

42

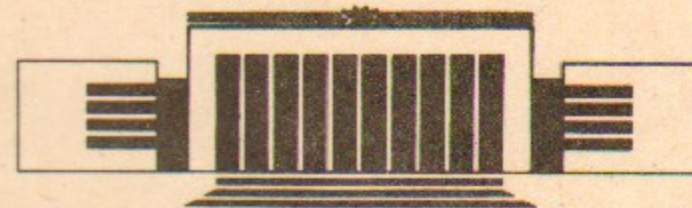


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.В. Бурдаков, А.Н. Драничников, В.С. Койдан,  
В.С. Николаев, В.В. Поступаев, М.В. Таубер

**ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА  
УСТАНОВКИ ГОЛ-3**

ПРЕПРИНТ 91-105



НОВОСИБИРСК

## ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ГОЛ-3

А. В. Бурдаков, А. Н. Драничников, В. С. Койдан,  
В. С. Николаев, В. В. Поступаев, М. В. Таубер

### Аннотация

Описана вакуумно-плазменная система установки ГОЛ-3, состоящая из вакуумной камеры с встроенными диагностиками, системы вакуумной откачки и системы создания предплазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО АН СССР сооружена и в 1988 г. запущена I очередь установки ГОЛ-3 [1], предназначенной для изучения нагрева плазмы мощным релятивистским электронным пучком (РЭП) микросекундной длительности. Итоги первых экспериментов, проведенных на этой установке, суммированы в работе [2]. Типичные условия, при которых проводились эксперименты, таковы: магнитное поле в соленоиде 5,5 Т и в пробках 10-12 Т, энергозапас в прошедшем через плазму пучке 30-100 кДж, плотность водородной плазмы  $(0,5-2) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Эта работа продолжает серию публикаций, посвященных описанию отдельных систем установки. Ранее уже были описаны генератор электронного пучка У-3 [3], конструкция магнитной системы [4], 10-МДж конденсаторная батарея для питания магнитного поля [5], система томсоновской диагностики плазмы [6]. Ниже будут описаны вакуумная система, включая систему откачки, вакуумную камеру и внутрикамерные диагностики, и система создания предварительной плазмы.

Эксперименты на установке ГОЛ-3 являются логическим продолжением экспериментов, проводившихся в ИЯФ ранее на установках меньшего масштаба, поэтому при проектировании указанных систем использовался опыт работы других плазменных установок, в первую очередь - установок ИНАР, ГОЛ-1, ГДЛ, У-1. Самое существенное отличие установки ГОЛ-3 от установок предыдущего поколения - существенно большая запасенная энергия как в пучке, так и в магнитном поле, что потребовало тщательного рассмотрения вопросов "живучести" систем при вероятных аварийных срабатываниях установки.

Поскольку установка ГОЛ-3 в принципе обладает уникальными возможностями по проведению различных физических и технологических экспериментов с электронным пучком, имеющим большое

энергосодержание (100 кДж и более за импульс), то описываемые системы строились с учетом их возможной быстрой адаптации к новым постановкам экспериментов, в том числе и не связанных прямо с основной задачей установки (нагрев плазмы при помощи РЭП).

#### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Упрощенная схема экспериментальной установки (в её части, касающейся плазменной системы) представлена на рис. 1. Типичный сценарий эксперимента следующий: после включения магнитного поля в вакуумной камере длиной 7 м, расположенной внутри соленоида, при помощи сильноточного прямого разряда создается предварительная водородная плазма. Затем в эту плазму через тонкую фольгу, расположенную во входной пробке, инжектируется РЭП. Пучок, проходя через плазму, нагревает её за счёт коллективных эффектов, а затем поглощается калориметром после выходной пробки.

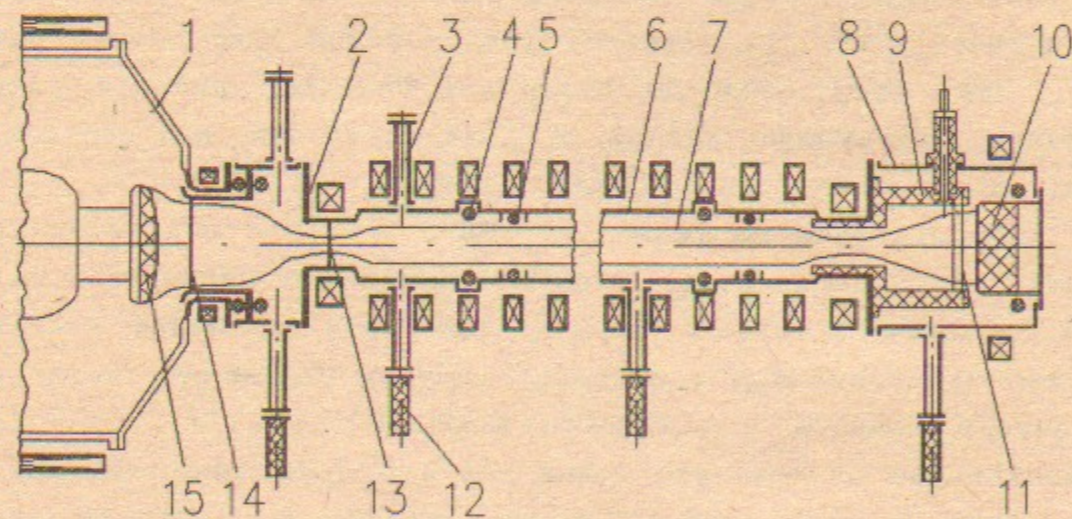


Рис. 1. Схема плазменной части установки ГОЛ-3. 1 - диодная камера генератора У-3; 2 - камера сжатия пучка; 3 - патрубков для напуска водорода; 4 - пояс Роговского; 5 - диамагнитный датчик и ограничивающие диафрагмы; 6 - вакуумная камера; 7 - граница электронного пучка; 8 - камера расширения пучка; 9 - узел создания предплазмы; 10 - калориметр; 11 - выходные фольги; 12 - гибкий вакуумный шланг; 13 - разделительная фольга; 14 - анодная фольга; 15 - катод.

