



Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

*Б. 84
1999*

А.В. Брагин, Ю.С. Попов

КРИОВАКУУМНАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

ИЯФ 99-27

<http://www.inp.nsk.su/publications>



НОВОСИБИРСК

1999

+

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

А.В. Брагин, Ю.С. Попов

КРИОВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ
УСТАНОВОК .

ИЯФ 99-27

НОВОСИБИРСК

1999

Криовакуумная система для термоядерных установок

А.В. Брагин, Ю.С. Попов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Рассматривается схема обеспечения вакуумных условий термоядерных установок на основе криогенных насосов заливного типа. Описан опыт работы криовакуумной системы термоядерной установки ПСП-2 (ПСП-2М), который показал, что использование крионасосов в качестве основных средств откачки установки было адекватным решением. На основе этого для установки Водородный Прототип предложена криовакуумная схема и описана методика её эксплуатации.

Cryovacuum system for thermonuclear installations

A.V. Bragin, Yu.S. Popov

*The Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia*

Abstract

The based on the pool type cryopump conception to provide the vacuum conditions in thermonuclear installations is considered. The experience of the work of the cryovacuum system in the thermonuclear installation PSP-2 (PSP-2M) is described, which has shown that the use of the cryopumps as the main means of pumping in the installation was an adequate decision. On this base the cryovacuum scheme for the Hydrogen Prototype installation is proposed and its main operational modes are described.

Введение.

Создание термоядерных реакторов является одним из перспективных направлений развития современной науки и техники, с ними связывают надежды на получение практически неиссякаемой и экологически чистой энергии. Однако создание и эксплуатация реакторов будут осуществимы только при выполнении определенной совокупности технических требований, которые при сегодняшнем уровне развития промышленности и технологий пока не могут быть удовлетворены полностью. Одна из таких проблем относится к проблеме обеспечения вакуумных условий в термоядерных установках.

В данной работе рассматривается концепция обеспечения вакуумных условий термоядерной установки с помощью криогенных насосов заливного типа. Такие насосы были созданы в ИЯФ СО РАН и эксплуатировались на исследовательской термоядерной установке ПСП-2 (ПСП-2М) в течение 10 лет; описан опыт работы и сделаны предложения по дальнейшему усовершенствованию системы криовакуумной откачки. На основе этого предложена криовакуумная система для установки "Водородный Прототип". Описана работа вспомогательного криовакуумного агрегата, являющегося частью этой системы, на котором были отработаны все режимы обеспечения работы криогенных насосов.

1. Обеспечение вакуумных условий в термоядерных установках.

1.1. Основные требования к вакууму в термоядерных установках.

В наиболее общем случае вакуумные параметры зависят от типа установки, энергии ионов, времени жизни плазмы, рабочего газа и других факто-

ров, но основные вакуумные условия сводятся к следующему. Необходимо иметь как можно более легкие составляющие газа в вакуумном объеме установки при давлении остаточного газа не выше 10^{-8} Па, поскольку молекулы остаточного газа охлаждают горячую плазму за счет перезарядки, а также являются источником мощного тормозного излучения. Потери на излучение горячей плазмы могут быть сравнимы с энергией синтеза, например относительная концентрация $\sim 10^{-1}$ He или $\sim 10^{-4}$ Me является критической. Также следует заметить, что стенки вакуумной камеры подвержены воздействию потоков частиц большой энергии, поэтому сами являются мощным источником потоков десорбированных молекул, что накладывает серьезные ограничения на использование средств откачки, особенно тех, которые не могут работать в магнитном поле и загрязняют вакуумный объем. Дополнительные сложности возникают также при работе со смесью D-T, когда различные элементы термоядерной установки подвержены облучению потоком нейтронов с энергией около 14 МэВ, при этом отдельной проблемой становится откачка и удаление из вакуумного объема тяжелых изотопов водорода и гелия. К тому же сегодня не исключается работа термоядерного реактора на основе реакции синтеза D- 3 He [1]. Последнее обстоятельство вносит дополнительную проблему удаления и утилизации легкого изотопа гелия.

Обеспечение основных вышеперечисленных вакуумных условий в термоядерных установках напрямую связано с принятой совокупностью средств вакуумной откачки. Выбор средств откачки играет важную роль, поскольку не каждое средство обеспечения вакуума способно выдержать данные условия работы. Прежде всего, средства откачки должны обладать большой производительностью в диапазоне давлений 10^{-3} - 10^{-7} Па. При откачке изотопов водорода они должны достаточно легко от него освобождаться, не образуя химических соединений с ним. Вакуумные средства должны также иметь сравнительно большой ресурс бесперебойной и надежной работы в течение всего времени эксплуатации термоядерной установки, т.к. их замена практически исключена. Также немаловажное значение имеет экономичность выбранных средств откачки.

Сегодня в качестве основных средств откачки криогенные насосы рассматриваются как наилучший вариант решения вакуумных проблем термоядерного реактора, который, независимо от них, будет иметь криогенную систему для обеспечения работы сверхпроводящих магнитов и других целей, при этом затраты криогенной мощности на поддержание вакуума будут составлять несопоставимо меньшую часть.

1.2. Особенности работы криогенных заливных насосов.

Криогенный насос производит откачку газа за счет эффекта конденсации молекул на охлажденной поверхности (криоповерхности). Сконденсированные молекулы связаны между собой силами Ван-дер-Ваальса, а слой конденсата называется криосадком. С понижением температуры криоповерхности равновесное давление насыщенных паров над ней будет уменьшаться, см. рис. 1. На приведенной диаграмме видно, что, например, при температуре криоповерхности ~ 20 К давление насыщенных паров большинства газов не будет превышать $\sim 10^{-8}$ Па, за исключением изотопов водорода и гелия. Однако при дальнейшем понижении температуры криоповерхности давление насыщенного пара изотопов водорода можно снизить до приемлемого уровня, в то время как давление паров гелия будет достаточно высоким. Ниже будет показано, что изотопы гелия могут быть эффективно удалены с помощью криогенных средств откачки.

