

B-225

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9-3288-2



Ю.П. Вахрушин, В.К. Гаген-Торн, И.В. Кожухов,
Г.Л. Саксаганский, Н.В. Толокнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО
ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ
ЛИУ-3000

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

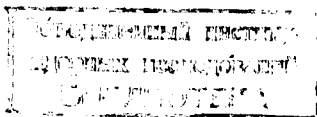
1967.

9-3288-2

5035/3 пр.

Ю.П. Вахрушин, В.К. Гаген-Торн, И.В. Кожухов,
Г.Л. Саксаганский, Н.В. Толокнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО
ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ
ЛИУ-3000



ВВЕДЕНИЕ

Стремление иметь мощные потоки релятивистских электронов для исследований в различных областях ядерной физики привело к созданию в шестидесятых годах линейных индукционных ускорителей ^{/1,2,3/}. Стоимость сооружения и эксплуатации линейного индукционного ускорителя в значительной степени зависит от радиальных размеров индукторов. В связи с этим целесообразно отказать от вакуумной трубки и выполнить индукторы в виде вакуумно-плотных элементов, которые уплотняются между собой с помощью резиновых прокладок, благодаря чему создается герметичная полость, в которой может быть осуществлено необходимое для существования пучка разрежение ^{/3/}. При создании индукторов в виде вакуумно-плотных элементов в установке ЛИУ-3000 используется эпоксидный компаунд.

Опыта создания и эксплуатации системы, имеющей разветвленные поверхности из эпоксидного компаунда, не было, и поэтому проектированию ускорителя ЛИУ-3000 сопутствовало экспериментальное изучение такой системы как с целью отработки технологии изготовления индукторов, так и с целью определения исходных данных для расчёта вакуумной системы и выяснения её эксплуатационных характеристик.

Изучению подлежали следующие вопросы:

1. Надежность одновременного уплотнения многих стыков по поверхности эпоксидного компаунда, обработанной в условиях массового изготовления индукторов.
2. Величина десорбции с поверхности индуктора, обусловленная как самими материалами, из которых выполнен индуктор, так и технологическим процессом обработки поверхностей индуктора, при котором они могли подвергаться воздействию масла, эмульсии, влаги и т.д.

3. Эксплуатационные характеристики ускоряющей секции (время откачки, предельное давление и спектральный состав остаточных газов).

4. Влияние ускоряющей системы на эмиссионную способность электронной пушки ускорителя.

5. Поведение системы при прохождении через нее сильнооточного пучка электронов (разложение компаунда под действием излучения и рассеянного пучка и изменение в связи с этим предельного давления и состава остаточных газов).

Все перечисленные вопросы можно разбить на две группы. К первой относятся вопросы, которые необходимо изучить при отработке конструкции и технологии изготовления индукторов с целью достижения возможно лучших вакуумных характеристик. Ко второй группе относятся вопросы, связанные с взаимодействием пучка электронов с ускоряющей системой.

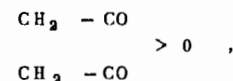
На основании этого первая группа вопросов (надежность уплотнений, натекание и состав остаточных газов, предельное давление, время откачки) изучалась на специальных стендах в процессе отработки конструкции и технологии изготовления индукторов. Вторая же группа вопросов (влияние ускоряющей системы на эмиссионную способность пушки, поведение системы при прохождении через нее пучка электронов, эксплуатационные характеристики) изучалась в процессе наладки первых секций ускорителя.

2.МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ

Изучение десорбции с опытного индуктора и образцов осуществлялось путем измерения статического натекания и масс-спектрометрического газоанализа в динамическом режиме в объеме, соединенном с исследуемыми объектами (индуктор или образцы). Вакуумная система экспериментального стенда показана на рис. 1. Наличие шиберов (2) и вентиля (5) и (14) позволило быстро переходить от одного к другому из указанных выше режимов.

Конструкция опытного индуктора приведена на рис. 2. В индукторе применен эпоксидный компаунд на основе смолы ЭД-6 с тальком и тинолом в качестве наполнителей и малеиновым ангидридом в качестве отвердителя. Этот компаунд выбран после предварительного испытания на газоотделение ряда компаун-

дов по наименьшей величине газоотделения. Малеиновый ангидрид имеет структурную формулу



обладает минимальной энергией связи молекулярных групп и радикалов и служит основным потенциальным источником загрязнений вакуумной системы. Поскольку вероятными причинами обильного газовойделения индуктора могут быть сорбированные поверхностью пары воды и масел, соприкосновение с которыми неизбежно в процессе изготовления и транспортировки индуктора, то представлялось целесообразным наряду с изучением десорбции с самого индуктора исследовать в аналогичных условиях газовойделение с контрольного образца, изготовленного из того же компаунда.

