

Д.38
ИЯФ 1990

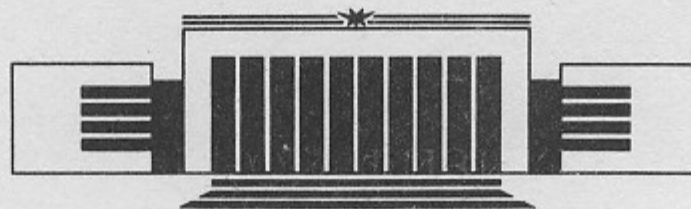
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Ю.И. Деулин, С.В. Лебедев, В.С. Николаев,
Е.П. Семенов

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА
ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ГОЛ-3**

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № *Джз.*

ПРЕПРИНТ 90-141



НОВОСИБИРСК

v

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ГОЛ-3

Ю.И. ДЕУЛИН, С.В. ЛЕБЕДЕВ, В.С. НИКОЛАЕВ,
Е.П. СЕМЕНОВ

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Описана магнитная система установки ГОЛ-3, на которой ведутся эксперименты по нагреву плазмы мощным релятивистским электронным пучком. Магнитная система включает в себя соленоид длиной 7 м, рабочей апертурой 15,7 см, состоящий из 60-ти многовитковых ленточных катушек. Магнитное поле в соленоиде составляет 6 Т, в магнитных пробках на концах соленоида 12 Т.

В институте ядерной физики СО АН СССР ведутся работы по нагреву плазмы в открытых магнитных ловушках с помощью мощных релятивистских электронных пучков (РЭП) (см., например, [1]). В рамках этой программы сооружена первая очередь установки ГОЛ-3 [2]. Основными частями установки являются генератор 100 кДж РЭП микросекундной длительности [3], плазменная камера с вакуумной и газовой системами [4], магнитная система с полем до 12 Т, а также 10 МДж конденсаторная батарея [5] для питания магнитной системы. Настоящая работа посвящена описанию магнитной системы установки.

Ранее в экспериментах по взаимодействию РЭП с плазмой, как правило, использовались соленоиды с одновитковыми катушками [6, 7]. Такие соленоиды при сравнительно небольших полях были достаточно удобны в эксплуатации и просты в изготовлении. Однако при переходе к полям более 5 Т, что требует питающих токов порядка 200 кА, существенно возрастают требования к системам питания таких соленоидов и особенно к коммутирующей аппаратуре. В связи с этим при создании установки ГОЛ-3 была выбрана система с многовитковыми катушками, что позволяет работать с токами питания ~ 10 кА. В этом случае подводимая к катушкам мощность сравнительно невелика, что существенно упрощает задачу создания системы питания соленоида. При разработке соленоида установки ГОЛ-3 за основу была взята ранее разработанная магнитная система установки У-1 [8].

Конфигурация магнитного поля установки показана на рис. 1. В соответствии со способом получения мощного микросекундного РЭП с высокой плотностью тока [9] пучок сначала генерируется в диоде при сравнительно небольшой величине магнитного поля (0,6 Т), затем плотность тока пучка увеличивается примерно в 10 раз за счет его компрессии в магнитном поле пробочной конфигурации, и после этого пучок инжектируется в камеру с сильным магнитным полем, где и происходит его взаимодействие с плазмой. Поле в однородной части соленоида длиной 7 м составляет 6 Т, а в пробках до 12 Т. Параметры