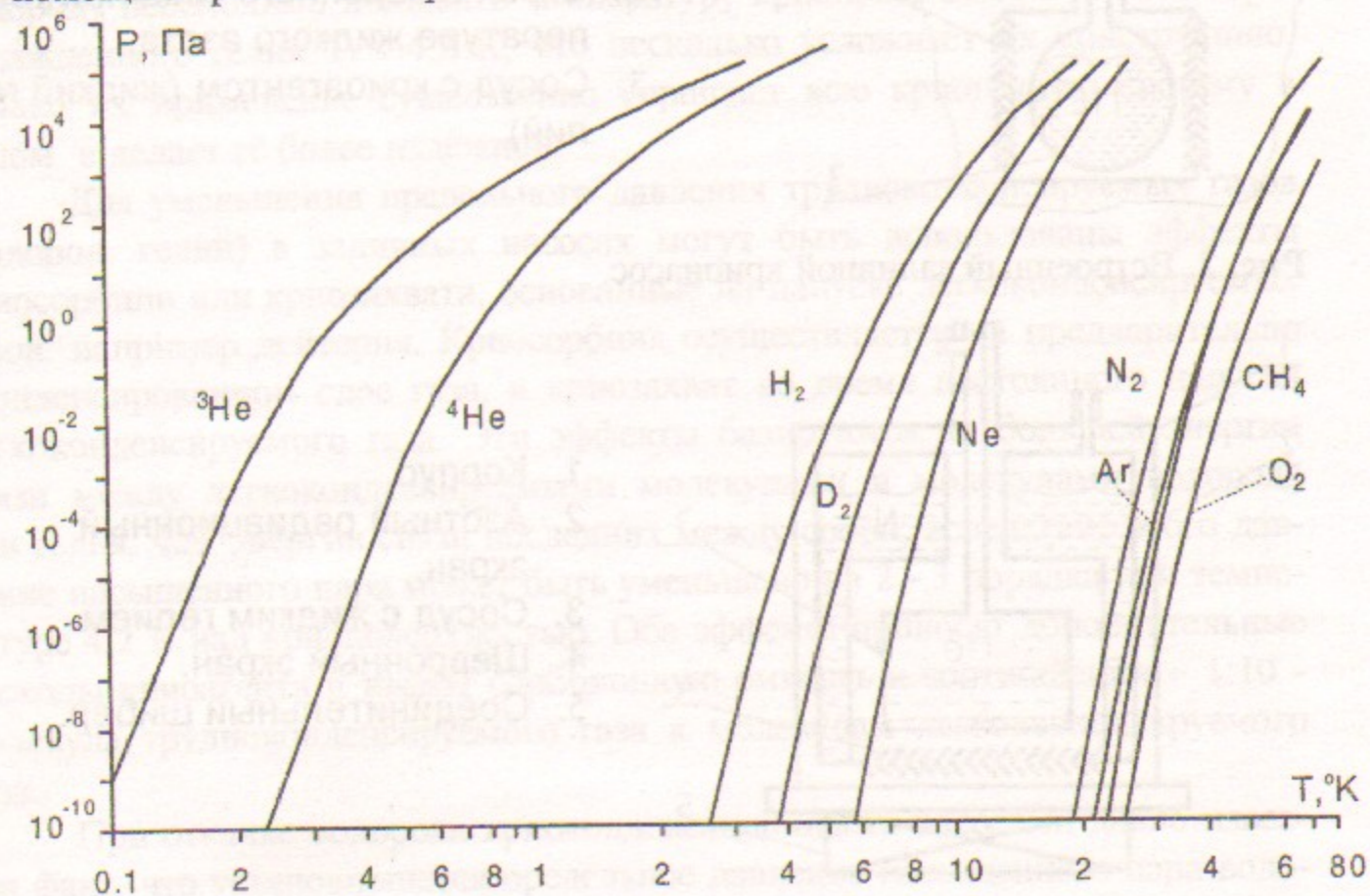
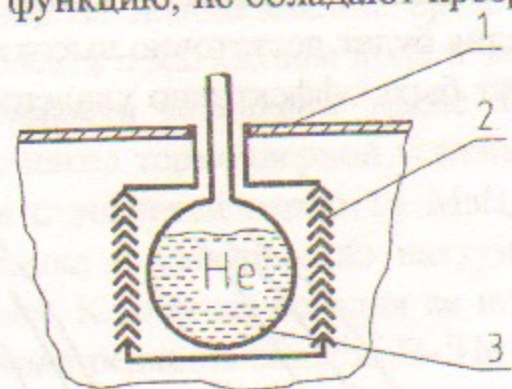


Рис. 1. Кривые давлений насыщенных паров в зависимости от температуры.

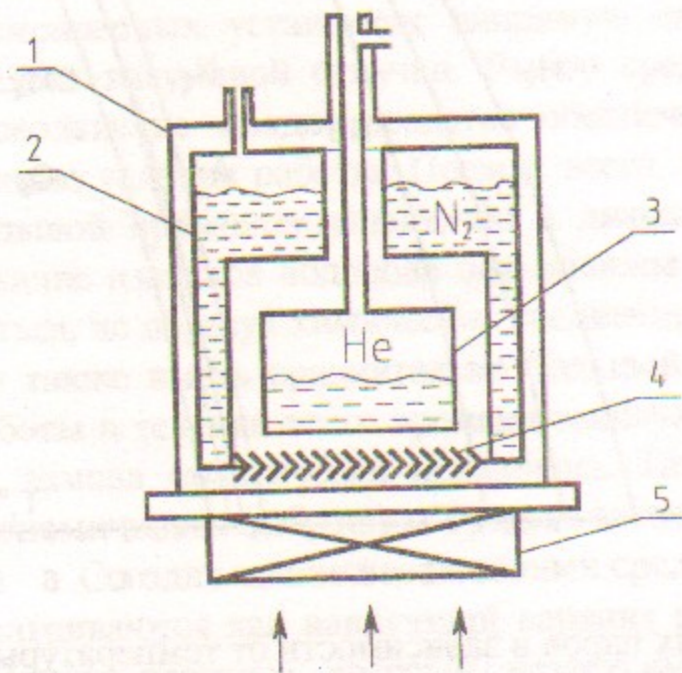
В данной работе рассматриваются крионасосы заливного типа, которые, по мнению авторов, наиболее приемлемы для обеспечения вакуумных условий в термоядерных установках. Конструктивно криоповерхность в таких насосах, как правило, является частью поверхности сосуда наполненного

криогенной жидкостью. По принципу устройства заливные насосы могут быть встроенные и выносные; у первых криоповерхность размещена внутри вакуумной камеры установки, у вторых - снаружи в специальном объеме-корпусе, который подсоединяется к вакуумной камере через соединительный шибер. Встроенные крионасосы имеют большую удельную скорость откачки, чем выносные, однако последние могут регенерировать встроенные крионасосы [2]. Простейшая конструкция встроенного крионасоса показана на рисунке 2. На рисунке 3 показан выносной криогенный насос. Радиационные экраны в крионасосах служат для уменьшения теплопритоков от теплового излучения к сосуду с жидким гелием; экраны шевронного типа имеют ту же функцию, но обладают прозрачностью для молекул откачиваемого газа.



1. Вакуумный объем.
2. Экран шевронного типа при температуре жидкого азота.
3. Сосуд с криоагентом (жидкий гелий).

Рис. 2. Встроенный заливной крионасос.



1. Корпус.
2. Азотный радиационный экран.
3. Сосуд с жидким гелием.
4. Шевронный экран.
5. Соединительный шибер.

Рис. 3. Выносной заливной крионасос.

Скорость откачки крионасоса определяется: $S_o = \beta \alpha_x A_x v / 4$, где β - вероятность прохождения частицы через шевронные экраны, A_x - площадь криоповерхности, v - средняя скорость частиц, α_x - коэффициент прилипа-

ния, пропорциональный $(1 - p_k/p_r)$, p_k - давление насыщенных паров при температуре криоповерхности, p_r - давление откачиваемого газа.