Как видно из рис. 1, функционально установка состоит из нескольких объемов, в которых во время проведения эксперимента должно поддерживаться разное давление. В диодной камере происходит генерация электронного пучка при вакууме  $\sim 10^{-5}$  торр, затем пучок сжимается по сечению в 20 раз сходящимся магнитным полем в камере компрессии при вакууме  $\sim 10^{-4}$  торр, в плазменной камере рабочее давление водорода в зависимости от режима составляет  $10^{-3}-10^{-1}$  торр; в области калориметра требуется вакуум  $\sim 10^{-5}$  торр.

Отличительной особенностью экспериментов по пучковому нагреву плазмы является, как правило, наличие сгорающих во время выстрела фольг, разделяющих разные части вакуумной системы. Очевидным неудобством этого обстоятельства является необходимость напуска атмосферы в камеру после каждого выстрела для смены этих фольг (либо требуется разработка специальных систем для смены фольг без нарушения вакуума, что не всегда возможно). Продукты сгорания фольг, кроме того, загрязняют поверхность плазменной камеры.

Перечисленные выше особенности позволяют иметь предельный расчётный вакуум в установке всего лишь порядка  $10^{-5}$  торр при времени откачки около 1 часа, что определяет возможную частоту проведения экспериментов на установке ГОЛ-3 (фактически она ограничивается режимом работы радиационно-защищённого зала и составляет в среднем 2-3 срабатывания в сутки). Одной из особенностей экспериментов на установке ГОЛ-3 является работа с плазмой достаточно высокой плотности ( $n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), поэтому и требования к вакуумным условиям оказались достаточно мягкими. В отличие от установок с плазмой гораздо меньшей плотности в описываемой системе не требуется прогрева стенок вакуумной камеры или применения криопанелей для улучшения вакуумных условий.

#### ВАКУУМНАЯ КАМЕРА

Построение вакуумной камеры во многом определяется размерами и конструкцией соленоида, который состоит из отдельных многовитковых катушек, имеющих внутренний диаметр 157 мм и шаг

между катушками 110 мм. При проектировании камеры закладывались следующие технологические требования:

- камера должна выдерживать попадание пучка на стенку при частичном отказе магнитной системы;
- предельный рабочий вакуум  $10^{-5}$  торр;
- внутри камеры должны быть расположены пояса Роговского для измерения полного тока, протекающего по плазме, и диамагнитные петли для измерения энергосодержания плазмы;
- камера должна иметь достаточное количество диагностических и технологических окон;
- должна быть возможность смены части вакуумной камеры без её полной разборки и отсоединения всей диагностической аппаратуры (например, при аварии или при модернизации участка камеры).

Первое из этих требований приводит к тому, что, в отличие от установок предыдущего поколения ИНАР и ГОЛ-1, в качестве материала вакуумной камеры установки ГОЛ-3 выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н9Т, а не использовавшиеся ранее кварц или стекло. Это, с одной стороны, упрощает конструкцию вакуумной камеры (особенно с точки зрения технологичности); упрощает проблемы, связанные с необходимостью обеспечить надёжную малоиндуктивную цепь, замыкающую обратный ток пучка и разряда, создающего предплазму; улучшает электромагнитную экранировку аппаратуры от наводок, возникающих при прохождении РЭП по плазме. С другой стороны, возникают дополнительные сложности, связанные с необходимостью создания достаточно длинного шнура плотной предварительной плазмы в металлической камере в сильном магнитном поле и с возможным поступлением в плазму со стенок камеры примесей с большим Z. Кроме того, переход к металлической камере потребовал переноса части диагностик - поясов Роговского и диамагнитных петель - в вакуум, в непосредственную близость от плазмы и пучка.

Вакуумная камера изготовлена из немагнитной нержавеющей стали и имеет внутренний диаметр 102 мм. Для удобства в работе и простоты модернизации камера секционирована по длине, она состоит из 6 секций длиной 1100 мм каждая (что равно 10 межкатушечным интервалам соленоида) - см. рис. 2. Отдельные короткие

отрезки камеры служат для согласования плазменной камеры с пробочными участками магнитной системы.

Разработано несколько вариантов секций, отличающихся количеством диагностических окон и внутрикамерных диагностик. Простейшая секция содержит один оконный блок и один диагностический блок, состоящий из диамагнитной петли, пояса Роговского и ограничивающих диафрагм (конструкция диагностического блока будет описана ниже отдельно).