Таким путем можно выявить специфику десорбции с индуктора, определить дополнительные источники загрязнений и принять необходимые меры для максимального совершенствования конструкции и технологии изготовления индуктора.

Для снижения десорбционного фона с поверхностей вакуумного тракта стенда вся система откачки контрольного объема (15), по схеме рис.1 от вентиля (5) вправо, была выполнена на металлических уплотнениях и могла прогреваться до 450°C с помощью проволочного электронагревателя. Измерительный блок (6) прогревался отдельным нагревателем.

Определение масс-спектра производилось газоаналитическим прибором типа МСХ-3 ("Хронотрон"). Газоанализатор этого типа является динамическим времяпролетным масс-спектрометром, в котором разделение сгустка моноэнергичных атомов по массам происходит вследствие различия их скоростей в лишенном электрических и магнитных полей пространстве дрейфа датчика (7). Индикаторное устройство прибора выполнено на электронно-лучевой трубке.

Основные характеристики прибора: диапазон масс - 1-200 а.е.м.; разрешающая способность - 20; рабочее давление в датчике - 1×10^{-4} - 1×10^{-9} тор.

Градуировка шкалы масс-спектрометра проводилась с помощью пробных газов (водорода, гелия, азота, аргона) и ионизационного вакуумметра ВИТ-1. Пробный газ напускался через натекатель (12) - при открытом вентиле (14) - в контрольный объем до давления на порядок выше исходного, что позволило

пренебречь газовым фоном в датчике. Вертикальный масштаб шкалы, т.е. масштаб давлений, устанавливался по высоте тока пробного газа на экране электронно-лучевой трубки и давлению в объеме, определяемому по манометрической лампе ЛМ-2.

Всем измерениям предшествовала вакуумная тренировка испытываемых элементов и контрольного объема со снятием спектра остаточных газов оттренированного контрольного объема. Кроме того, перед исследованием масс-спектра контрольного образца для определения газов, попадающих в контрольный объем из атмосферы вместе с образцом при его загрузке, была проведена съёмка спектра в контрольном объеме после кратковременного открытия натекателя (12), имитирующего ввод образца.

Измерение натекания и перепада давления на секции, составленной из 9 опытных индукторов, проводилось на стенде, показанном на рис. 3.

В этом случае после проверки секции на герметичность гелиевым теческательем ПТИ-6 методом обдува и устранения обнаруженных неплотностей осуществлялась вакуумная тренировка секции вакуумным агрегатом ВА-05-1, в процессе которой регистрировалось предельное разрежение, натекание и перепад давления по секции. Перед подсоединением секции к агрегату ВА-05-1 измерялось предельное разрежение насоса и натекание в колпак и в присоединительный патрубок в зависимости от продолжительности вакуумной тренировки, а также быстрота откачки на входном фланце насоса в рабочей зоне давлений.

По подобной же схеме измерялись указанные параметры секций основных индукторов, в которые были внесены конструктивные изменения на основе данных испытания опытных индукторов.

Как уже указывалось выше, изучение второй группы вопросов производилось на ускорителе в период запуска первых секций. Вакуумная система установки показана на рис. 4. В качестве масс-спектрометрического анализатора в этом случае использовался прибор ИПДО-1 с омегатронным датчиком РМО-4С. Этот прибор в отличие от "Хронотрона" обладает большей стабильностью чувствительности и, кроме того, позволяет вести запись спектра остаточных газов с помощью самописца. Разделение по массам происходит за счёт выделения и регистрации тех ионов остаточного газа, циклотронная частота которых соответствует частоте напряжения, прикладываемого

к электродам датчика. Прибор имеет следующие основные характеристики:

диапазон регистрируемых масс	-	2 - 100 а.е.м.,
разрешающая способность	-	20,
рабочее давление в датчике	-	$1 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-10}$ тор.