Рабочие характеристики криоконденсационных заливных насосов обладают заметным преимуществом перед другими типами насосов: они просты в изготовлении и более надежны в работе, не требуют особого внимания при обслуживании, обладают стабильной скоростью откачки в широком диапазоне давлений, легко регенерируются, конденсат в них имеет емкость, превосходящую емкость любого пористого тела; во время работы реактора можно легко производить рециркуляцию нужных изотопов водорода и/или гелия. Основной недостаток этих насосов связывают с неэкономичностью их функционирования: однако при использовании энтальпии испаряющегося хладагента их экономичность может быть существенно улучшена. К другому недостатку относят то, что для обеспечения низкого остаточного давления по водороду необходимо понижать температуру криоповерхности за счет переохлажденного гелия $T < 4,2$ К, что несколько усложняет их конструкцию, однако их применение существенно упрощает всю криогенную систему в целом и делает её более надежной.

Для уменьшения предельного давления трудноконденсируемых газов (водород, гелий) в заливных насосах могут быть использованы эффекты криосорбции или криозахвата, основанные на напуске легкоконденсируемых газов, например дейтерия. Криосорбция осуществляется на предварительно сконденсированном слое газа, а криозахват во время постоянного напуска легкоконденсируемого газа. Эти эффекты базируются на большей энергии связи между легкоконденсируемыми молекулами и молекулами водорода или гелия, чем энергии связи последних между собой; вследствие этого давление насыщенного пара может быть уменьшено на 2 - 3 порядка при температуре 4,2 К над криоповерхностью. Оба эффекта приносят дополнительные расходы криоагента и имеют сорбционную емкость в соотношении ~ 1:10 - молекула трудноконденсируемого газа к молекулам легкоконденсируемого газа.

При откачке водорода криоконденсационными насосами давно известен факт, что установившееся предельное давление насыщенного пара водорода над криоповерхностью существенно превосходит ожидаемое в соответствии с рис. 1. Данное обстоятельство связывают с поглощением криосадком излучения от радиационного экрана при температуре ~ 77 К, приводящего к уменьшению коэффициента прилипания [3]. Этого можно избежать, применяя дополнительный радиационный экран или осуществляя переохлаждение жидкого гелия за счет откачки его паров [4].

Перечисленные положительные особенности работы криогенных заливных насосов проявляются в полной мере именно в термоядерных установках и тем самым делают их практически безальтернативными средствами обеспечения вакуума, особенно на этапе строительства исследовательских установок.

2. Криовакуумная система установки ПСП-2.

2.1. Описание установки ПСП-2 (ПСП-2М).

С 1979 по 1990 гг. в ИЯФ эксплуатировалась термоядерная установка ПСП-2 (модернизированный вариант ПСП-2М). Установка является открытой ловушкой с вращающейся плазмой [5]. В 1989-1990 гг. были проведены эксперименты с "горячей" водородной плазмой. Условия экспериментов и параметры установки были следующими.

Аксиально-симметричное магнитное поле имело величину 0.4 - 5 Т в области центральной плоскости; пробочное отношение 2.4, расстояние между пробками 0.16 м. В области пробок этой установки создается радиальное электрическое поле системой электродов, обеспечивающих радиальную разность потенциалов до 0.5 - 1 МВ. Система высоковольтного питания размещена в цилиндрическом блоке, находящемся под давлением элегаза (SF_6) около 2 атм. Объем центральной части вакуумной камеры составляет $\sim 0.6 \text{ м}^3$, суммарный объем $\sim 3 \text{ м}^3$. Эксперименты проводились в импульсном режиме при начальном вакууме $\sim 10^{-5}$ Па по водороду. Количество напускаемого водорода через 6 клапанов составляло $(0.5-1.2) \cdot 10^{-2}$ Па \cdot м³. Промежуток между выстрелами составлял около 2 мин. Была достигнута энергия ионов до 100 кэВ, плотность плазмы $3 \cdot 10^{11}$ см⁻³, объем плазмы между лайнерами $\sim 0.2 \text{ м}^3$. Плазма образовывалась за счет ионизации и нагрева инжектируемого нейтрального газа в скрещенных магнитном и электрическом полях. Время жизни частиц составляло $\sim 10^{-4}$ с и определялось перезарядкой на остаточном газе. Оценки показывают, что потоки быстрых частиц на стенки были соизмеримы с потоками в полномасштабных термоядерных установках.

2.2. Вакуумная система установки ПСП-2 (ПСП-2М).

Во время запуска установки её вакуумная система была несколько раз модифицирована, что позволило накопить определенный опыт работы и дает возможность построить концепцию обеспечения вакуумных условий в термоядерных установках.

Особенностью вакуумной системы установки ПСП-2 является непрогреваемость вакуумной камеры при достаточно большой поверхности внутренних элементов (50 электродов с площадью 60 м^2 , изолированные друг от друга с помощью оргстекла), все вакуумные соединения, включая электроды, были выполнены на резине; при этом требуемый вакуум должен быть не менее 10^{-5} Па.

Первоначально предполагалось, что вакуумная камера установки будет иметь встроенные и выносные магниторазрядные насосы, но уже на этапе запуска стала очевидна их неработоспособность встроенных насосов в будущих условиях. В дальнейшем была реализована вакуумная система, в которой выносные магниторазрядные насосы были основными средствами откачки, которые располагались на специальном трубопроводе Ду 500, соединенном с вакуумным объемом установки, и обеспечивали его откачку через трубопровод с проводимостью $100 \text{ м}^3/\text{с}$. Однако указанные конструктивные особенности вакуумной камеры и жесткие условия экспериментов не позволили достичь требуемых параметров установки с помощью этих средств откачки по следующим причинам. Во-первых: теоретическая эффективная скорость откачки установки не могла превышать $50 \text{ м}^3/\text{с}$. Во-вторых: известно, что магниторазрядные насосы не способны долго и бесперебойно работать в больших магнитных полях и в системе, загрязненной углеводородными составляющими, которых было в избытке, как показала последующая работа; также известно, что при импульсной газовой нагрузке магниторазрядный насос не может самостоятельно вернуться в исходное состояние, т.е. не обеспечивалась скорость откачки в широком диапазоне давлений. В результате, малая производительность вакуумной системы и падение скорости откачки при давлении 10^{-2} Па не могли быть компенсированы количеством магниторазрядных насосов, т.к. находясь на достаточном удалении от вакуумной камеры, из-за воздействия магнитного поля они последовательно выходили из режима работы при случайном выходе из режима одного из них. Таким образом, вакуумная система установки не удовлетворяла вакуумным требованиям установки: необходимый для проведения экспериментов вакуум не был достигнут.

После этого вакуумная система установки ПСП-2 была доукомплектована одним встроенным и одним выносным криогенными насосами заливного типа, тогда как на соединительном трубопроводе оставалась цепь магнитоэлектрических насосов. Данные криогенные насосы обладали всеми положительными качествами, необходимыми для поддержания вакуумных условий установки (см. выше), поэтому даже при всех несовершенствах конструкции вакуумной системы был достигнут необходимый вакуум и обеспечивались необходимые условия для проведения экспериментов. После серии предварительных экспериментов установка ПСП-2 была модернизирована, а криовакуумная система существенно улучшена.

Вакуумная система установки ПСП-2М показана на рисунке 4.