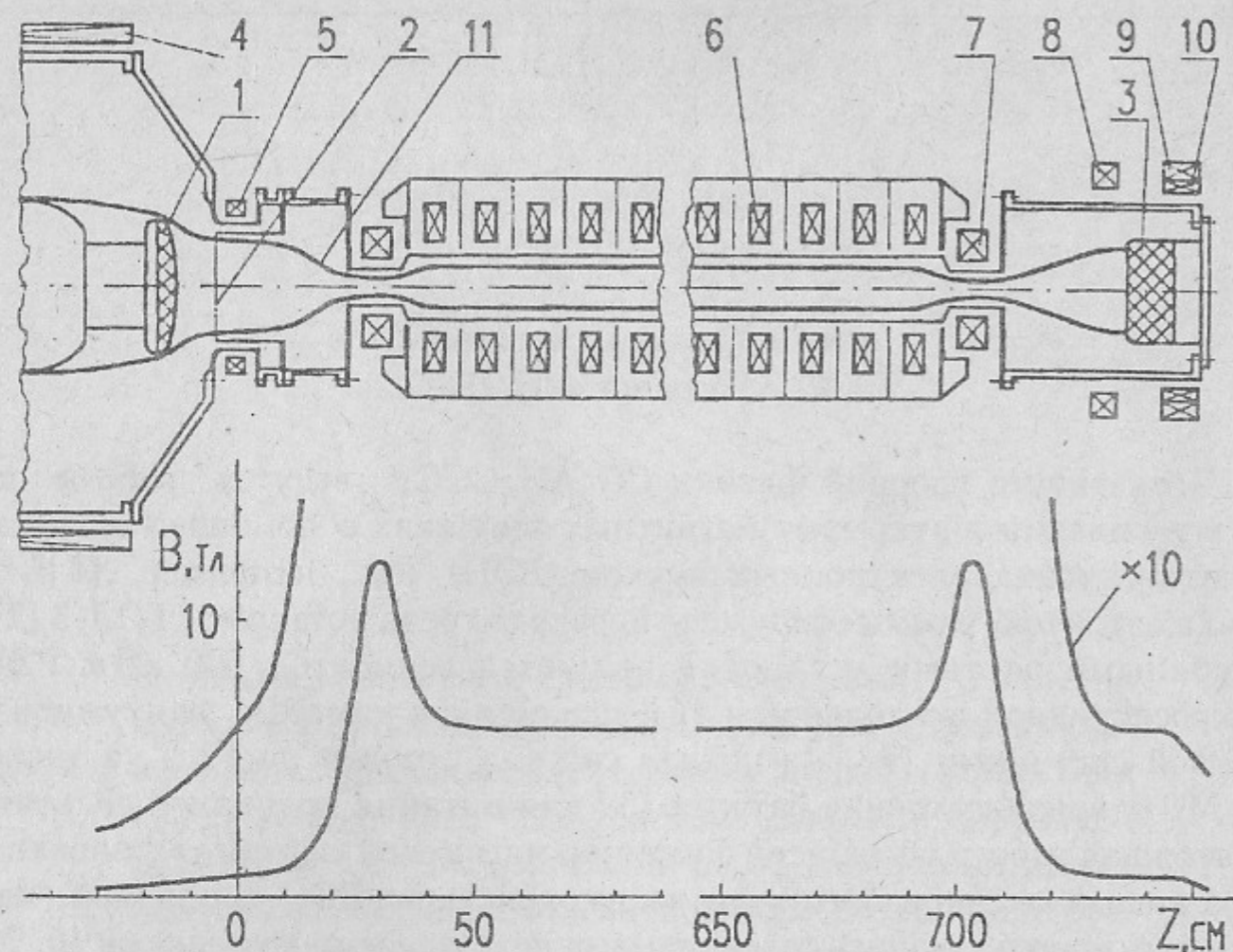


Рис. 1. Схема магнитной системы установки ГОЛ-3:

1 — катод; 2 — анодная фольга; 3 — коллектор; 4, 5 — катушки диода ускорителя и системы сжатия пучка; 6 — катушки соленоида; 7 — пробочные катушки; 8, 9, 10 — катушки приемника пучка; 11 — ход силовых линий магнитного поля. Внизу — распределение магнитного поля.

катушек и величины токов для реализации приведенной конфигурации поля приведены в таблице.

Таблица

| | n | t , см | R , см | ΔR , см | b , см | N | I , кА | B , Т | L , мГн |
|-------------------|-----|----------|----------|-----------------|----------|-----|----------|---------|-----------|
| Катушка соленоида | 60 | 11 | 8.4 | 8 | 4 | 69 | 7.9 | 6 | 1.2 |
| Катушка пробочная | 2 | | 5.2 | 6.4 | 6 | 140 | 10.3 | 12 | 2.6 |

n — количество катушек в магнитной системе, t — шаг катушек, R — внутренний радиус намотки, ΔR — толщина намотки, b — длина катушки, N — число витков, I — величина рабочего тока, B — поле на оси, L — индуктивность катушки.