В процессе работы на установке проводилась регистрация натекания, предельного давления в инжекторе и в ускоряющей системе с проведением спектрального анализа остаточного газа. Измерения проводились при закрытом и открытом шибере (7), при включенном и выключенном накале электронной пушки, при наличии и отсутствии ускоряющего поля в системе, при прохождении через систему ускоренного и неускоренного пучка электронов. При всех измерениях с помощью масс-спектрометров МСХ-3 и ИПДО-1 не учитывалась зависимость их чувствительности от рода газа, т.к. селективность манометрической лампы ЛМ-2, используемой для измерения давления в вакуумных системах, имеет примерно такой же характер. Кроме того, отношение чувствительности для большинства компонент газовой смеси к чувствительности для азота мало отличается от единицы и учёт чувствительности приводит к незначительным для вакуумной техники поправкам.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПЫТНЫХ ИНДУКТОРОВ

Вакуумная тренировка индуктора на стенде проводилась в холодном состоянии и при прогреве до температуры 80°C горячей водой, подаваемой в систему охлаждения индуктора, при закрытом вентиле (5). Тренировка при комнатной температуре продолжалась четыре дня по шесть часов ежедневно. Динамика откачки показана на рис. 5 (а и б). Последующий прогрев индуктора в течение двух дней по шесть часов привел к росту давления в нем с $8 \cdot 10^{-6}$ тор до $2 \cdot 10^{-4}$ тор. После охлаждения и тренировки в течение пяти часов при комнатной температуре давление в индукторе понизилось до $1,2 \cdot 10^{-5}$ тор. Динамика последующей тренировки индуктора при комнатной температуре в течение пяти дней также показана на рис. 5 (а и б). Вакуумная тренировка контрольного объема проводилась при прогреве до 450°C с откачкой парорутным насосом РН-31 при закрытом вентиле (5) и охлаждении ловушки. После трениров-

ки давление в контрольном объеме стало $2 \cdot 10^{-7}$ тор. Масс-спектр отреннированного контрольного объема приведен в табл. 1.

В табл. 2 и 3 даны спектры масс в контрольном объеме при открытом вентиле (5), соответствующие газоанализу десорбционных потоков с индуктора. Причем в табл. 2 дан спектр, полученный при закрытом шибере паромасляного агрегата, в таблице 3 - при открытом шибере.

Таблица 1

Компонента газовой смеси	Масса, а.е. м.	Парциальное давление P_i , Торр $\times 10^7$	Относительное содержание, %
H ₂	2	0,21	10,5
OH	17	0,14	7,0
H ₂ O	18	0,45	22,5
N ₂ +CO	28	0,48	21,5
-	42	0,23	11,0
CO ₂	44	0,19	9,5
-	54	0,18	9,0
-	64	0,09	4,5
-	72	0,09	4,5
Суммарное давление $P = 2 \cdot 10^{-7}$ тор			

Таблица 2

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Торр $\times 10^7$	Относительное содержание, %
OH	17	2,62	17,5
H ₂ O	18	7,70	51,5
N ₂ +CO	28	2,60	17,0
O ₂	32	0,45	3,0
-	42	0,45	3,0
CO ₂	44	1,17	8,0
Суммарное давление $P \approx 1,5 \cdot 10^6$ тор			

Таблица 3

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Торр $\times 10^7$	Относительное содержание, %
OH	17	1,95	19,5
H ₂ O	18	5,75	57,5
N ₂ +CO	28	1,26	12,6
-	42	0,46	4,6
CO ₂	44	0,58	5,8
Суммарное давление $P \approx 1 \cdot 10^{-6}$ тор			

С целью определения влияния конструкции и технологии изготовления индуктора на натекание с его поверхностей была изучена десорбция с контрольных образцов, выполненных из того же компаунда, который был использован при изготовлении индукторов. С целью проверить возможность высокотемпературной вакуумной тренировки были исследованы два одинаковых образца

(размер 74 x 53 x 9 мм³), один из которых подвергался 2-часовой тренировке в вакууме при температуре 200°C. Перед измерениями контрольный объем заново оттренировывался при прогреве до 450°C. Предельное давление составило $1,6 \cdot 10^{-7}$ тор. На рис. 6а воспроизведена кривая откачки или имитации ввода образца. Предельное давление $2,8 \cdot 10^{-7}$ тор, натекание $1 \cdot 10^{-8}$ $\frac{\text{лтор}}{\text{сек}}$. Спектр остаточного газа для этого случая дан в табл. 4.

Таблица 4

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
ОН	17	0,15	6
H ₂ O	18	0,68	24
N ₂ + CO	28	0,79	28
CO ₂	44	0,98	35
-	54	0,20	7
Суммарное давление $P \approx 2,8 \cdot 10^{-7}$ тор			

На рис. 6б дана кривая откачки системы с загруженным образцом. Натекание в системе составило $2,4 \cdot 10^{-6}$ $\frac{\text{лтор}}{\text{сек}}$. Масс-спектр дан в табл. 5.