Вакуумные средства откачки установки функционально можно разделить на два типа: основные и вспомогательные. К основным средствам откачки относятся встроенные криогенные насосы (БКН) и выносные крионасосы (МКН). Встроенные криогенные насосы N1, ($S_0 = 400 \text{ м}^3/\text{с}$ по водороду), имеют тороидальную криоповерхность, которая защищена радиационным экраном шевронного типа при азотной температуре. Они расположены над электродами у торцов лайнеров. Эти насосы снабжены системой переохлаждения жидкого гелия: пары гелия, проходя по трубопроводу через нагреватель, откачиваются насосом N2 (АВЗ-20). Выносные криогенные насосы N3 ($S_0 = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ по водороду), расположены на коллекторе трубопровода (Ду 500 длиной $\sim 4 \text{ м}$) и соединены через шибер Ду250 с вакуумной камерой установки. Переохлаждение насосов МКН осуществляется с помощью вакуумного водокольцевого насоса N4 (ВВН2-6). Остальные насосы являются вспомогательными, т.к. они обеспечивают запуск основных насосов. Турбомолекулярные насосы N5, (ТМН-1500 $S_0 = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ по воздуху), расположены непосредственно под выносными криогенными насосами N3 и совместно с форвакуумным насосом N6 (АВЗ-20) обеспечивают откачку вакуумной камеры установки до $\sim 10^{-1} \text{ Па}$. На входе насоса N6 стоит ловушка Т. Контроль высокого давления в вакуумной камере проводился по манометрам двух типов р1 ВМБ1/8 и р2 ВИ-14. Для измерения спектра масс остаточного газа в вакуумной камере был установлен спектрометрический блок: масс-спектрометр М типа МХ-7304 с дополнительным криогенным насосом N7 (ВК-600); предварительная откачка объема масс-спектрометра и его крионасоса обеспечивается турбомолекулярным насосом N8 (ТМН-450) и форвакуумным насосом N9 (НВР-5Д).

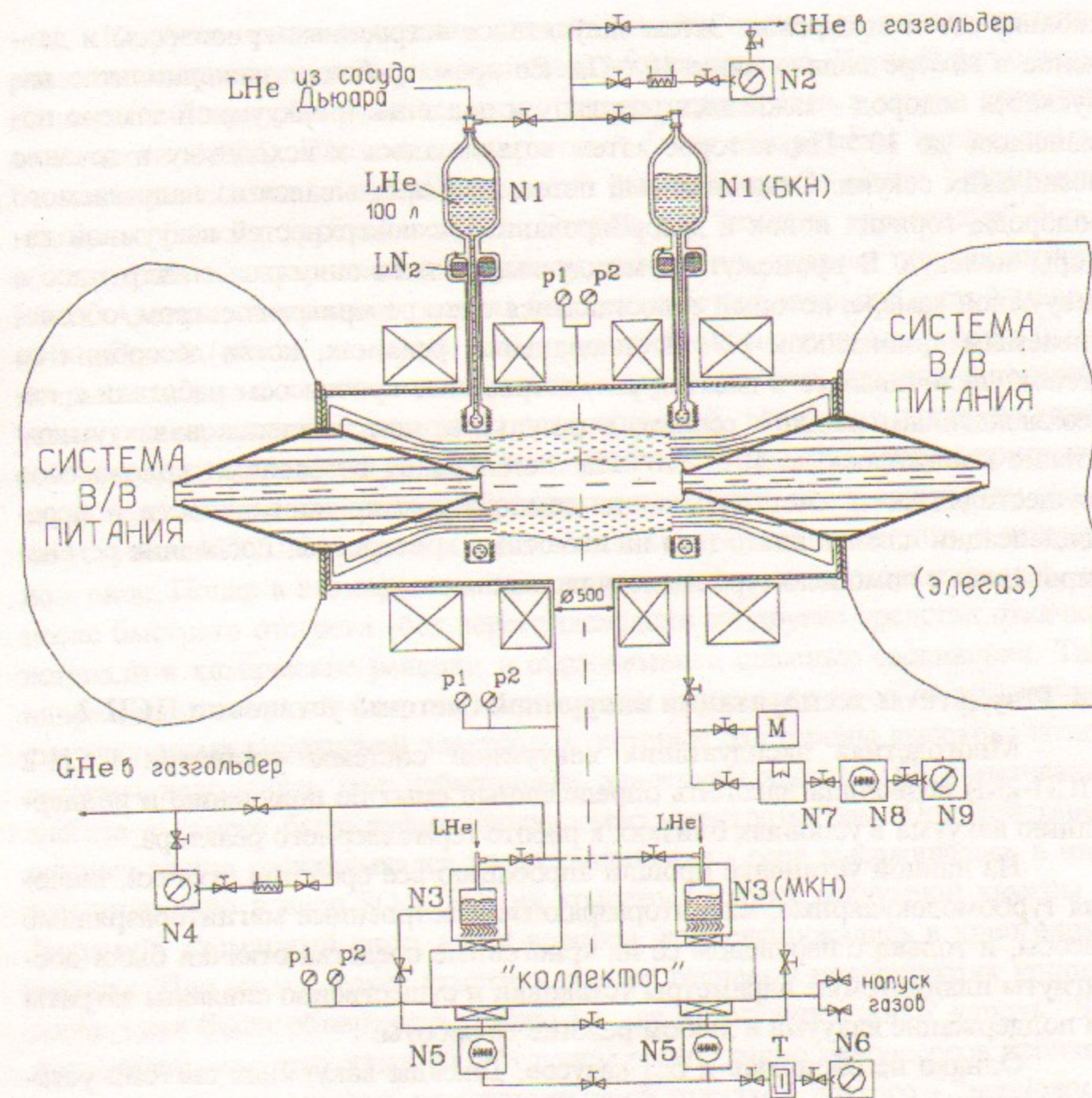


Рис. 4. Криовакуумная система установки ПСП-2.

Работа вакуумной системы была следующей. После откачки вакуумной камеры установки форвакуумным насосом N6 и турбомолекулярным N5 до $10^{-1} - 10^{-2} \text{ Па}$ запускались выносные криогенные насосы. После проведения криогенной чистки и предварительного обезгаживания давление в вакуумной камере устанавливалось не выше $4 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. Расход жидкого гелия в этом режиме составлял 15 л в месяц на один выносной крионасос. Далее осуществлялась высоковольтная тренировка электродов - подавалось напряжение пробоя на них и в результате действия разряда увеличивалось газовыделение с внутренних поверхностей вакуумной камеры; производилось не-

сколько сотен выстрелов. Затем запускались встроенные крионасосы и давление в камере падало ниже 10^{-5} Па. Во время рабочих экспериментов напускался водород - зажигался разряд, - и давление в вакуумной камере повышалось до 10^{-2} Па, которое затем возвращалось к исходному в течение нескольких секунд. Откачиваемый поток газа складывался из напускаемого водорода, горячих ионов и десорбированных с поверхностей вакуумной камеры молекул. В промежутках между выстрелами снимался спектр масс в вакуумной камере, который сопоставлялся с его реперным спектром, обеспечиваемым крионасосом N7. В специальных режимах, когда десорбция со стенок увеличивалась в десятки раз, встроенные крионасосы работали с переохлажденным жидким гелием, в результате чего давление в вакуумном объеме понижалось до 10^{-6} - 10^{-7} Па. Регенерация встроенных крионасосов осуществлялась за счет повышения температуры криоповерхности и переконденсации накопленного газа на выносные крионасосы; последние регенерировались с помощью турбомолекулярных насосов.