Выбор размеров катушек и расстояний между ними определен необходимым размером диагностических промежутков и требуемой степенью однородности поля в соленоиде как по длине, так и по радиусу. В сечении транспортируемого пучка (диаметр 6 см) неоднородность поля не превышает 5%.

Соленоид состоит из одинаковых взаимозаменяемых ленточных катушек. Конструкция катушки показана на рис. 2. Обмотка выполнена лентой 5 из холоднокатанной меди М1 (ГОСТ 1173-77). Ширина ленты 4 см, толщина 0,1 см. В качестве межвитковой изоляции использована кабельная бумага (2 слоя по 0,08 мм). Намотка ленты осуществлялась с натягом в каркас из нержавеющей стали. Затем катушка пропитывалась эпоксидным компаундом горячего отверждения. Обмотка электрически изолирована от каркаса, вывод с внутреннего витка выполнен двумя проводниками симметрично относительно обмотки.

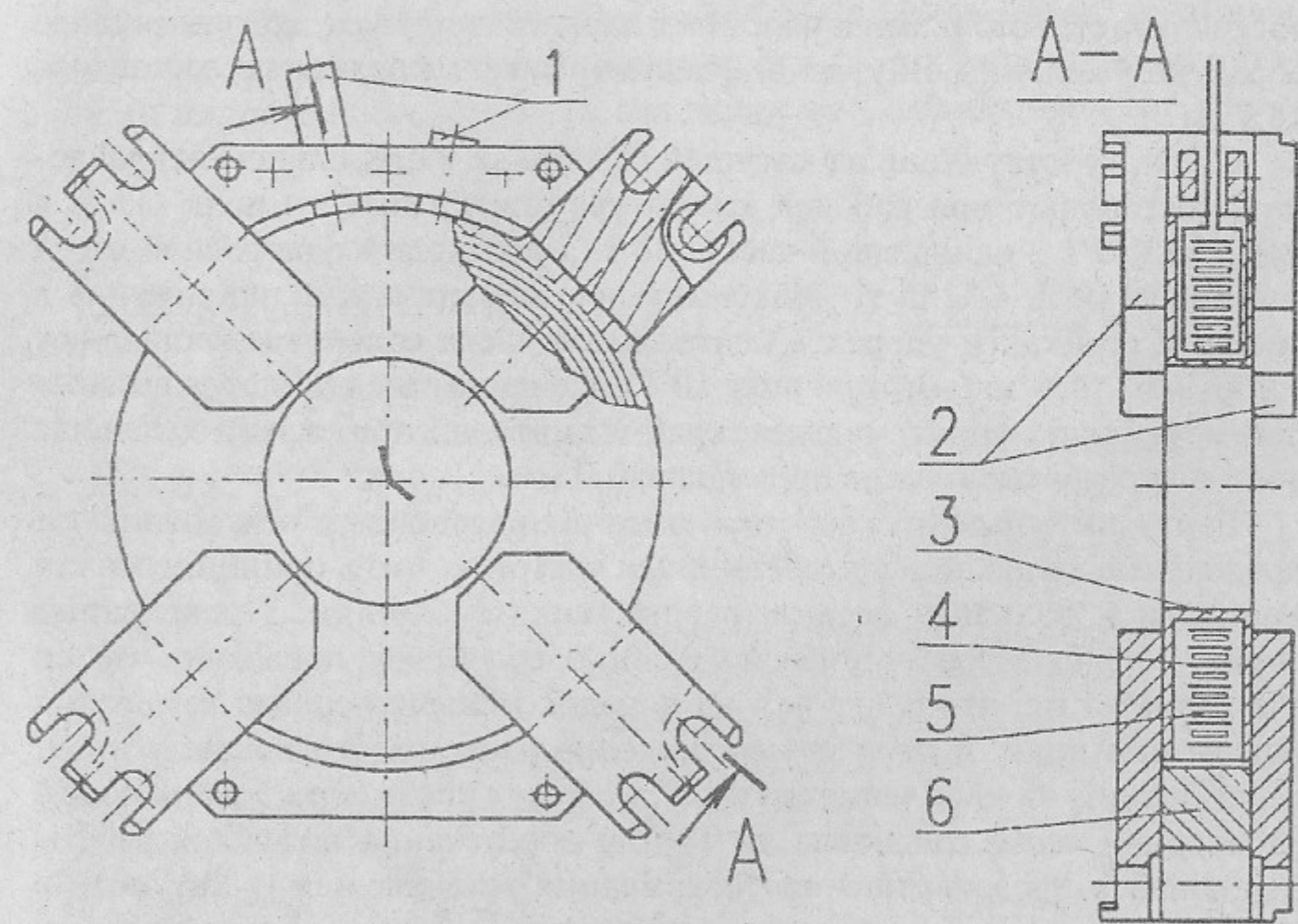


Рис. 2. Конструкция катушки соленоида:

1 — выводы; 2 — опорные стойки; 3 — каркас; 4 — межвитковая изоляция; 5 — медная лента; 6 — упоры.

Предельно достижимое поле в катушках определяется, в основном, прочностью используемого материала. Величина механических напряжений в катушках с учетом давления витков друг на друга была рассчитана по методике, аналогичной описанной в [10]. Касательные напряжения для этих катушек максимальны на внутренних витках и затем монотонно уменьшаются с радиусом. Предельно допустимая величина касательных напряжений в катушках для медной ленты составляет 35 кг/мм^2 [11] и достигается при поле 11 Т. (В катушке, работающей вне соленоида, предел прочности достигается при поле на оси 8 Т.) Предельное поле в пробочных катушках составляет 13,5 Т.