Таблица 5

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
ОН	17	4,4	18
H ₂ O	18	16	67
N ₂ + CO	28	3,7	13,3
CO ₂	44	0,4	1,7
Суммарное давление $P \approx 2,4 \cdot 10^{-6}$ тор			

Перед проведением измерения десорбции с прогретого образца высоковакуумный тракт был еще раз оттренирован при прогреве до 450°C. Давление в контрольном объеме к концу тренировки составляло $1,4 \cdot 10^{-7}$ тор. После имитации загрузки образца предельное давление составило $2 \cdot 10^{-7}$ тор, натекание $6 \cdot 10^{-8}$ $\frac{\text{лтор}}{\text{сек}}$. Масс-спектр остаточного газа дан в табл. 6.

Таблица 6

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
H ₂	2	0,10	5
ОН	17	0,18	9
H ₂ O	18	0,75	37,5
+CO	28	0,60	30
-	42	0,20	10
CO ₂	44	0,15	7,5
-	54	0,02	1,0
Суммарное давление $2,10^{-7}$ тор			

На рис. 6(в) показана кривая откачки предварительно прогретого образца. Компоненты масс-спектра приведены в табл. 7. Измеренное натекание в контрольный объем составило $8,4 \cdot 10^{-6}$ $\frac{\text{лтор}}{\text{сек}}$.

После окончания испытания образец в течение 24 часов находился в атмосфере, а давление в контрольном объеме достигло $1,8 \cdot 10^{-7}$ тор.

Далее образец снова помещался в объем 13, и проводилась 8-часовая тренировка системы. К концу тренировки давление достигло $5 \cdot 10^{-7}$ тор, натекание $2,4 \cdot 10^{-6}$ лтор /сек.

Таблица 7

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
$N_2 + CO$	28	18,4	92
O_2	32	0,5	2,7
CO_2	44	1,1	5,3

Суммарное давление $p = 2 \cdot 10^{-6}$ тор

Результаты, полученные при испытании прогретого образца, позволяют оценить продукты разложения компаунда и десорбцию адсорбированных паров и газов, т.к. адсорбированные элементы могли быть удалены во время предварительной откачки объема 13 с образцом при прогреве до $200^\circ C$. Было измерено также натекание за счёт десорбционных потоков со стенок вакуумной системы экспериментального стенда (в основном измерительного колпака паромасляного агрегата) при снятом индукторе. Предельное натекание составило $Q_0 = 4,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{лтор}}{\text{сек}}$, т.е. значительно меньше, чем натекание с подсоединенным индуктором. Необходимо отметить, что натекание измерялось после проведения измерений с индуктором и стенки системы могли насытиться продуктами десорбции с индуктора.

Таким образом, натекание с индуктора после тридцатичасовой вакуумной тренировки составило $1,84 \cdot 10^{-4}$ лтор /сек.

При откачке 9 индукторов на стенде по схеме рис. 3 после тридцати часов вакуумной тренировки получено давление $1,3 \cdot 10^{-5}$ тор и натекание, пересчитанное на один индуктор, $1,3 \cdot 10^{-4}$ лтор /сек. Величина $1,3 \cdot 10^{-4}$ лтор /сек является усредненной и может быть принята за основу.

Проанализируем полученные результаты: суммарная поверхность оксидного компаунда, обращенная в вакуум, составляет $F_{\text{э.и.}} = 1690 \text{ см}^2$, поверхность меди $F_{\text{м.и.}} = 4900 \text{ см}^2$. Принимаем, что газовыделение с поверхности меди составит 1×10^{-8} лтор /сек^{1/4}, а десорбция с индуктора — $1,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{лтор}}{\text{сек}}$. В этом случае $q_{\text{э.и.}} = 4,8 \cdot 10^{-8}$ лтор /сек, см². Очевидно, что такой метод подсчета удельного газовыделения с поверхности оксидного компаунда в ин-

дукторе не является строгим, но все же дает возможность сравнить данные, полученные при испытании контрольных образцов. Отметим, что при таком подсчете пренебрегается величиной газовыделения с поверхности заглушек, выполненных из нержавеющей стали, которое, очевидно, значительно меньше, чем газовыделение с поверхности меди.

Сопоставление масс-спектра в контрольном объеме до (таблица 1) и после (таблица 2) открытия вентиля (5) (рис. 1) дает возможность определить массовый состав паро-газовых потоков, десорбирующихся с поверхности индуктора. Для предельного давления 7×10^{-8} тор, достигнутого в индукторе, масс-спектр отвечает данным табл. 8.

