

A-239

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



21/11-77

4596/2-77

8 - 10790

А.И.Агеев, В.Ф.Буринов, А.Г.Зельдович, В.В.Крылов,
Ю.В.Муратов, В.И.Пряничников, Н.Б.Рубин,
Ю.А.Шишов

КОМПЛЕКСНАЯ КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА
БОЛЬШОЙ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
НА ДВУХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЯХ : 4,5 И 2К

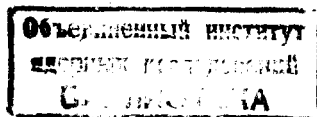
1977

8 - 10790

А.И.Агеев, В.Ф.Буринов, А.Г.Зельдович, В.В.Крылов,
Ю.В.Муратов, В.И.Пряничников, Н.Б.Рубин,
Ю.А.Шишов

КОМПЛЕКСНАЯ КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА
БОЛЬШОЙ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
НА ДВУХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УРОВНЯХ : 4,5 И 2К

*Направлено на XVI Международную конференцию стран-
членов СЭВ "Физика и техника низких температур".
Бухарест, 6-9 июля 1977 г.*



Агеев А.И. и др.

8 - 10790

Комплексная криогенная система большой холодопроизводительности на двух температурных уровнях: 4,5 и 2 К

Рассматривается криогенная система опытной сверхпроводящей секции коллективного ускорителя с продольным магнитным полем величиной 2 Т.

Криогенная система, термостатирующая сверхпроводящие соленоиды при $T = 4,5$ К и резонаторы при $T = 2$ К, состоит из серийной гелиевой установки типа ХГУ-250/4,5, криогенных гелиевых магистралей общей длиной 40 метров, криостатов соленоидов объемом 200 л и резонаторов объемом 50 л. Система содержит также газодинамический эжектор, предназначенный для получения температуры $T = 2$ К.

Серийная установка ХГУ-250/4,5 имела следующие паспортные данные: скорость ожигения - 90 л/час, холодопроизводительность при $T = 4,5$ К - 250 Вт. После модернизации эти величины увеличены соответственно до 120 л/час и 470 Вт.

Криогенные гелиевые магистрали с азотным экраном имеют удельный теплоприток менее 0,1 Вт/м без учета стыковочных участков. Наличие стыковочных участков и арматуры увеличивает этот теплоприток до 1 Вт/м. Суммарные теплопритоки к кольцетрону при $T = 4,5$ К - 90 Вт, теплопритоки и тепловыделения при $T = 2$ К - до 35 Вт.

Газодинамический эжектор для откачки криостатов резонаторов, не увеличивая энергозатрат (по сравнению с откачкой гелия вакуумными насосами), позволяет улучшить герметизацию системы и значительно уменьшить загрязнение гелия маслом.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

В Объединенном институте ядерных исследований ведутся работы по созданию ускоряющих систем коллективного ускорителя ионов^{1,2}, особенностью которых является наличие продольного магнитного поля с индукцией 2Т. Такое магнитное поле целесообразно создавать сверхпроводящими соленоидами, поэтому одна из экспериментальных ускоряющих секций /установка кольцетрон^{3,4}/ выполнена криогенной. Продольное магнитное поле кольцетрона формируется соленоидом внутренним диаметром 0,6 м и длиной 2,4 м, рабочий ток соленоида - 2,5 кА. В ускоряющей секции также имеется 96 корректирующих катушек с индивидуальным электропитанием, собранных по 16 штук в отдельных криостатах. Внутренний диаметр катушек - 0,17 м, рабочие токи - от 0 до 50 А. Необходимое ускоряющее электрическое поле кольцетрона обеспечивается пятью сверхпроводящими высокочастотными резонаторами. Для охлаждения и криостатирования сверхпроводящих соленоидов при $T = 4,5$ К и резонаторов при $T < 4$ К создана комплексная криогенная система холодопроизводительностью до 470 Вт / $T = 4,5$ К/, которая также может использоваться для производства жидкого гелия и для криостатирования других объектов.