2.3. Результаты эксплуатации вакуумной системы установки ПСП-2.

Многолетняя эксплуатация вакуумной системы установки ПСП-2 (ПСП-2М) позволила накопить определенный опыт по получению и поддержанию вакуума в условиях близких к работе термоядерного реактора.

На данной установке прошли апробацию все средства откачки, включая турбомолекулярные, магниторазрядные и встроенные магниторазрядные насосы, и только с переводом её на криогенные средства откачки были достигнуты планируемые параметры установки и существенно снижены затраты на поддержание вакуума в любом режиме её работы.

Однако не обошлось и без казусов. Дважды вакуумная система установки попадала в аварийный режим. Первый раз была разбита стеклянная вакуумная лампа и атмосферный воздух, зашедший через отверстие $d \sim 20$ мм, мгновенно сбросил криоосадок и выбросил жидкий гелий из накопительных емкостей криогенных насосов. Второй раз при отладке диагностической аппаратуры шибер Ду150х40, отсекающий диагностический блок от вакуумного объема, был недозакрыт и непроверен, в результате после вскрытия диагностической камеры на атмосферу вакуумная система мгновенно развакуумировалась. Результат был аналогичный: криоосадок слетел с крионасосов, а жидкий гелий мгновенно испарился и прорвал защитные мембраны.

К другим неожиданностям следует отнести появление новых синтезированных жидких осадков на криоповерхностях насосов. Первый раз с этим столкнулись при обнаружении низкотемпературной течи в малом криогенном насосе (МКН). После его "вскрытия" были обнаружены четкие следы "кислотного остатка", который "проел" сварной шов в месте соединения гелиевого бачка с трубкой подвеса. Второй раз "жидкие криоосадки" были обнаружены на внутреннем и наружном шевронных экранах при демонтаже МКН. Азотные шевронные экраны были полностью покрыты густой масляной пленкой (объем около 100 мл), а внутренние шевронные экраны были покрыты осадком в виде смолы, которая не могла быть удалена с посеребренных поверхностей с помощью растворителей, таких как четыреххлористый углерод и этиловый спирт. После детального анализа авторы пришли к заключению, что такие осадки образуются из-за того, что в вакуумном объеме установки ПСП-2М присутствует много химических элементов в атомарном виде. Попав в атомарном виде в криоосадок, газы вымораживались, но после быстрого отогрева (без переконденсации на другие средства откачки) вступали в химические реакции и образовывали сложные соединения. Так, например, атомарный фтор накапливался в криоосадке из-за негерметичности вакуумных уплотнений электродов, которые со стороны высоковольтной системы находились под избыточным давлением элегаза (SF_6); натекание элегаза в камеру было зафиксировано масс-спектрометром. Под действием разряда элегаз раскладывался на составляющие - сера высаживалась в чистом виде либо в виде SO и SO_2 на холодных частях вакуумной камеры, а "горячий" атомарный фтор, как и водород, конденсировались в криогенных насосах. При этом следует отметить, что на гелиевых поверхностях крионасосов тоже были обнаружены следы в виде скогулированных капель. Для предотвращения этих явлений в будущем регенерацию крионасосов производили в глубоком вакууме под непрерывной откачкой другого - "чернового" крионасоса и вспомогательного турбомолекулярного.

В ходе эксплуатации крионасосов было замечено, что испаряемость гелия существенно возрастает при неразделенном вакуумном объеме самой установки и охранном вакууме накопительной емкости сосуда с жидким гелием крионасоса, что обуславливалось импульсным проникновением рабочего газа - водорода - в момент выстрелов, увеличивающего теплоприток к гелиевым поверхностям. Испаряемость была понижена после конструктивного разделения этих вакуумных объемов.

Авторы полагают, что данную информацию можно использовать при создании вакуумной системы различных установок, в том числе для вакуумной системы "Нейтронного источника".

3. Проект криовакуумной системы установки "Водородный Прототип".

3.1. Конструктивные особенности установки.

В программе УТС предусмотрено строительство нейтронного источника с энергией нейтронов ~ 14 МэВ, получающихся в результате термоядерной реакции дейтерия и трития. На первом этапе программы предполагается создание исследовательской установки "Водородный Прототип", где в качестве рабочего вещества будет использован легкий изотоп водорода, чтобы избежать нежелательного воздействия нейтронного потока.

Принцип установки основан на нагреве плазмы потоком нейтральных атомов в аксиально-симметричной открытой ловушке. Установка будет иметь следующие характеристики [6]. Четыре инжектора будут создавать поток нейтральных атомов с энергией до 40 кэВ. Магнитная система будет обеспечивать магнитное поле в центральной плоскости 1 Т при пробочном отношении от 8 до 20 и расстоянии между пробками 10 м.

Вакуумная камера установки будет состоять из трех основных частей: центральной камеры, двух торцевых камер; через шиберы Ду 750 к центральной камере стыкуются четыре инжекторных и четыре приемных тракта; суммарный объем установки составит ~ 100 м³, суммарная площадь внутренних поверхностей ~ 200 м². Поскольку энергетический баланс плазмы в существенной степени будет зависеть от вторичных частиц, приходящих со стенки вакуумной камеры под действием перезарядных нейтралов, то вакууму установки должно уделяться особое внимание. В рабочем режиме давление остаточного газа в камере должно быть не выше 10^{-6} Па. С этой целью в конструкции вакуумной камеры предусмотрен периодический прогрев до 200° С. Понизить величину потока десорбированных со стенок частиц можно за счет высокой производительности вакуумных насосов, а также за счет чистоты стенок вакуумной камеры, что должно учитываться при проектировке вакуумной системы.

3.2. Криовакуумная система установки.

Во время проектирования при многократном обсуждении разработчики не пришли к единому мнению относительно принципа создания вакуумной системы, тем не менее, авторы данной работы полагают, что криогенные средства откачки не имеют конкурентов и практически являются безальтернативными по многим причинам, в том числе и по причине надежности и простоте эксплуатации. Ниже рассмотрен вариант обеспечения вакуумных условий установки "Водородный Прототип" на основе использования заливных криогенных насосов и безмасляной форвакуумной откачке. Криовакуумная система установки "Водородный Прототип", представленная на рисунке 5, является логическим следствием опыта работы на установке ПСП-2.

Средства вакуумной откачки установки также условно делятся на основные и вспомогательные средства.