Соединение катушек в соленоид осуществляется с помощью опорных стоек, расположенных на каждой катушке. Стойки задают расстояние между катушками и одновременно обеспечивают их соосность. Стяжка катушек осуществляется болтами, позволяющими производить расстыковку соленоида в любой точке. Жесткость конструкции соленоида обеспечивается стойками и упорами в каркасах катушек, которые в сборе образуют 4 колонны. Внутренний диаметр катушек соленоида составляет 15,7 см.

Силы, действующие на катушки соленоида в продольном направлении, составляют при рабочей конфигурации магнитного поля (12 Т в пробках и 6 Т в однородной части) 53 т, а при поле в однородной части соленоида 10 Т — 145 т. Максимальные механические напряжения в опорных стойках и упорах в центральной части соленоида составляют $1,7 \text{ кг/мм}^2$ ($4,6 \text{ кг/мм}^2$ при поле 10 Т). Сечение стоек и упоров выбиралось из условия, чтобы смещение крайних катушек при сжатии соленоида в момент срабатывания не превышало 0,3 мм.

Ввиду импульсного характера питания соленоида в нем возникают продольные колебания на собственных частотах, что в принципе может привести к большим осевым разрывающим усилиям. Проведенные оценки периода собственных колебаний соленоида показали, что он составляет 4 мс, что более чем на порядок меньше периода изменения магнитного поля. В этом случае максимальные разрывающие усилия, действующие на крепление катушек, не будут превышать 5 т при поле в однородной части соленоида 10 Т. Для обеспечения надежной работы соленоида и предотвращения "открывания" стыков между катушками при срабатывании соленоида, в процессе сборки обеспечивалось предварительное натяжение стягивающих болтов с усилием 12 т.

Для размещения соленоида на экспериментальной площадке был выбран вариант потолочной подвески. С этой целью на каждой катушке имеются проушины, к которым могут крепиться подвески. Подвески располагаются на расстоянии 1 м одна от другой, могут перемещаться по

специальным направляющим для стыковки соленоида с ускорителем. Для равномерного распределения нагрузки между подвесками в последних предусмотрены опоры на тарельчатых пружинах.