В основные узлы криогенной системы входят /рис.1/: серийная гелиевая установка I типа ХГУ-250/4,5^{5*}, криогенные гелиевые магистрали /КГМ/ II, криостаты III, IV суммарной емкостью 200 л жидкого гелия, криостат VII емкостью 50 л, резонаторы V, каждый из которых имеет по две ванны жидкого гелия и узел эжек-

* С 1972 по 1974 гг. в качестве гелиевой установки на кольцетроне использовался многоцелевой гелиевый рефрижератор МГО^{6/}.

торной откачки резонаторов /эжектор VIII, компрессор IX, теплообменник X /. Охлаждаемая масса составляет ~1500 кг.

Положение вентилях кольцетрона в процессах охлаждения, накопления жидкого гелия и криостатирования показано на *рис. 1*.

В процессе охлаждения от комнатной температуры до температуры конденсации гелия в установке ХГУ-250/4,5 исключается теплообмен в аппарате 1-8,

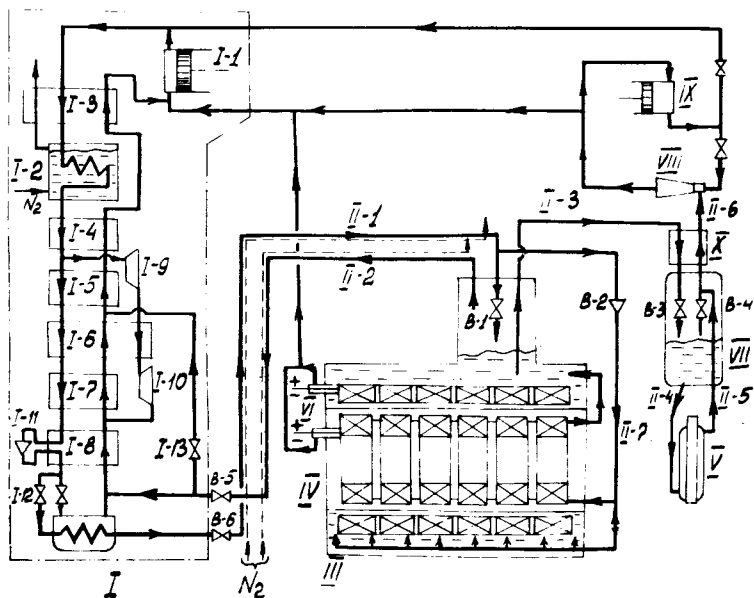


Рис. 1. Принципиальная схема криогенной системы кольцетрона. I - криогенная гелиевая установка ХГУ-250/4,5: I-1 - компрессор; I-2 - ванна жидкого азота; I-3÷8 - теплообменники; I-9,10 - турбодетандеры; I-11 - дюза; I-12,13 - вентили. II-1,2 - криогенные гелиевые магистрали /КГМ/ с азотным экраном; II-3÷7 - КГМ без азотного экрана. III - криостат большого соленоида. IV - криостаты корректирующих соленоидов. V - резонаторы. VI - токовводы. VII - криостат резонаторов. VIII - эжектор. IX - эжекторный компрессор. X - эжекторный теплообменник. Положение вентилях. Режим охлаждения: открыты I-12, I-13, B-3, B-5, B-6; закрыты B-1 и B-4. Режимы накопления и криостатирования: открыты I-12, B-1, B-3÷B-6; закрыты I-13.