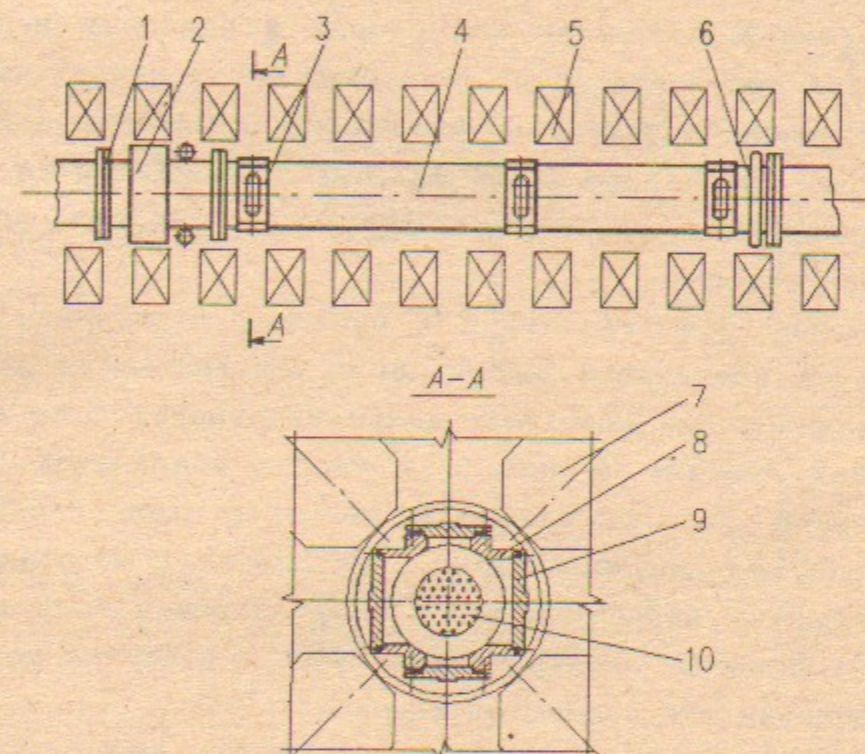


Рис. 2. Схема одной секции вакуумной камеры. Отдельно показано сечение камеры в месте расположения окон. 1 - вакуумное соединение секций; 2 - диагностический блок; 3 - оконный блок; 4 - вакуумная камера; 5 - катушка соленоида; 6 - гибкий сильфонный узел; 7 - элемент соленоида; 8 - оконный блок; 9 - заглушка; 10 - сечение электронного пучка.

Оконный блок имеет 4 окна, расположенных в одном диаметральном сечении камеры. К этим окнам подсоединяется как диагностическое, так и технологическое оборудование (система вакуумной откачки, напуск водорода и т.п.). Апертура окон ограничена конструкцией силовых элементов соленоида. Блок содержит

два окна круглой формы  $\varnothing 35$  мм и два овальных окна  $70 \times 30$  мм для диагностик, требующих хордовых измерений. На неиспользуемые окна устанавливаются заглушки, конструкция которых позволяет вдвигать вакуумную камеру в соленоид через торец без их снятия.

В пределах одной секции все оконные блоки имеют сварное соединение с прямолинейными отрезками камеры, а диагностические блоки, из-за сложности их быстрого ремонта, - разборное соединение, расположенное под катушкой соленоида. Соединение соседних секций допускает его сборку и разборку непосредственно внутри соленоида, т.е. для смены одной секции камеры или катушки соленоида достаточно раздвинуть соленоид на несколько сантиметров, после чего можно извлечь неисправную часть установки с минимальными отсоединениями диагностической аппаратуры и вакуумной системы.

Поскольку рабочий вакуум в камере относительно невысок, то вакуумные соединения выполнены с уплотнителями из резины. Важным моментом при конструировании уплотнений было обеспечение посадки металла на металл в местах соединений элементов камеры и окон. Так как в рабочем импульсе вдоль камеры протекает ток до нескольких десятков килоампер, а импульсное магнитное поле  $6 \text{ Т}$  наводит значительные вихревые токи по обходу камеры, то надёжный электрический контакт в местах всех соединений необходим для защиты от искрений.

Кроме указанных выше элементов каждая секция камеры содержит гибкий узел сильфонного типа. Этот узел разгружает вакуумную камеру от перенапряжений при её сборке и юстировке и, главное, при сжатии соленоида в момент срабатывания магнитного поля.

Таким образом, разработанная схема секционирования вакуумной камеры требует для каждой секции один (из 10) межкатушечный промежуток для технологических целей (место стыковки секций), и ещё один промежуток для вывода сигналов из каждого диагностического блока. В остальных межкатушечных промежутках при необходимости могут быть размещены диагностические окна.

#### ВНУТРИКАМЕРНЫЕ ДИАГНОСТИКИ

Как уже указывалось выше, переход к металлической камере потребовал перенести внутрь её такие стандартные для пучково-плазменных экспериментов диагностики, как диамагнитные петли и пояса Роговского. По технологическим соображениям оказалось удобным выделить эти относительно сложные участки камеры в специальный диагностический блок, конструкция которого представлена на рис. 3.

