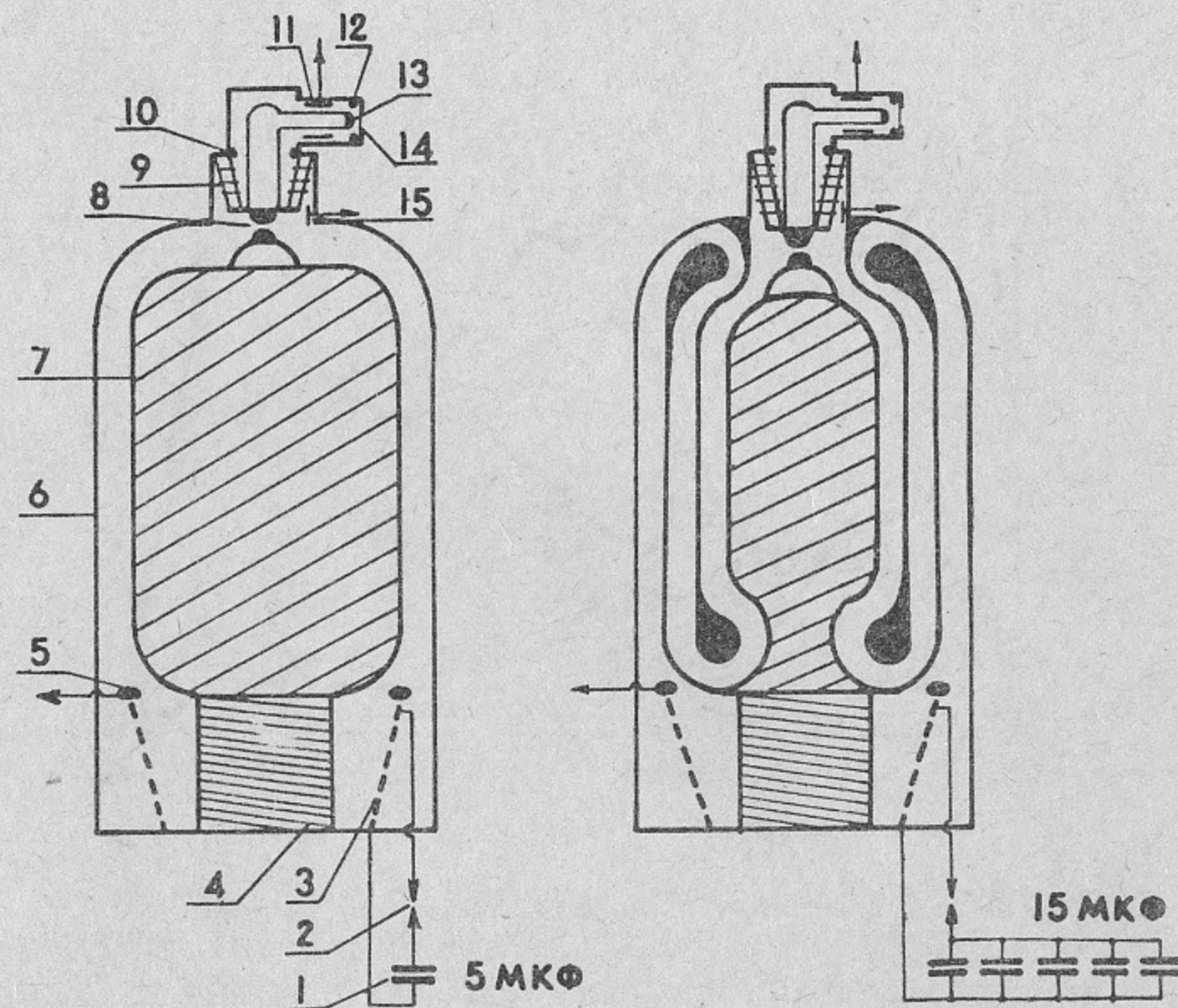


Рис.1 Схема генератора РЭП РИУС-1 до (слева) и после модернизации:

1 - конденсатор, 2 - первичный разрядник, 3 - первичная обмотка трансформатора TESLA, 4 - высоковольтная обмотка, 5, 11, 15 - емкостные датчики напряжения, 6 - газовый бак - "земляной" положительный электрод накопителя, 7 - отрицательный мегавольтовый электрод, 8 - главный газовый разрядник, 9 - вакуумный вывод, 10, 12 - пояса Роговского, 13 - катод, 14 - анодная фольга.