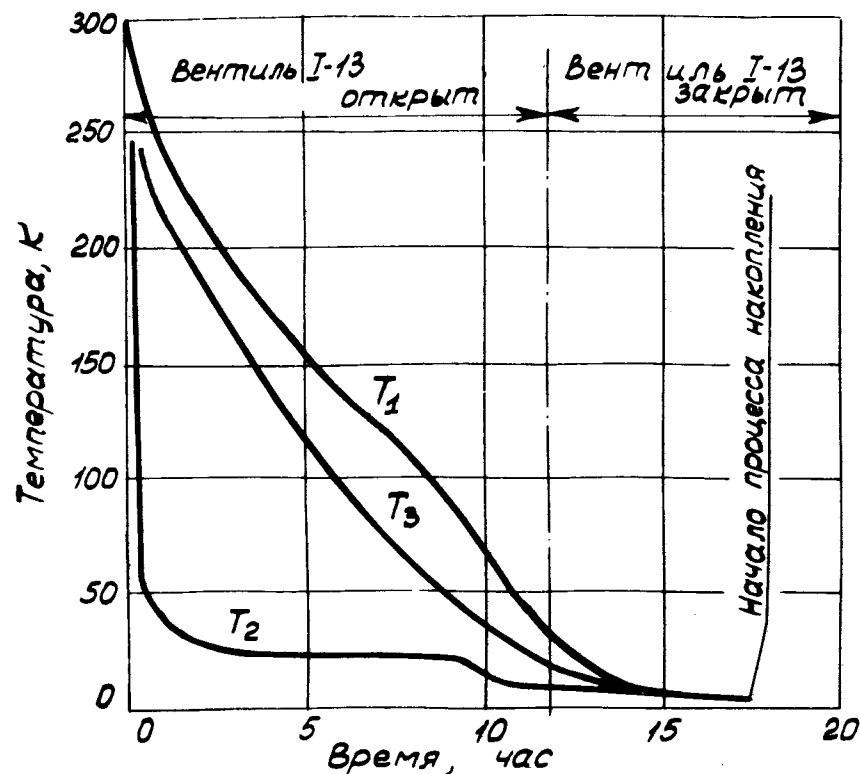


Рис. 2. График охлаждения комплексной криогенной системы. T_1 - температура обмотки соленоида $\phi 600$ мм; T_2 - температура газа на входе в кольцетрон; T_3 - температура газа на выходе из кольцетрона.

являющийся вредным в начальный период охлаждения /7/, а холодный поток из криогенной установки I /рис. 1/ направляется в обмотки соленоидов и резонаторов и равномерно охлаждает их. Весь процесс занимает около 18 часов /рис. 2/ и лимитируется не холодопроизводительностью установки ХГУ-250/4,5, а величиной пространственных градиентов температур соленоидов, которые считалось целесообразным в период охлаждения поддерживать равными 30÷40 градусов.

Сечение дроссельной шайбы B2 /рис.1/ выбрано таким, чтобы гидравлическое сопротивление линии II-7 было

значительно больше сопротивления открытого вентиля В1. Вследствие этого в процессах накопления жидкого гелия и криостатирования практически весь парожидкостный поток из установки ХГУ-250/4,5 проходит через вентиль В1 в верхнюю часть криостата III, где сепарируется на пар и жидкость.

В процессе криостатирования в криостате VII можно создавать разрежение с помощью эжектора VIII, что позволяет поддерживать температуру резонаторов V на уровне $< 4 \text{ K}$. Введение теплообмена /теплообменник X/ между потоками жидкости из криостата III и откачиваемыми эжектором парами гелия уменьшает расход жидкого гелия на криостатирование резонаторов примерно в 1,5 раза. Непосредственно в резонаторы V из криостата VI гелий поступает из-за различия между плотностями жидкого и кипящего гелия.

Расчет эжектора производился на основе методики ^{/8/} и соответствующих энергетических балансов криогенной системы для нагрузки $30 \pm 35 \text{ Вт}$ при $T = 2 \text{ K}$.

Поток, откачиваемый эжектором, имеет низкую температуру $\sim 3 \text{ K}$, что существенно снижает затраты работы на его сжатие. По этой причине эжектор, несмотря на его низкий к.п.д. ^{/8/}, оказывается, согласно расчетам, способным конкурировать с механическими вакуум-насосами, имеющими более высокий к.п.д. Действительно, для снятия нагрузки $30 \pm 35 \text{ Вт}$ при $T < 4 \text{ K}$ потребуется три промышленных вакуум-насоса типа ВН-6Г ^{/9/} с суммарной мощностью электропривода 60 кВт . Расчетное значение мощности эжекторного компрессора /при изотермическом к.п.д. компрессора, равном 0,5/ также составляет 60 кВт . Однако эжектор обладает следующими явными преимуществами по сравнению с механическими вакуум-насосами: а/ малые размеры эжектора позволяют осуществить удобную компоновку системы откачки; б/ эжектор не загрязняет гелий маслом и улучшает герметичность системы.