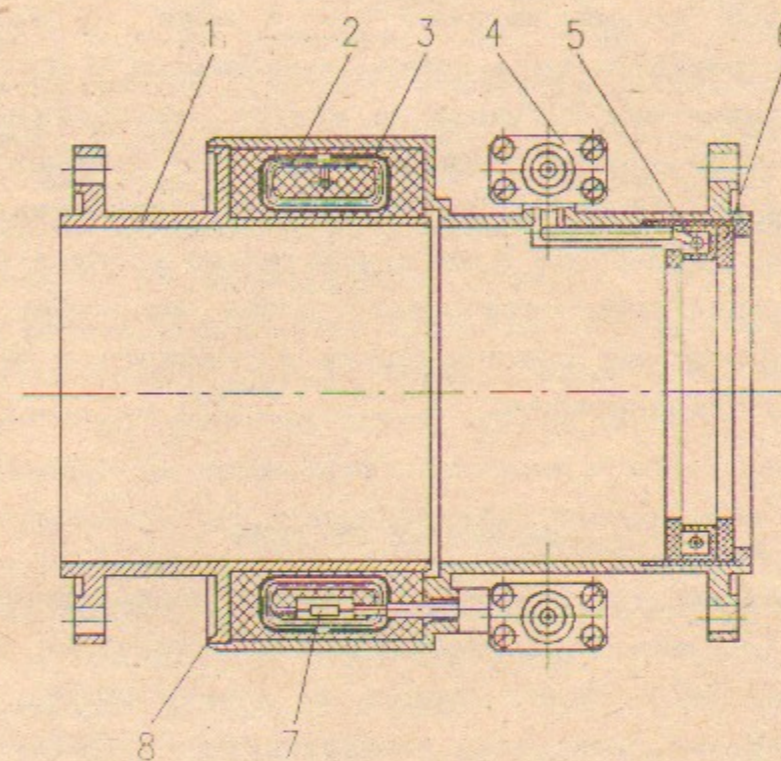


Рис. 3. Конструкция диагностического блока. 1 - корпус; 2 - пояс Роговского; 3 - электростатический экран; 4 - вакуумный разъем с двойной изоляцией; 5 - диамагнитный зонд; 6 - стеклянные диафрагмы; 7 - сопротивление нагрузки пояса; 8 - сварное соединение.

В состав диагностического блока обычно входит пояс Роговского и один или два диамагнитных датчика. Диамагнитные датчики имеют средний диаметр  $92$  мм и защищены от плазмы с двух сторон стеклянными диафрагмами апертурой  $80$  мм, а с торца -

эпоксидным компаундом<sup>1)</sup>. Диафрагмы также ограничивают область, занятую предварительной плазмой ( $\varnothing$  80 мм при диаметре пучка в камере около 60 мм), и "отрывают" её от металлических стенок камеры.

Пояс Роговского намотан проводом ПЭВ-2 на фторопластовом сердечнике без дополнительной изоляции между витками и нагружен на сопротивление около 1 Ом. Пояс используется в режиме самоинтегрирования. Собственное время пояса при оптимальном изготовлении по расчёту составляет около 70 мкс, а измеренное при специальной калибровке - 68 мкс.

Как диамагнитный датчик, так и пояс Роговского имеют двойные электростатические экраны и изолированы от камеры. Для вывода электрических сигналов из камеры разработаны малогабаритные вакуумно-плотные разъёмы с двойным экраном на основе байонетных разъёмов СР-50. Изоляция этих диагностик рассчитана и испытана на напряжение 6 кВ относительно корпуса камеры.

Конструкция диагностического блока допускает его трёхкратную разборку для ремонта пояса Роговского и многократный ремонт диамагнитного зонда.

#### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

На установке ГОЛ-3 можно проводить эксперименты в разных режимах, отличающихся количеством задействованных систем. Основными режимами, существенными с точки зрения построения вакуумной системы, являются: эксперименты по отработке генерации электронного пучка на генераторе У-3; эксперименты по изучению предварительной плазмы и отработке плазменных диагностик; эксперименты по нагреву плазмы пучком. В первом из этих режимов нужен вакуум, как правило, только в диодной камере; во втором - в остальных частях установки. При этих работах плазменная часть установки с соленоидом может быть отсоединена от

<sup>1)</sup> При проектировании блока предполагалось использование одновитковых диамагнитных датчиков, впоследствии на установке У-1 была разработана их четырёхвитковая модификация (см. [7]). Доработанные таким образом диамагнитные датчики использовались на установке ГОЛ-3 наряду с одновитковыми.

генератора У-3 и перемещена на расстояние 1-2 м. Эксперименты по нагреву плазмы пучком требуют поддержания рабочих давлений во всех частях установки.

Здесь описана та часть вакуумной системы установки, которая предназначена для работы с её плазменной частью. Вакуумная система генератора У-3 выполнена с применением сходных технических решений, причём предусмотрена как её отдельная, так и совместная с остальной вакуумной системой работа.

Как уже указывалось выше, вакуумная система должна обеспечивать два разных режима работы: быструю откачку установки после смены фольг до давления  $\sim 10^{-5}$  торр и рабочий режим, когда в разных частях установки создаётся различное стационарное давление. Нужно учесть также, что эти объёмы установки разделяются фольгами с толщиной  $\sim 10$  мкм и диаметром 80-250 мм, что требует точного выравнивания давления в разных частях установки во время форвакуумной откачки. В рабочем режиме плазменная камера заполняется водородом с небольшой скоростью обмена, в остальных частях установки скорость откачки уменьшается до величины, обеспечивающей нужное давление остаточного газа. Для уменьшения содержания примесей в плазме напуск водорода осуществляется через прогреваемый палладиевый натекагель.

При построении системы вакуумной откачки была выбрана схема с буферными объёмами, один из которых расположен между установкой и высоковакуумными насосами, а другой - между высоковакуумными и форвакуумными насосами. Эти объёмы конструктивно выполнены в виде труб, расположенных параллельно с установкой (см. рис. 4). Сечение труб выбрано из условия, чтобы проводимость вдоль трубы была много больше скорости откачки, что обеспечивает требуемое выравнивание давлений во время форвакуумной откачки.

Принципиальная схема вакуумной системы приведена на рис. 5. Установка соединена с промежуточной магистралью  $D_y 200$  при помощи гибких вакуумных шлангов сильфонного типа  $D_y 100$  длиной 3 м. Каждый такой шланг присоединяется к промежуточной магистрали через электромагнитный клапан КВУМ-63 или КВМ-63. Часть шлангов имеет второй, медленный канал откачки: КВУМ-63 шунтируются цепью, содержащей электромагнитный клапан КВУМ-16

и электромеханический натекатель НЭТ Ду1,6. Такая цепь используется в случае, если нужно сильно снизить скорость откачки (например, для напуска водорода на проток в плазменную камеру). Конструкция вакуумной системы позволяет подключать гибкие шланги в нескольких точках (сейчас на установке один гибкий шланг предназначен для откачки камеры сжатия пучка, два - для откачки и обеспечения нужного давления в плазменной камере, два - для откачки объема вблизи калориметра).