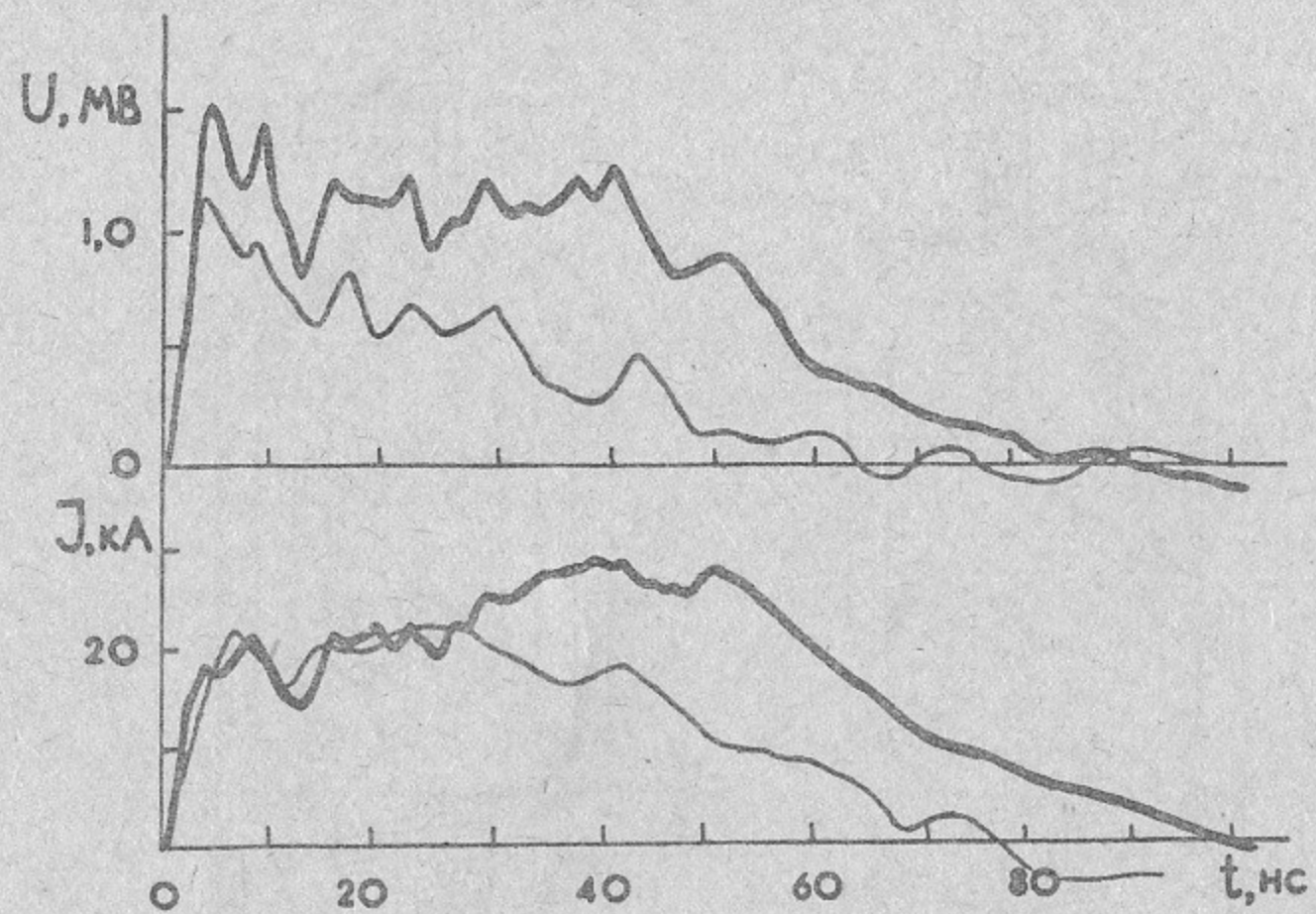


Рис.2 Типичные осциллограммы напряжения на диоде и тока пучка до (тонкая линия) и после модернизации. Условия эксперимента: диаметр катода 20 мм, зазор анод-катод 5 мм, магнитное поле в диоде 4.2 Т, инжекция в плазму через 10 мкм титановую фольгу.