Проведены первые эксперименты с эжекторной системой откачки. При нулевой нагрузке получена температура $1,85 \text{ K}$, но при температуре $2,1 \text{ K}$ нагрузка составила 8 Вт вместо $30 \pm 35 \text{ Вт}$ по расчетам. Поэтому продолжают работы по повышению холодопроизводи-

тельности эжекторной системы. Также намечено провести исследование теплообмена в сверхтекучем гелии при импульсной нагрузке. Подобный тепловой режим имеет место в резонаторах при вводе в них высокочастотной мощности ^{/3,4/}.

Все основные узлы комплексной криогенной системы собраны в рабочую схему с помощью криогенных гелиевых магистралей. Общая длина основных КГМ II-1,2 /рис. 1/ составляет 35 м . Они имеют вакуумную многослойную изоляцию с охлаждаемым азотом экраном, причем экраном является непосредственно вакуумный кожух КГМ /рис. 3/. Замеренный экспериментально удельный теплоприток к гелию составляет менее $0,08 \text{ Вт/м}$, однако наличие шести стыковочных участков и четырех

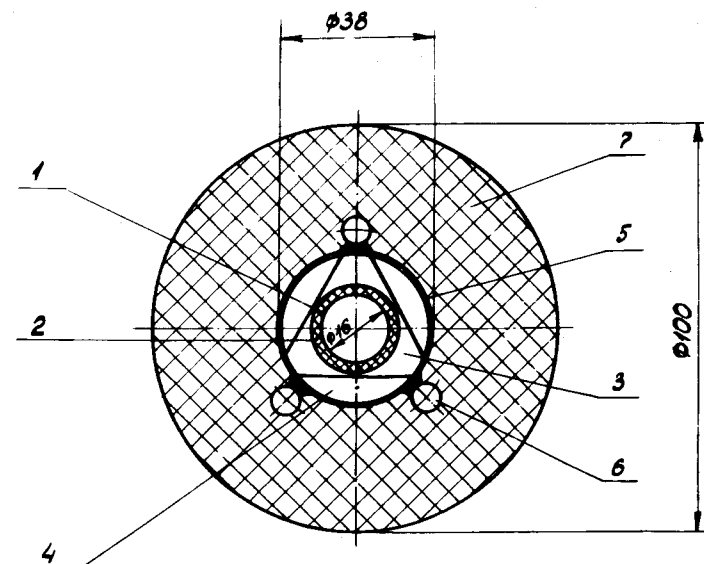


Рис. 3. Криогенная гелиевая магистраль с азотным экраном. 1 - гелиевый канал /нержавеющая труба $\phi 18 \times 1$ /; 2 - экраны из металлизированного лавсана; 3 - фторопластовые проставки, $\delta = 1 \text{ мм}$; 4 - вакуумное пространство; 5 - вакуумный кожух и азотный экран /нержавеющая труба $\phi 38 \times 1$ /; 6 - каналы жидкого азота /трубы нержавеющей $\phi 10 \times 1$ /; 7 - пенопластовая изоляция.

вентилей увеличивает это значение до 1 Вт/м. Остальные КГМ имеют незначительную протяженность и выполнены с вакуумно-многослойной изоляцией без азотного охлаждения. Удельный теплоприток по ним - 1,5±2 Вт/м.

В табл. 1 для режима криостатирования приведены значения теплоприток и расходов жидкого и газообразного холодного /T=4,5 К/ гелия. Суммарная величина теплоприток-90 Вт при расходе гелия 2,5 г/с.

Таблица 1

Теплопритоки /T=4,5 К/ и расходы жидкого и холодного газообразного гелия в режиме криостатирования

| Наименование узла | № по рис.1 | Теплопритоки при 4,5 К, Вт | Расход, г/с |
|--|----------------|----------------------------|---|
| Криостаты соленоидов | III,IV | 40 | 0 |
| Криогенные гелиевые магистрали со стыковочными участками и арматурой | II-1,2,7 | 40 | 0 |
| Токовводы большого соленоида и два блока токовводов для 32 сверхпроводящих катушек | VI | 10 | 0,8 |
| Расход жидкого гелия на криостатирование резонаторов | II-3÷6, V, VII | - | 1,7 |
| Суммарные величины | | 90 | 2,5 |
| | | | /соответствует ~70 л/час жидкого гелия/ |

Для этих условий основной режим работы криогенной установки должен быть не рефрижераторным или ожигательным, а некоторым промежуточным, комбинированным, с одновременным производством холода для компенсации теплоприток, жидкого гелия для криостатирования резонаторов и холодного газа для охлаждения токовводов.