Энергия, запасенная в магнитном поле соленоида $LI^2/2$, составляет 0,5 МДж на метр длины при рабочем поле на оси 6 Т. По ряду соображений систему питания соленоида целесообразно делать секционированной. Прежде всего это продиктовано тепловым режимом работы катушек и согласованием периодов изменения магнитного поля соленоида и ускорителя. Был выбран вариант, в котором две катушки соленоида должны подключаться к секции конденсаторной батареи, состоящей из 100 конденсаторов ИК-6-150. (Подробно устройство батареи описано в [5].) Длительность полупериода тока в этом случае составляет 25 мс, а нагрев катушек соленоида за один импульс не превышает 4° при поле 6 Т. Нагрев пробочных катушек составляет 20° . Секционирование питания соленоида позволяет, кроме того, снизить уровень энергии, выделяющейся в случае пробоя изоляции какой-либо из катушек, соединять катушки в различной последовательности, а также изменением зарядного напряжения получать в соленоиде как однородное поле, так и

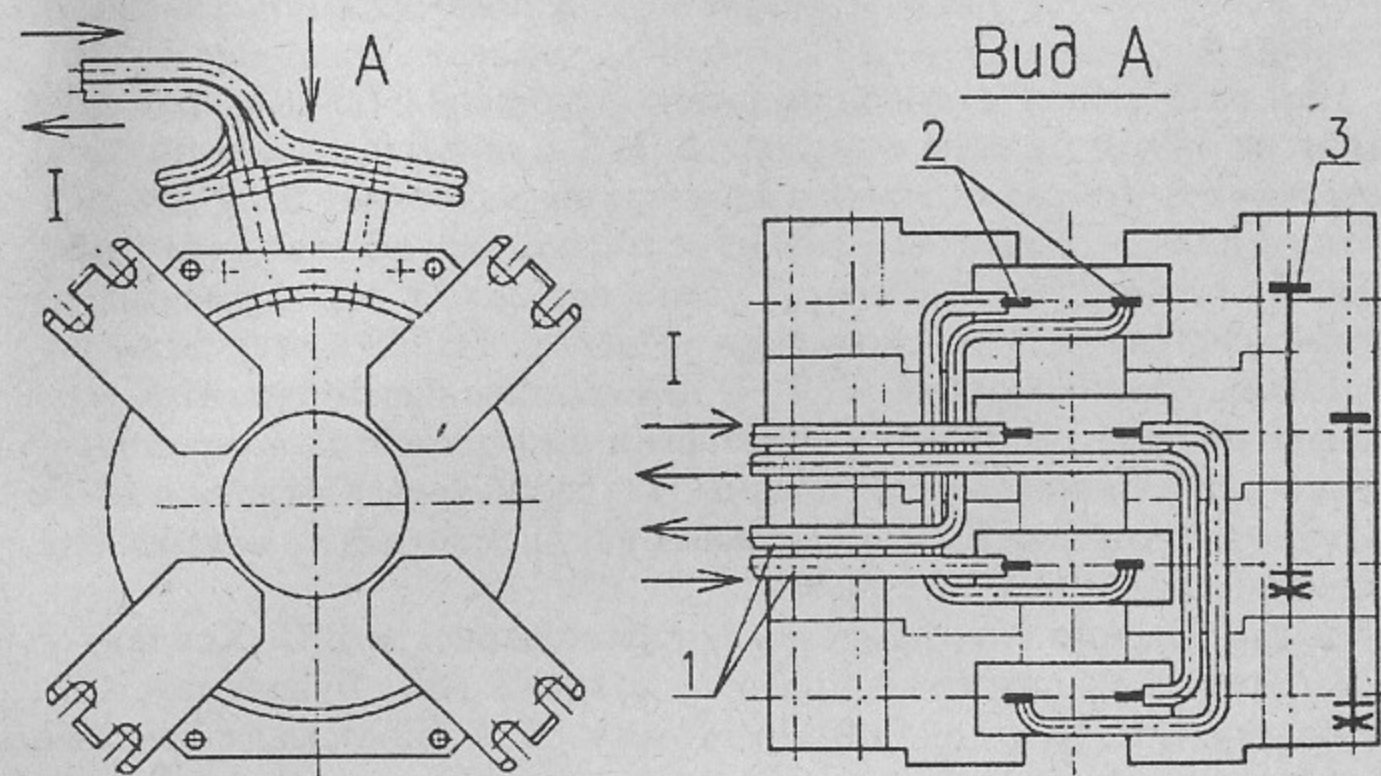


Рис. 3. Схема подключения питания к группе катушек: 1 — токопроводы; 2 — выводы катушки; 3 — стягивающие болты.