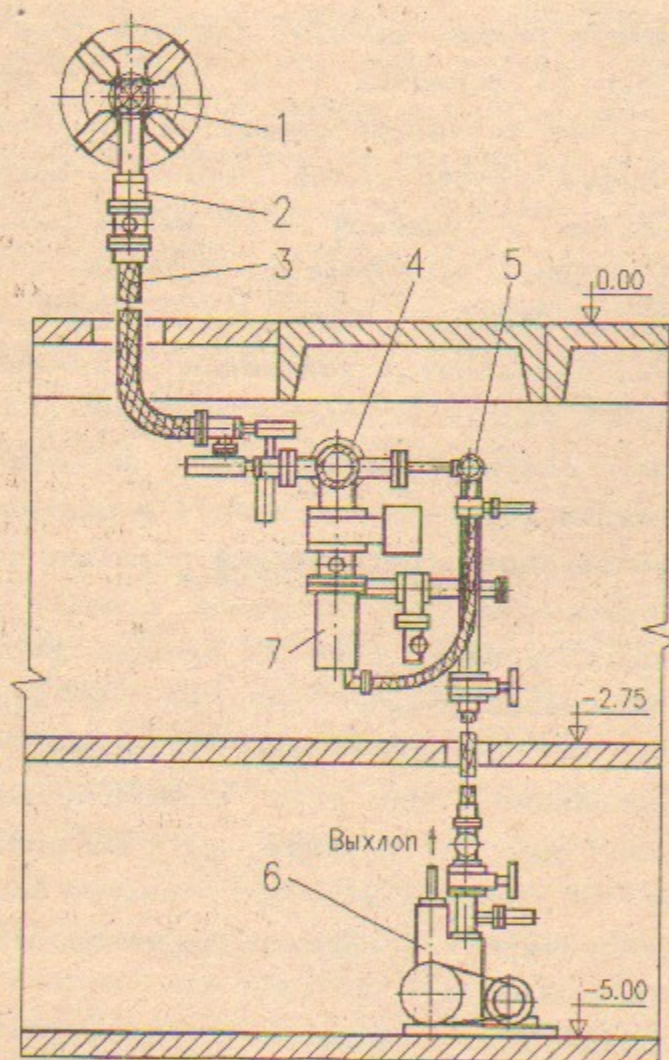


Рис. 4. Расположение системы вакуумной откачки на установке (сечение в плоскости, перпендикулярной оси соленоида). 1 - соленоид с вакуумной камерой; 2 - диэлектрическая развязка и блок манометрических ламп; 3 - гибкий вакуумный шланг Ду100; 4 - промежуточная магистраль; 5 - форвакуумная магистраль; 6 - форвакуумный насос НВ3-20; 7 - турбомолекулярный насос О1АБ-450.

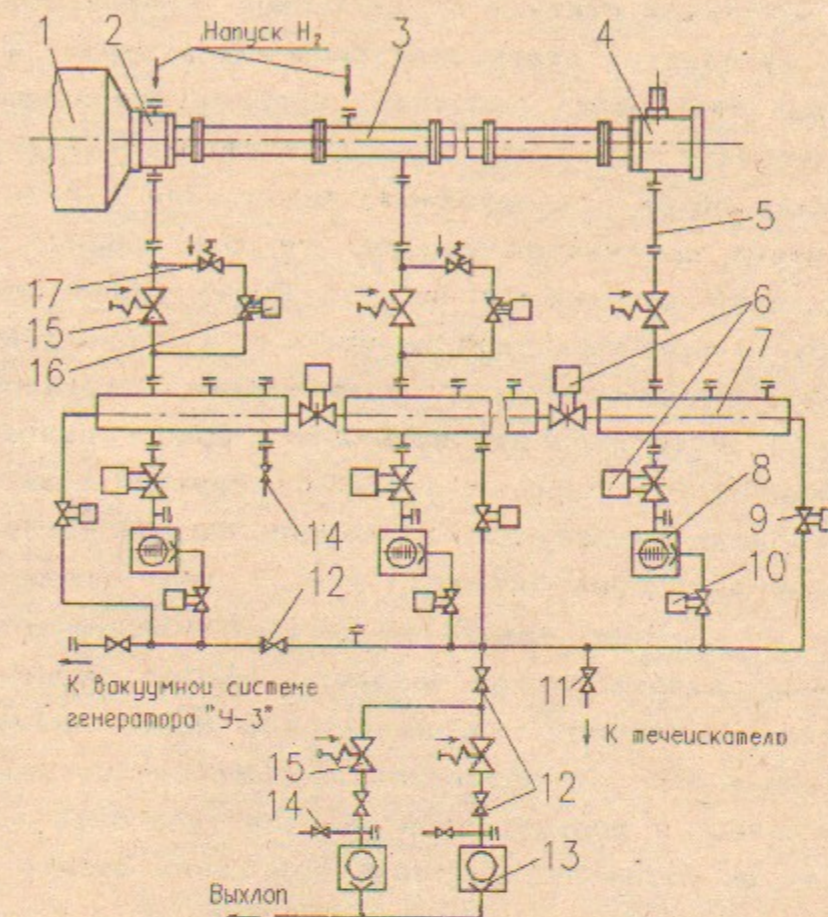


Рис. 5. Схема системы вакуумной откачки. 1 - диодная камера генератора У-3; 2 - камера сжатия пучка; 3 - вакуумная камера; 4 - камера расширения пучка; 5 - гибкий вакуумный шланг Ду100; 6 - электромеханический затвор ЗПТ-160; 7 - промежуточная магистраль; 8 - турбомолекулярный насос О1АБ-450; 9 - электромеханический вентиль ВЭП-50; 10 - электромеханический вентиль ВЭП-25; 11 - вентиль Ду25; 12 - вентиль ВРП-50; 13 - форвакуумный насос НВ3-20; 14 - клапан напуска атмосферы; 15 - электромагнитный клапан КВУМ-63; 16 - электромагнитный клапан КВУМ-25; 17 - натекатель НЭТ. Цепи измерения вакуума условно не показаны.