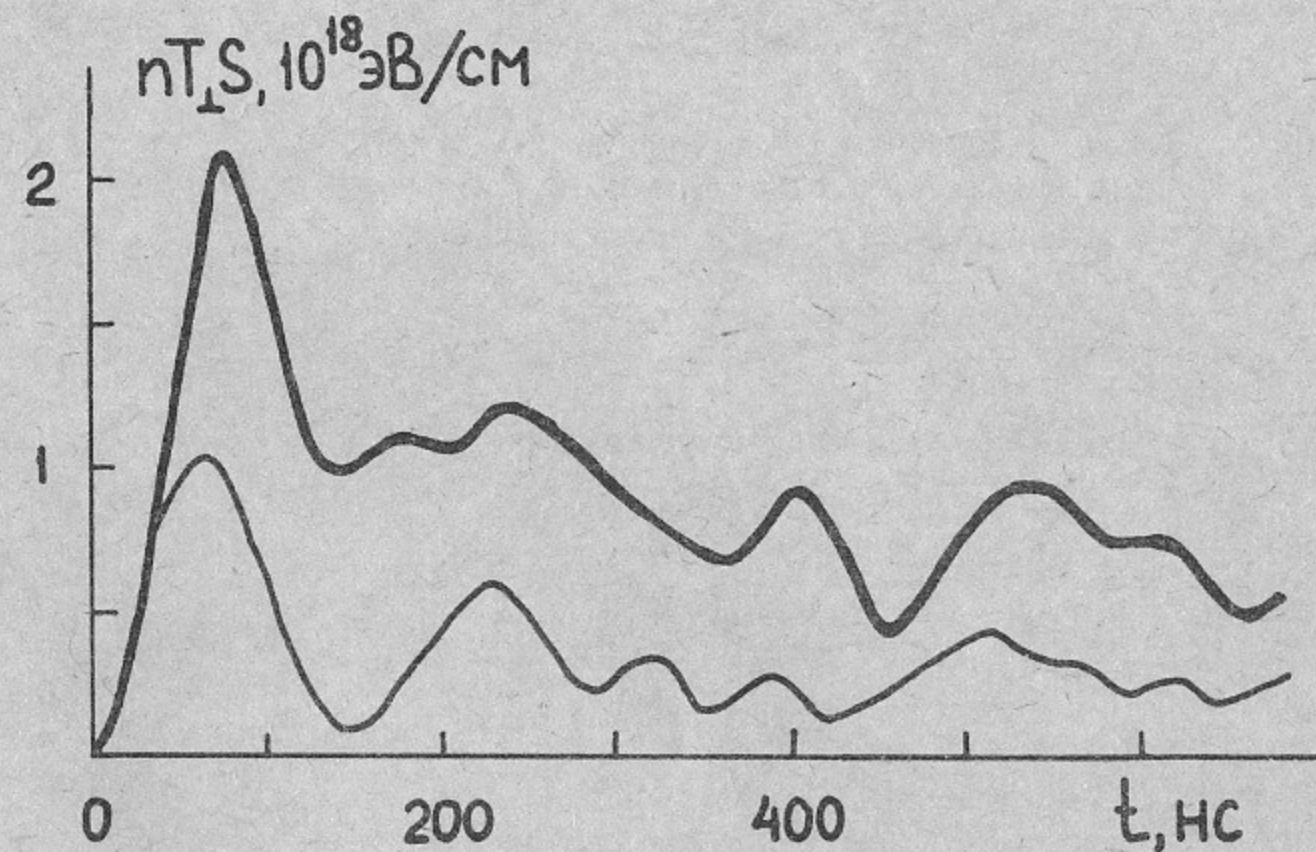


Рис.3 Диамагнитные сигналы (поперечное давление плазмы), полученные в экспериментах с исходным пучком (тонкая линия) и после модернизации генератора РЭП. Зонд расположен в 70 см от точки инжекции, плотность пучка 10^{12} см^{-3} , плотность плазмы $1.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, магнитное поле в однородной части плазменного столба 2.5 Т.

А.В.Аржанников, А.В.Бурдаков, В.С.Койдан,
В.С.Николаев, В.В.Поступаев, С.Л.Синицкий,
А.В.Смирнов

Генератор электронного пучка
РИУС-1М

Препринт 91-61

Работа поступила 5 июня 1991 г.

Ответственный за выпуск С.Г.Попов.
Подписано к печати 10 июня 1991 г.
Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 61.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90