Как известно^{/10/}, переход криогенной установки на комбинированные режимы вызывает перераспределение детандерного и дроссельного потоков.

Однако в серийной установке ХГУ-250/4,5* оба эти потока практически не регулируются вследствие применения турбодетандеров 1-9 и 1-10 /рис. 1/ с сопловыми аппаратами постоянного сечения и наличия калиброванного отверстия 1-11 /дюза φ1,6÷1,8 мм/, рассчитанного на критический /звуковой/ режим истечения. По этим причинам установка была предназначена для работы только в двух паспортных режимах: ожигательном /с предварительным азотным охлаждением/ с темпом ожигения 3,1 г/с /90 л/ч/ и рефрижераторном /без предварительного азотного охлаждения/ с холодопроизводительностью 250 Вт.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования^{/11/} установки ХГУ-250/4,5 позволили осуществить на ней различные комбинированные режимы как с предварительным азотным охлаждением, так и без него.

В этих режимах регулирование расхода дроссельного потока осуществлялось вентилем 1-12 /рис. 1/, для чего была применена новая дюза диаметром 3,5 мм /доззукое истечение потока в дюзе/.

Регулирование расхода газа через турбодетандеры осуществлялось двумя способами.

1. При постоянном расходе сжатого газа, проходящего через установку, изменялось его давление. Уменьшение давления приводило к снижению расхода потока

* Установка ХГУ-250/4,5 - первая в Советском Союзе криогенная гелиевая установка, в которой применены турбодетандеры./5/.

через турбодетандеры и, наоборот, повышение давления вызывало увеличение расхода детандерного потока.

2. Давление сжатого газа поддерживалось постоянным, следовательно, при неизменной температуре перед турбодетандером расход детандерного потока также оставался постоянным. Но вследствие регулирования общего расхода сжатого газа, проходящего через установку, менялся расход дроссельного потока, что позволило регулировать соотношение дроссельного и детандерного потоков.

На рис. 4 приведены две характеристики установки ХГУ-250/4,5 при работе с предварительным азотным охлаждением. Характеристика №1 получена при постоянном расходе сжатого газа через установку ХГУ-250/4,5 $G_K = 56$ г/с, который обеспечивался основным компрессором I-1 /рис. 1/. Давление на входе в установку изменялось от 15,5 бар /ожижительный режим/ до 13,4 бар /рефрижераторный режим/. Максимальный темп охижения - 3,6 г/с /104 л/ч/ и максимальная холодопроизводительность - 340 Вт.

На рис. 4 также показана область А, соответствующая условиям криостатирования кольцетрона /табл.1/. Как видно из этого рисунка, установка ХГУ-250/4,5 с одним основным компрессором /характеристика 1/ полностью обеспечивает криостатирование кольцетрона.

Однако при работе с одним компрессором темп накопления жидкого гелия $\Delta G'_L$ /рис. 4/ невелик, и даже при максимально возможном уменьшении потока через резонаторы процесс накопления продолжался 8 часов. С целью ускорения процесса накопления температура резонаторов поддерживалась на уровне не ниже 4,5 К /эжектор как вакуумный насос не работал/, что позволяло с помощью компрессора IX /рис. 1/ увеличивать расход сжатого газа через установку ХГУ-250/4,5. Вследствие этого темп накопления жидкого гелия увеличивался /характеристика 2 /рис.4/, $\Delta G''_L > \Delta G'_L$ / и процесс накопления сокращался до 4 часов. При этом максимальный темп охижения составил 4,2 г/с /120 л/ч/л/ч/, а максимальная холодопроизводительность - 470 Вт.