Использование гибких шлангов совместно с промежуточной магистралью позволило создать значительные удобства при работе на установке. Во-первых, они допускают смещение установки вдоль оси на расстояния до 1,5 м относительно проектного положения без отсоединения вакуумной системы. Это оказалось удобным и дало возможность проведения отладочных экспериментов. Во-вторых, оказалось возможным оперативно изменять место под-

соединения вакуумной системы к плазменной камере выбором одного из окон, не занятых диагностической аппаратурой. В-третьих, при аварийных ситуациях, например, прорыве атмосферы в установку, уменьшается вероятность крупных аварий вакуумных насосов. Поскольку объём промежуточной магистрали в несколько раз превышает объём плазменной камеры, то при прорыве атмосферы время нарастания давления в насосах будет увеличено за счёт большого объёма промежуточной магистрали и сравнительно малой скоростью поступления воздуха через гибкие вакуумные шланги. Этого времени достаточно для аварийного срабатывания клапанов КВУМ, отсекающих установку от системы вакуумной откачки.

Промежуточная магистраль разделена на три части электро-механическими затворами ЗПТ-160. Эти затворы открыты при откачке и при выключенной вакуумной системе и закрываются только на время эксперимента, когда требуется разное давление в различных частях установки<sup>2)</sup>. К магистрали после электро-механических затворов ЗПТ-160 подсоединены высоковакуумные турбомолекулярные насосы с вертикальным ротором типа О1АБ-450. В настоящее время на установке работает три таких насоса, ещё один смонтирован, но находится в "горячем" резерве, т.е. может быть включен в любой момент.

Выходы турбомолекулярных насосов после электро-механических вентилях ВЭП-25 присоединены к форвакуумной магистрали. При откачке системы с атмосферного давления форвакуумная и промежуточная магистрали соединяются при помощи электро-механических вентилях ВЭП-50. К форвакуумной магистрали через ручной вентиль ВРП-50 и гибкий вакуумный шланг  $D_{\text{у}} 70$  длиной 4 м подсоединены два форвакуумных насоса НВЗ-20, один из которых резервный. Каждый насос защищён своим клапаном КВУМ-63, срабатывающем при отключении или аварии в цепи питания насоса. Форвакуумная магистраль соединена также через ручной вентиль

<sup>2)</sup> Для нормальной работы установки в любом режиме разделение промежуточной магистрали на части не обязательно, поскольку скорость откачки и давление в каждой части установки может регулироваться выбором либо пути через КВУМ-63, либо через регулируемый натекаатель ПЭТ. Разделение уменьшает опасность крупной поломки в случае аварии или ошибки персонала.

ВРП-50 с форвакуумной системой генератора У-3.

Как видно из этого описания, выбранная схема вакуумной системы имеет большую гибкость с точки зрения количества используемого вакуумного оборудования. Минимальная конфигурация, в которой система ещё может выполнять все свои функции, следующая: один форвакуумный и один турбомолекулярный насосы со своей арматурой, и три гибких линии откачки - по одной на каждый объём плазменной части установки. При увеличении количества вакуумного оборудования легко добавляются стандартные цепи, увеличивающие скорость откачки, либо предназначенные для резервирования. В выбранной схеме достаточно просто также осуществить наращивание длины соленоида с плазменной камерой.

Большая часть вакуумной аппаратуры на установке имеет электрическое управление, что позволяет производить дистанционное управление вакуумной системой и её аварийное отключение. Все управляющие блоки и блоки питания О1АБ-450 размещены в двух стойках "ВИШНЯ", расположенных вблизи от вакуумной системы. Подготовлено управление вакуумной системой из пультной на расстоянии ~ 70 м при помощи стандартного для установки многоканального ВЧ кодирования и передаче управляющих команд по одному коаксиальному кабелю (подробнее о системе управления см. в [5]).

Измерение вакуума производится при помощи термопарных вакууметров типов РВТ-3 и 13ВТЗ-003 и магниторазрядных вакууметров ВМБ1/8. Форвакуум измеряется в каждом форвакуумном насосе, в форвакуумной магистрали, в каждом О1АБ-450 до и после насоса, в каждом отрезке промежуточной магистрали, в каждом гибком вакуумном шланге вблизи места подсоединения к установке и в нескольких специальных измерительных патрубках, расположенных вдоль установки. Точное знание давления водорода в камере существенно при проведении экспериментов; для более надёжного измерения этого давления Е. П. Семёновым разработан специальный механический вакууметр поплавкового типа, рассчитанный на измерение давлений в диапазоне около  $(0.5-5) \times 10^{-2}$  торр. Высокий вакуум измеряется перед каждым насосом О1АБ-450, в промежуточной магистрали и на гибких шлангах. Указанные вакууметры имеют электрический выход 0-10 В, информация о давлении в установке



передаётся с этого выхода в пультовую.

В целом, в процессе эксплуатации система показала свою надёжную работу. Предельный вакуум в О1АБ-450 при отсечённой промежуточной магистрали соответствовал паспортному, вакуум в плазменной камере при длительной откачке был лучше  $7 \times 10^{-6}$  торр, обычно откачка ведётся до давления  $(1-2) \times 10^{-5}$  торр. Время готовности установки от включения форвакуумного насоса до получения рабочего вакуума составляет около 1 часа.