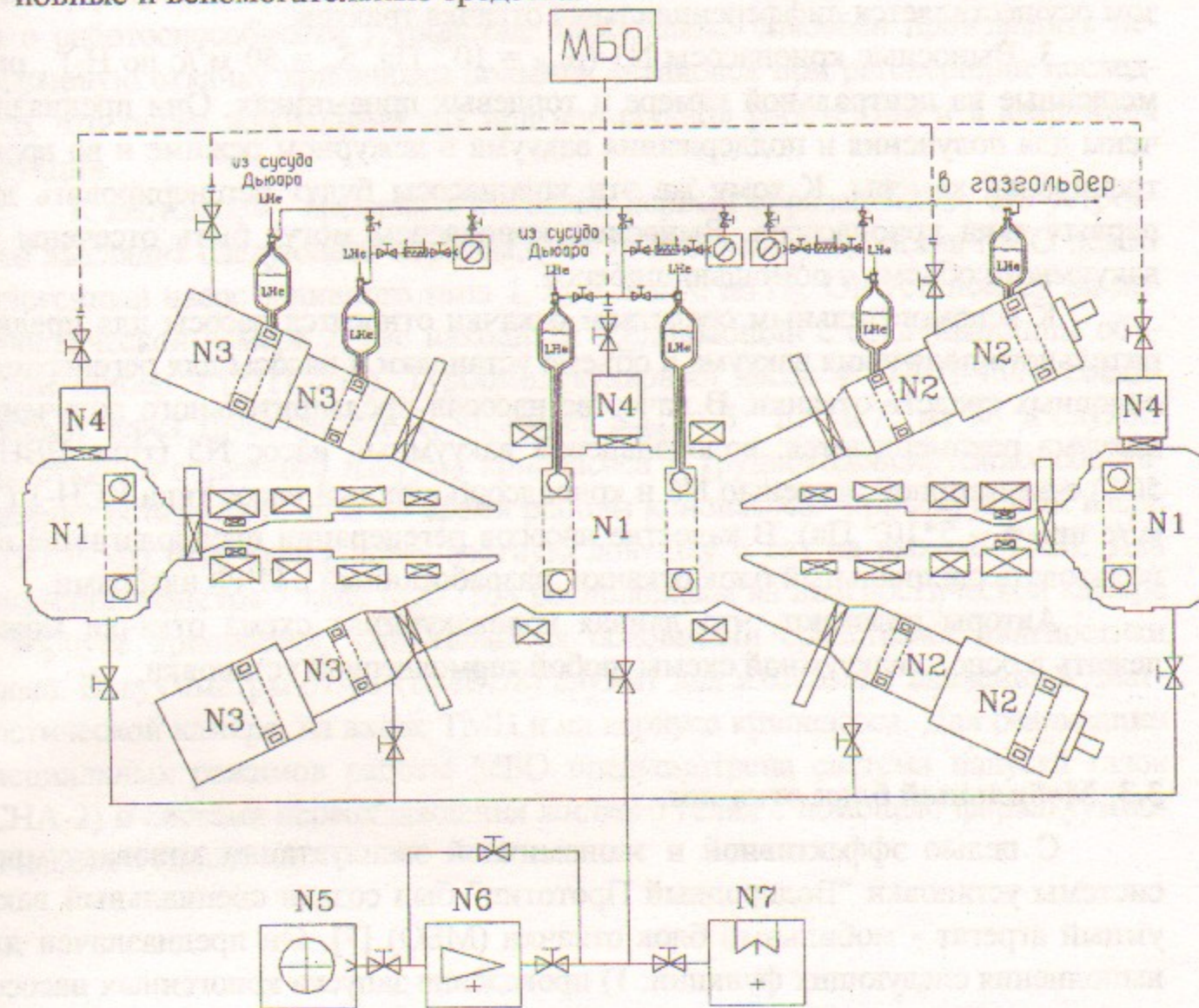


Рис. 5. Криовакуумная система установки Водородный Прототип.

К основным средствам относятся криогенные насосы установки, которые в свою очередь можно условно разделить на три типа:

1. Встроенные крионасосы N1 ($p_{\text{раб}} = 10^{-6}$ Па, $S_0 = 1000$ м³/с по Н₂) - их криоповерхность полностью находится внутри вакуумного объема установки и они будут работать во время эксперимента на переохлажденном гелии для откачки основной газовой нагрузки: потоков газа из инжекторных и приемных трактов и потоков десорбированных молекул со стенок элементов вакуумной камеры.

2. Специальные крионасосы инжекторного N2 и приемного трактов N3 ($p_{\text{раб}} = 10^{-2} - 10^{-6}$ Па, $S_0 = 1000$ м³/с по Н₂) - эти насосы обеспечивают условия перезарядки в области источника ионов, а работающие на переохлажденном жидком гелии, предотвращают попадание потока газов из инжекторного и приемного тракта в центральную вакуумную камеру. Таким образом осуществляется дифференциальная откачка трактов.

3. Выносные крионасосы N3 ($p_{\text{раб}} = 10^{-6}$ Па, $S_0 = 50$ м³/с по Н₂), размещенные на центральной камере и торцевых приемниках. Они предназначены для получения и поддержания вакуума в дежурном режиме и во время тренировки камеры. К тому же эти крионасосы будут регенерировать два первых типа крионасосов. Выносные крионасосы могут быть отсечены от вакуумного объема с помощью шиберов.

К вспомогательным средствам откачки относятся насосы для предварительного получения вакуума в объеме установки и насосы для регенерации основных средств откачки. В качестве насосов предварительного получения вакуума рекомендуются: водокольцевой вакуумный насос N5 (типа ВВН2-50Т) с эжекторной ступенью N6 и криоадсорбционный насос типа КСН-1 (70 м³/с при $p \sim 5 \cdot 10^{-2}$ Па). В качестве насосов регенерации предполагается использовать специальный блок откачки, разработанный в ИЯФ авторами.

Авторы полагают, что данная криовакуумная схема откачки может лежать в основе вакуумной схемы любой термоядерной установки.

3.3. Мобильный блок откачки.

С целью эффективной и экономичной эксплуатации криовакуумной системы установки "Водородный Прототип" был создан специальный вакуумный агрегат - мобильный блок откачки (МБО) [7]. Он предназначен для выполнения следующих функций: 1) проведение запуска криогенных насосов установки; 2) проведение их диагностики; 3) регенерация любых крионасосов; 4) удаление изотопов водорода и гелия.

Перечисленные функции МБО вытекают из следующих обстоятельств. Известно, что при заливке хладагентов в криогенное устройство сталкиваются с трудностями, которые связаны с захолаживанием больших масс сосудов и экранов, со сложной гидро- и термодинамикой взаимодействия хладагента между переливным и заполняемым сосудами, а также с процессами переконденсации в охранном и рабочем вакууме. Особенно тяжело проходит первоначальный запуск, когда криогенное устройство изготовлено с дефектами (открывается "холодная" течь из сосуда с хладагентом); в этом случае проверка работоспособности устройства крайне затруднена. МБО позволяет избежать эти трудности, производя одновременно запуск и контроль крионасосов. За счет того, что МБО работает в режиме дифференциальной откачки с откачиваемым объектом, он достаточно эффективно может провести диагностику устройства - анализ спектра масс, - по которому можно делать выводы о работоспособности устройства. МБО также способен производить непрерывную откачку крионасоса больших установок при регенерации последнего, что также необходимо как при нормальной работе, так и в аварийной ситуации.