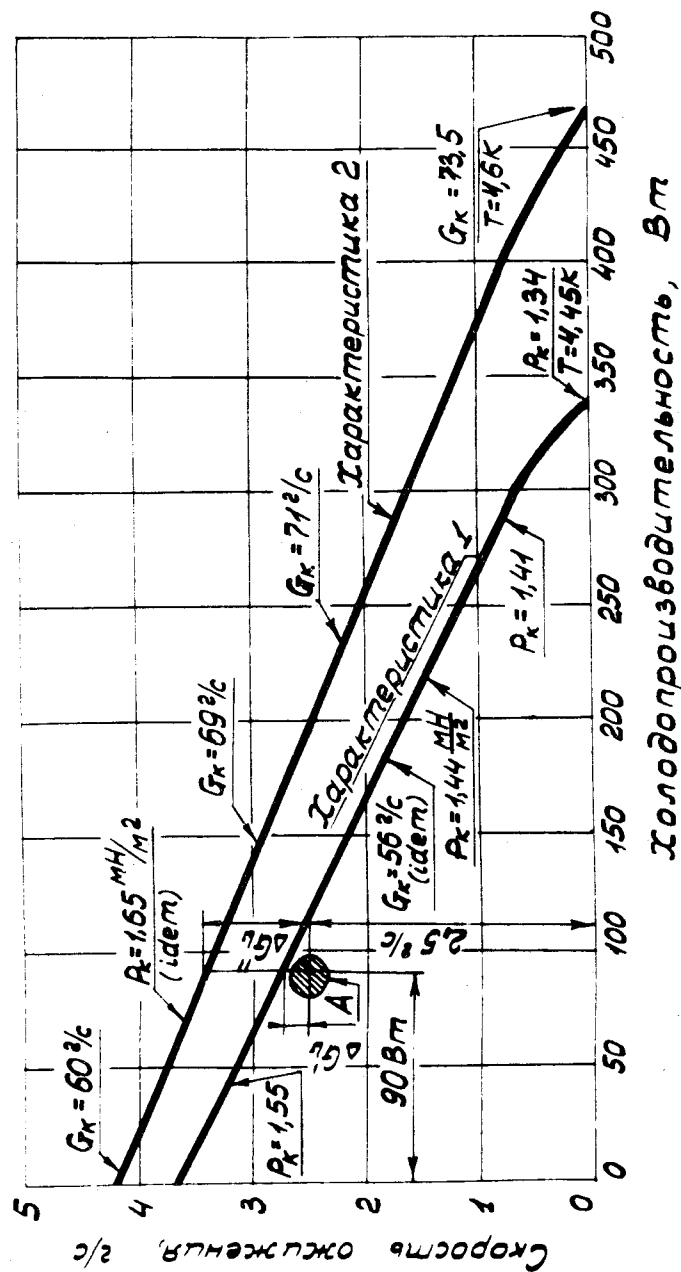


Рис. 4. Характеристики установки ХГУ-250/4,5 при работе с предварительным азотным охлаждением.

Основные результаты и выводы

1. На базе серийной криогенной установки ХГУ-250/4,5 создана и экспериментально исследована комплексная криогенная система, рационально обеспечивающая основные режимы кольцетрона: охлаждение, накопление жидкого гелия и криостатирование. Эта система также может быть использована для производства жидкого гелия в количестве до 120 л/ч и для криостатирования других объектов с нагрузкой до 470 Вт при $T \approx 4,5$ К.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения газодинамического эжектора для снижения температуры криостатирования объектов до уровня ниже 4 К.

3. Проведенная модернизация установки ХГУ-250/4,5 не только существенно улучшила характеристики установки в рефрижераторном и ожигительном режимах, но и позволила осуществить комбинированные режимы.

Литература

1. Векслер В.И. и др. АЭ, 1968, 24, 317.
2. Бонч-Осмоловский А.Г. и др. ОИЯИ, Р9-4171, Дубна, 1968.
3. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, Р9-4722, Дубна, 1969.
4. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, Р9-5488, Дубна, 1970.
5. Никиткин В.Д. и др. Холодильная гелиевая установка ХГУ-250/4,5. Инф.листок. Сер. 116, 19М. ЦИНТИ-химнефтемаш., 1975.
6. Агапов Н.Н. и др. ОИЯИ, Р8-8850, Дубна, 1975.
7. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, Р8-10039, Дубна, 1976.
8. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. "Энергия", М., 1970.
9. Королев Б.И. и др. Основы вакуумной техники. "Энергия", М., 1975.
10. Агапов Н.Н. и др. ОИЯИ, 8-9436, Дубна, 1976.
11. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 8-10477, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июня 1977 года.