Кроме описанной системы, на установке смонтирован отдельный передвижной вакуумный пост, состоящий из турбомолекулярного насоса О1АБ-450, форвакуумного насоса 2НВР-5ДМ и соответствующей вакуумной арматуры. Этот пост используется при различных наладочных работах.

#### СИСТЕМА СОЗДАНИЯ ПРЕДПЛАЗМЫ

Для получения предварительной ("мишенной") плазмы, в которую инжектируется электронный пучок, выбрана схема с прямым сильноточным разрядом в водороде. Причины такого выбора, модельные эксперименты на установке меньшего масштаба ИНАР и результаты первых экспериментов по получению плазмы на ГОЛ-3 опубликованы в [8].

Наличие мощного электронного пучка внесло определённые особенности в построение системы образования предплазмы. Удельная энергия, оставляемая электронным пучком в веществе, велика. Поэтому любой тонкий материальный объект, помещённый под пучок внутри плазменной камеры, разрушается за один импульс в результате испарения или ударной волны, в зависимости от его толщины (здесь тонким считается объект с толщиной, меньшей пробега электронов пучка в его материале). С другой стороны, использование толстых электродов-поглотителей недопустимо, поскольку на выходе из плазменной камеры расположен приёмник-калориметр, при помощи которого определяется энергоёмкость пучка после взаимодействия с плазмой и ряд других его характеристик дополнительными диагностиками. С диагностической точки зрения между приёмником пучка и плазмой должно находиться минимальное количество вещества, однако недопустимо

попадание нагретой плазмы на приёмник.

Для разрешения этих противоречивых требований была выбрана схема с расположением высоковольтного электрода - катода прямого разряда за выходной пробкой в спадающем магнитном поле. При этом удельное энерговыделение в материале электрода на единицу площади падает и оказывается возможным размещение электрода непосредственно в сечении, занятом пучком. Схема этого узла приведена на рис. 6. На высоковольтный электрод подаётся импульс высокого напряжения от конденсаторной батареи через ионитронный разрядник. Для получения плазмы различной плотности и степени ионизации оказалось удобным использовать конденсаторные батареи с различным рабочим напряжением и ёмкостью. В экспериментах с плазмой плотностью до  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> использовалась батарея 3 мкФ, 100 кВ; для плазмы с более высокой плотностью применялись батареи 18 мкФ, 50 кВ и 168 мкФ, 10 кВ.

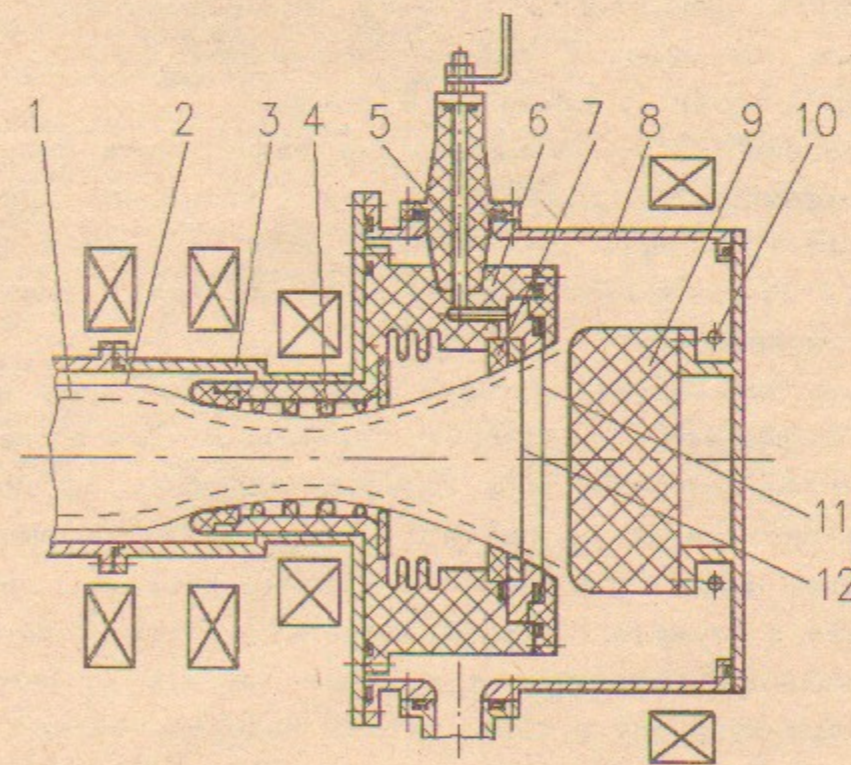


Рис. 6. Система создания предплазмы. 1 - граница электронного пучка; 2 - граница предварительной плазмы; 3 - вакуумная камера; 4 - графитовые диафрагмы; 5 - высоковольтный ввод; 6 - изолятор; 7 - керамическая диафрагма; 8 - вакуумный бак камеры расширения пучка; 9 - калориметр-приёмник пучка; 10 - пояс Роговского; 11 - вакуумно-плотная разделительная фольга; 12 - графитовая ткань.

Условиям экспериментов на ГОЛ-3, как было показано в [8], соответствует спадающая ветвь кривой Пашена. Это означает, что пробивное напряжение падает с ростом давления, или, что то же самое, при постоянном давлении быстрее пробивается более длинный промежуток. Поэтому после подачи на катод разряда высокого напряжения пробой происходит не на приёмник пучка, а на длину 7 м вдоль установки. Анодом разряда служит заземлённый корпус вакуумной камеры.