К настоящему времени изготовлен первый образец МБО; его устройство выглядит следующим образом, рис. 6. В основе устройства МБО лежит криогенный насос заливного типа 1, $S_0 = 5$ м³/с по Н₂. Он установлен на диагностической камере 2, где находится соединяющий с откачиваемым объектом шибер 3 (ЗПТ-250). Турбомолекулярный насос 4 (ТМН-450), соединенный через трубопровод Ду50, имеет $S_{\text{эфф}} = 5 \cdot 10^{-3}$ м³/с по N₂ и служит для откачки охранного вакуума крионасоса и трудноконденсируемых составляющих остаточного газа во время работы крионасоса. Форвакуумный насос 5 (НВР-5Д) откачивает через азотную ловушку 6 газ на выходе ТМН. Два масс-спектрометра 7 типа МХ-7304 расположены на диагностической камере и корпусе крионасоса, они являются основными средствами диагностики блока. Вакуумметры p1-p3 (ВМБ1/8) служат для измерения давления в диагностической камере, на входе ТМН и на корпусе крионасоса. Для реализации специальных режимов работы МБО предусмотрена система напуска газов (СНА-2) и система переохлаждения жидкого гелия с помощью форвакуумного насоса 8 (ВВН2-6).

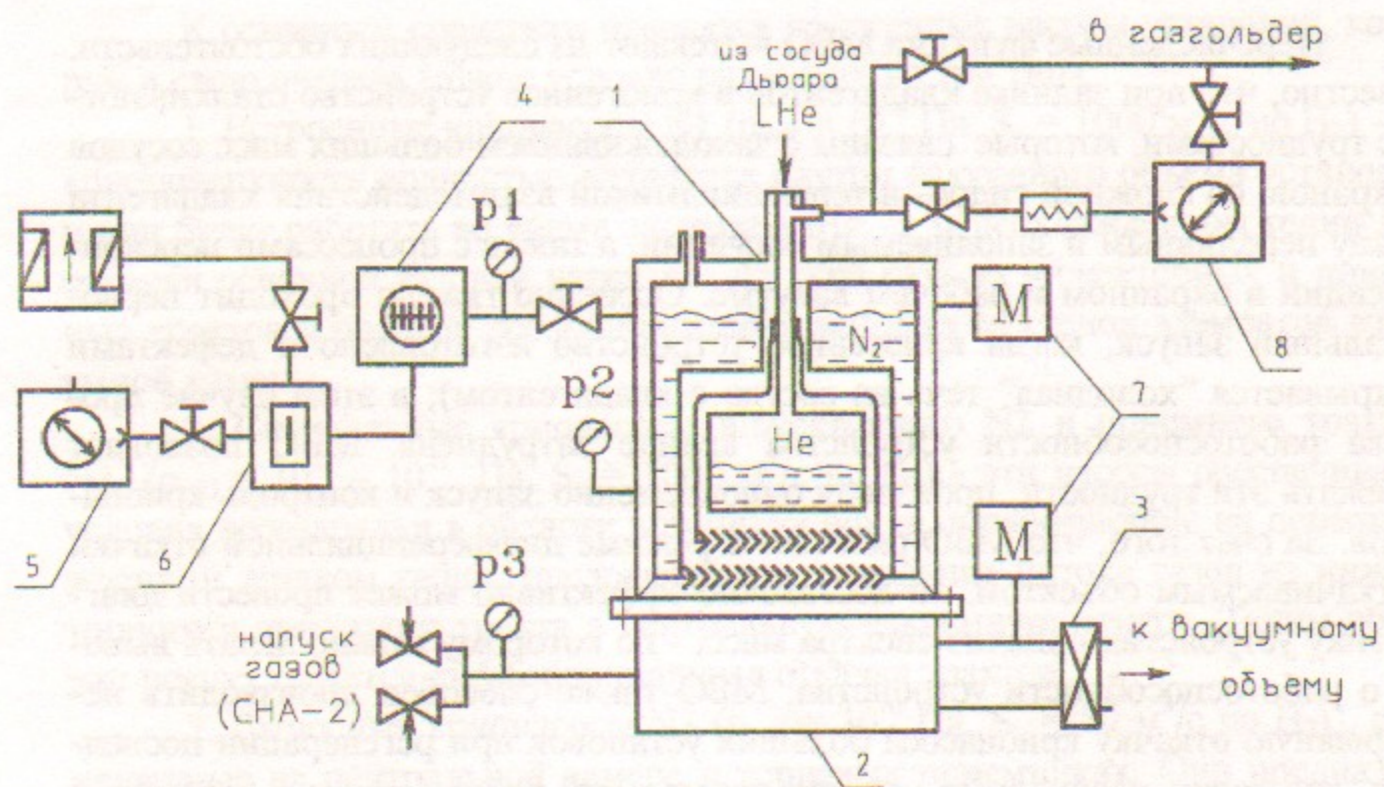


Рис. 6. Вакуумная схема мобильного блока откачки.

Испытания МБО показали, что блок способен выполнять все возложенные на него функции, хотя его конструкция может быть существенно улучшена и упрощена.

Получение стартового вакуума в установке «Водородный Прототип» предполагается осуществляться в следующем порядке (см. рис.5). Сначала с помощью водокольцевого вакуумного насоса N4 и криoadсорбционного насоса N7 проводится предварительное вакуумирование всех объемов криовакуумной установки. Затем производится закрытие всех вакуумных шиберов и поочередный запуск всех её систем с помощью МБО. Потом запускаются выносные криогенные насосы N4 на торцевых баках и центральной камере. После запуска насосов N4 запускаются встроенные криогенные насосы N1 и проводится их полная диагностика. Затем мобильный блок откачки подсоединяется поочередно к инжекторным и приемным трактам и запускает и диагностирует специальные криогенные насосы N2 и N3. После запуска всех криогенных насосов N1 - N4 и их проверки открываются все вакуумные шибера и криовакуумная система переводится в рабочий или дежурный режим. В дежурном режиме работы криоагенты подаются только в крионасосы N4, а остальные крионасосы поддерживаются при комнатной или азотной температурах.

В зависимости от ситуации (например, неполная герметичность крионасосов) может возникать необходимость в удалении газообразного гелия из вакуумного объема установки. Для многих средств откачки это могло бы

привести к аварийной ситуации. Но с помощью МБО при малом натекании гелия её можно рассматривать как рабочую, т.к. в будущем она должна выполняться в штатном режиме, т.е. во время всей работы термоядерной установки.

Авторы предлагают удалять изотопы гелия с помощью связки криогенных насосов и с последующей утилизацией изотопов с помощью холодного диффузионного насоса [8]. Подробное описание работы этой схемы выходит за рамки настоящей работы, однако упрощенную схему удаления газообразного гелия за счет изменения градиента температуры приводится ниже. На рисунке 7 показана схема регенерации криогенных насосов и удаления газообразного гелия из вакуумного объема установки «Водородный Прототип».