гофрированное. Для исключения попадания электронного пучка на стенки вакуумной камеры, при случайном отказе одной из секций батареи, катушки в парах соединены через одну.

Вследствие большой длины соленоида важным является вопрос "ухода" силовых линий магнитного поля из-за наличия токоподводов, дающих поперечную к оси составляющую магнитного поля. Если все соединительные провода расположить на внешнем радиусе катушек так, что ток будет направлен вдоль соленоида, то уход силовой линии составит 1,5 см на длине установки 7 м. Для исключения этого эффекта произведено максимально симметричное подключение питания катушек соленоида. Схема подключения показана на рис. 3. В результате уход силовых линий, определенный с помощью слаботоочного электронного пучка, не превышал 1 мм на длине установки.

С 1988 г. начата эксплуатация магнитной системы в составе установки ГОЛ-3. Соленоид испытан при магнитном поле 6,5 Т на однородном участке. Регулярные эксперименты ведутся при величине магнитного поля в соленоиде 5,5 Т и в пробочных катушках 12 Т. Что касается предельно достижимых полей в соленоиде, определяемых прочностью катушек, то были проведены специальные эксперименты на коротких участках соленоида, состоящих из 2 или 4 катушек. В этих экспериментах были использованы также и катушки из первого варианта соленоида длиной 1 м^{*)} [8].

Без разрушения катушек было получено поле 11,5 Т и проведена серия из 100 импульсов при поле 8 Т. Результаты этих испытаний показывают, что разработанная конструкция позволяет получать магнитные поля в соленоиде близкие к расчетным, определяемым прочностью используемой ленты, а магнитное поле в экспериментах по взаимодействию РЭП с плазмой на установке ГОЛ-3 может быть, по видимому, увеличено до 8-10 Т. С целью дальнейшего развития магнитной системы установки и постановки экспериментов по многопробочному удержанию нагретой плазмы [12] рассматривается возможность включения в соленоид дополнительных катушек меньшего внутреннего диаметра, создающих поле до 20 Т.

В заключение авторы выражают благодарность В.С. Койдану и Д.Д. Рютову за поддержку работы, а также А.В. Бурдакову, С.Г. Воропаеву, К.И. Меклеру, В.В. Поступаеву и М.А. Щеглову за полезные обсуждения.

^{*)} Испытания катушек первого варианта были проведены на установке У-1 с участием Б.А. Князева.

1. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Avrorov A.P. et al. Proc. 11th Intern. Conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Res., 1986. Kyoto. IAEA, Vienna, 1987, v.2, p.323.

2. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kapitonov V.A. et al. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1988, v.30, N.11, p.1571.

3. Воропаев С.Г., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Щеглов М.А. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1988, вып.3, с.26.

4. Burdakov A.V., Deulin Yu.I., Kapitonov V.A. et al. Proc. 19th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Belgrad, 1989, v.1, p.252.

5. Зоткин Р.П., Капитонов В.А., Койдан В.С. и др. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1990, вып.1, с.50.

6. Абрашитов Ю.И., Койдан В.С., Конюхов В.В. и др. ЖЭТФ, 1974, т.66, вып.4, с.1324.

7. Подыминогин А.А., Таубер М.В. ЖТФ, 1977, т.47, вып.9, с.1861.

8. Воропаев С.Г., Горбовский А.И., Князев Б.А. и др. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1986, вып.2, с.25.

9. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С. и др. Письма в ЖТФ, 1987, т.13, вып.7, с.431.

10. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. М.: Энергоиздат, 1983.

11. Машиностроительные материалы. Краткий справочник под ред. В.М.Раскатова, М.: Машиностроение, 1980.

12. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Письма в ЖЭТФ, 1971, т.14, с.320.

Ю.И. Деулин, С.В. Лебедев, В.С. Николаев,
Е.П. Семенов

Магнитная система плазменной установки
ГОЛ -3

Ответственный за выпуск: С.Г. Попов

Работа поступила 29 ноября 1990 г.

Подписано в печать 5.12 1990 г.

Формат бумаги 60 × 90 1/16. Объем 0,8 печ.л., 0,7 уч.-изд.д.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 141.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.