Особенностью системы является также то, что разряд горит через пробку магнитной системы. Напомним, что магнитное поле в месте расположения фольги 0,8 Т, в однородной части соленоида 6 Т, а в пробке - до 12 Т. Для того, чтобы стабилизировать разряд в пробке и не дать току замкнуться на металлические стенки камеры поперёк магнитного поля вблизи пробки, были предусмотрены графитовые диафрагмы, расположенные в около-пробочной области и изолированные друг от друга и от стенок. Диаметр этих диафрагм и диаметр высоковольтного электрода согласованы по силовым линиям магнитного поля с диаметром ситалловых диафрагм в плазменной камере.

В многочисленных экспериментах измерениями было показано наличие стабильности разряда по длине установки. Не замечено токов утечки поперёк магнитного поля в однородной части соленоида. Образующаяся предварительная плазма имеет хорошую степень однородности.

В качестве высоковольтного электрода применена комбинация из двух элементов. Со стороны приёмника пучка расположена фольга из алюминированного лавсана толщиной 12 мкм, а на небольшом расстоянии от неё в сторону плазмы помещена графитовая ткань, которая и является катодом разряда. Смысл такой конструкции в следующем. Графитовая ткань состоит из отдельных нитей толщиной менее 10 мкм и имеет "рыхлую" структуру. Оба этих фактора приводят к тому, что из использованных нами материалов графитовая ткань имеет максимальную стойкость к импульсному нагреву, она может пропускать через себя электронный пучок и принимать вылетающую из установки нагретую плазму без разрушения (напомним, что удельное энерговыделение на поверхность снижено ещё и расположением в слабом магнитном поле).

Кроме того, большое количество микроострий облегчает формирование однородного разряда по всей поверхности ткани. Однако графитовая ткань не является вакуумно-плотной, поэтому за ней расположена уплотняющая лавсановая фольга, которая разрушается проходящим пучком в каждом импульсе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана, изготовлена и введена в постоянную эксплуатацию вакуумная система установки ГОЛ-3, включающая в себя вакуумную камеру, внутрикамерные диагностики и систему вакуумной откачки. Система отличается гибкостью, возможностью простого резервирования важнейших систем и простым управлением. Достигнуты проектные параметры: предельный и рабочий вакуум, рабочее давление водорода, время готовности установки.

Внутрикамерные диагностики используются в экспериментах и имеют параметры, соответствующие расчётным.

Разработана система создания предварительной плазмы при помощи сильноточного прямого разряда в металлической камере в сильном магнитном поле. Заложенные технические решения позволили использовать эту систему в экспериментах по нагреву плазмы сильноточным релятивистским электронным пучком.

С осени 1988 г. на установке ГОЛ-3 проводятся физические эксперименты.

Авторы благодарны за сотрудничество команде комплекса ГОЛ-3, частью которого являются описанные в этой работе системы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. 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. New experimental results on beam-plasma interaction in solenoids // Plasma Physics and Contr. Fusion (Proc. 15 Europ. Conf., Dubrovnik, 1988) - Vol.30, N 11, p.1571-1588.
2. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Chikunov V. V., Kapitonov V. A., Knyazev B. A., Koidan V. S., Konyukhov V. V., Lebedev S. V., Mekler K. I., Melnikov P. I., Nikolaev V. S., Postupaev V. V., Ryutov D. D., Semenov E. P., Shcheglov M. A., Sinitskij S. L., Voropaev S. G., Yushkov M. V. GOL-3 programme // Proc. 8 Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. - Novosibirsk, 1990. - Vol.1, p.14-25.
3. Ворopaев С.Г., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Щеглов М.А. Генератор мощного РЭП микросекундной длительности // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1988, вып.3, с.26-28.
4. Деулин Ю.И., Лебедев С.В., Николаев В.С., Семенов Е.П. Магнитная система плазменной установки ГОЛ-3. - Новосибирск, 1990. - 9 с. - (Препринт/Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 90-141).
5. Зоткин Р.П., Капитонов В.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Макаров А.Г., Меклер К.И., Николаев В.С., Перин С.С., Фирулев К.Н. 10-МДж конденсаторная батарея для питания соленоида установки ГОЛ-3 // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1990, вып.1, с.50-54.
6. Бурдаков А.В., Поступаев В.В., Семенов Е.П. Система измерения температуры плазмы по  $90^\circ$  томсоновскому рассеянию на установке ГОЛ-3. - Новосибирск, 1991. - 21 с. - (Препринт/Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 91-33).
7. Князев Б.А., Мельников П.И., Чукунов В.В. Транспортировка 100-килоджоульного микросекундного РЭП в метровом соленоиде. - Новосибирск, 1988. - 24 с. - (Препринт/Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 88-76).
8. Burdakov A. V., Deulin Yu. I., Kapitonov V. A., Koidan V. S., Kondratuev A. A., Konyukhov V. V., Lebedev S. V., Makarov A. G., Mekler K. I., Nikolaev V. S., Perin S. S., Postupaev V. V., Semenov E. P., Tauber M. V., Voropaev S. G. Production of 7 m-long plasma column in a metallic chamber in a strong magnetic field // Proc. 19 Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. - Belgrade, 1989.- Vol.1, p.252-253.

А.В.Бурдаков, А.Н.Драничников, В.С.Койдан  
В.С.Николаев, В.В.Поступаев, М.В.Таубер

ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ГОЛ-3

Препринт  
№ 91-105

Работа поступила - 3 октября 1991 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов  
Подписано к печати - 10.X.1991 г.  
Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1,8 печ.л., 1,5 учетно-изд.л.  
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 105

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90