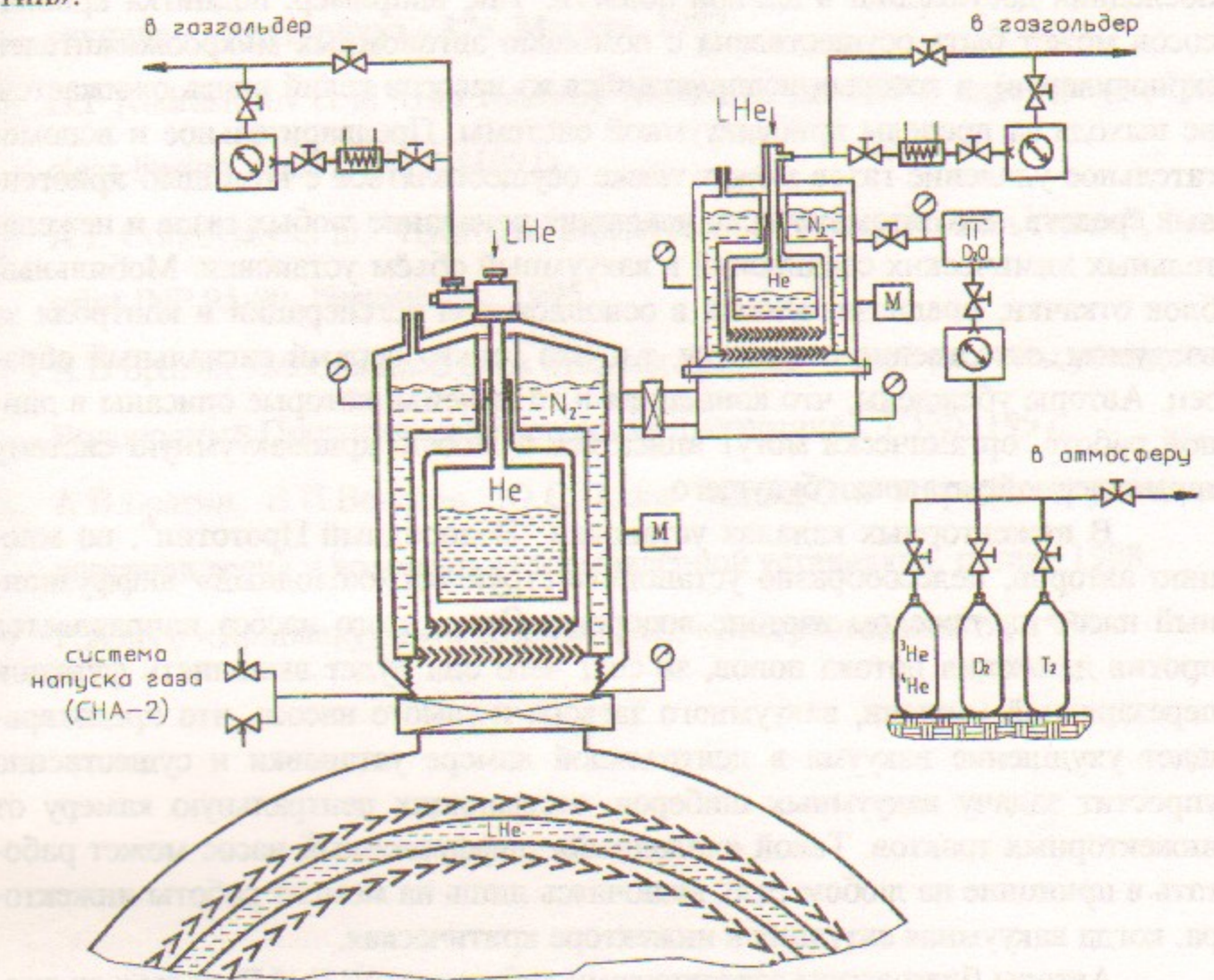


Рис. 7. Схема регенерации крионасосов и удаления гелия из вакуумного объема установки.

5. Заключение.

В течение многих лет криогенные насосы рассматриваются как наиболее перспективные средства обеспечения вакуумных условий в термоядерных установках [9].

В данной работе авторы описали уникальный опыт работы криовакуумной системы установки ПСП-2М и попытались высказать свои предложения по проекту вакуумной системы установки "Водородный Прототип".

В зависимости от новых задач по проблеме УТС предложенная ими криовакуумная система может быть легко модернизирована с учетом самых последних достижений в данной области. Так, например, подпитка крионасосов может быть осуществлена с помощью автономных микроожигителей (криокулеров), в которых испаряющийся из насосов гелий вновь ожижается, не выходя за пределы криовакуумной системы. Предварительное и вспомогательное удаление газов может также осуществляться с помощью криогенных средств, что автоматически исключит попадание любых газов и нежелательных химических соединений в вакуумный объем установки. Мобильный блок откачки, предназначенный в основном для регенерации и контроля за вакуумом, естественно изменится, т.к. это только первый сигнальный образец. Авторы убеждены, что концепция и те приемы, которые описаны в данной работе, органически могут вписаться в любую криовакуумную систему термоядерной установки будущего.

В инжекторных каналах установки "Водородный Прототип", по мнению авторов, целесообразно установить струйный «холодный» диффузионный насос на тяжелом изотопе водорода. Струя этого насоса направляется против движения потока ионов, за счет чего она будет выполнять функции перезарядной мишени, вакуумного затвора и самого насоса, что предотвращает ухудшение вакуума в центральной камере установки и существенно упростит задачу вакуумных шибберов, отсекающих центральную камеру от инжекторных трактов. Такой «холодный» диффузионный насос может работать в принципе на любом газе, включаясь лишь на момент работы инжектора, когда вакуумная ситуация в инжекторе критическая.

Авторы благодарны заведующему лабораторией В.И.Волосову за предоставление материальной базы и всестороннюю поддержку по проведению данной работы, академику Л.М.Баркову за полезные обсуждения, Р.С.Пригчину за помощь при конструировании крионасосов.

Литература.

1. Э.П. Кругляков «Управляемый термоядерный синтез: история и перспективы», «Энергия-Импульс», №5-6 апрель, 1996.
2. С. Benvenuti "Characteristics, advantages and possible applications of condensation cryopumping", J. Vac. Sci. Technol., Vol. 11, p. 591, 1974.
3. В.В.Анашин и др. «Система криогенной откачки инжекторных блоков установки «Амбал», V Всесоюзная конференция «Физика и техника высокого и сверхвысокого вакуума», 25-26 сентября Ленинград 1985г.
4. «Криогенная откачка изотопов водорода в термоядерных установках ИЯФ», IV Всесоюзная научно-техническая конференция по криогенной технике - «Криогеника - 87», Москва, 1987.
5. G.F.Abrashitov et al «Hot rotating plasma in the PSP-2 experiment», Nuclear Fusion, vol.31, No.7, (1991).
6. A.I. Gorbovsky et al, "Hydrogen prototype of a plasma neutron source", Preprint INP 95-90, Novosibirsk, 1995.
7. А.В.Брагин «Мобильный блок откачки криовакуумной системы установки Водородный Прототип», магистерская диссертация, ИЯФ, 1997.
8. А.В.Брагин, В.И.Волосов, Ю.С.Попов «Способ и устройство удаления изотопов гелия и водорода из термоядерной установки», патент 1998.
9. Р.Хэфер «Криовакуумная техника», М., «Энегроатомиздат», 1983.

А.В. Брагин, Ю.С. Попов

**Криовакуумная система
для термоядерных установок**

A.V. Bragin, Yu.S. Popov

**Cryovacuum system
for thermonuclear installations**

ИЯФ 99-27

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 25.02. 1999 г.

Сдано в набор 2.03.1999 г.

Подписано в печать 2.03.1999 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,3 печ.л., 1,0 уч.-изд.л.

Тираж 110 экз. Бесплатно. Заказ № 27

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.