Таблица 8

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , Тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
OH	17	12,8	18,0
H_2O	18	37,4	53,0
$N_2 + CO$	28	11,2	16,0
O_2	32	2,3	3,0
-	42	1,1	2,0
CO_2	44	5,2	8,0

Суммарное давление $P = 7 \cdot 10^{-6}$ тор

Далее проанализируем результаты испытания контрольных образцов. Удельное газовыделение для предварительно прогретого образца при $200^\circ C$ составит:

а) Сразу после прогрева при достижении образцом комнатной температуры

$$q_{\text{э.о.}}^* = 8,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{лтор}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$$

б) После 24-часового пребывания образца в атмосфере и последующей 8-часовой вакуумной тренировки

$$q_{\text{э.о.}}^{**} = 2,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{лтор}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}$$

Для непрогретого образца после 6-часовой вакуумной тренировки

$$q_{\text{э.о.}}^{***} = 2,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{лтор}}{\text{сек см}^2}$$

Массовый состав спектра прогретого образца показан в табл. 7. Основная компонента (92% по парциальному давлению) имеет массовое число 28. В спектре имеются также массы 32 (2,7%) и 44 (5,3%).

В табл. 9 приведен масс-спектр для непрогретого образца, определяемый разностью пиков по табл. 5 (ввод образца) и по табл. 4 (имитация ввода образца для оценки сопутствующего влияния атмосферного воздуха).

Как видно из таблиц 7 и 9, прогрев образца сильно влияет на массовый спектр остаточных газов. В масс-спектре прогретого образца отсутствуют, как и следовало ожидать, пары воды, тогда как содержание компоненты с массовым числом 28 велико. Это объясняется, по-видимому, развивающимся при прогреве разложением компаунда с выделением окиси углерода. Подобная трактовка развития десорбции подтверждается также наблюдаемым повышением натекания с образца при прогреве.

Таблица 9

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
OH	17	4,3	19,0
H ₂ O	18	15,3	68,0
N ₂ + CO	28	2,9	12,2
CO ₂	44	0,2	0,8
Суммарное давление $P = 2,2 \cdot 10^{-6}$ тор			

Испытание опытных индукторов показало, что в секции может быть получено необходимое давление $< 1 \cdot 10^{-5}$ тор. Однако газовыделение, приведенное к поверхности оксидного компаунда индуктора, оказалось в два раза выше, чем газовыделение с контрольного образца. Учитывая то, что в процессе

изготовления индуктора компаунд не должен был претерпевать структурных превращений, резко меняющих характер и интенсивность десорбции, следует предположить, что наблюдаемое увеличение газовыделения объясняется технологическими причинами, проявившимися в наличии в вакуумной полости щелей малой проводимости и нарушениями вакуумной гигиены в производственных условиях.

Близость удельных величин газовыделения с поверхностями прогретых и непрогретых образцов и индуктора при одинаковых условиях их последующей тренировки показывает малую эффективность прогрева для обезгаживания компаунда. Более того, попытка температурного обезгаживания компаунда может привести к ухудшению вакуумных характеристик материала. Иными словами, прогрев, вызывая преимущественно термическое разложение полимера, лишь в незначительной степени ускоряет процесс удаления сорбированных материалом паров и газов. Необходимо отметить также, что десорбция при прогреве полимера обладает значительной инерционностью.

Анализ массового состава спектра непосредственно после прогрева показывает рост относительного содержания компоненты с массовым числом 28. Это явление может быть объяснено диссоциацией молекул малеинового ангидрида, входящего в состав полимера, при его прогреве с выделением свободной окиси углерода, накоплением последней в объеме компаунда и последующим медленным выделением её сквозь толщу материала в вакуумный объем. При таком механизме явления следует ожидать, что время восстановления исходного, т.е. существовавшего до начала прогрева, газовыделения компаунда в процессе окончания прогрева будет пропорционально температуре и длительности разогрева и толщине полимерной компоненты индуктора.

Поскольку основным возможным местом сосредоточения грязи в процессе изготовления индуктора были щели между фокусирующей катушкой и магнитным экраном, то была предпринята попытка отказаться от магнитного экрана.

Измерения показали, что даже при значении магнитного поля на оси индуктора в 1000 гаусс не происходит заметного изменения магнитных характеристик индуктора. В связи с этим оказалось возможным устранить магнитный экран и избавиться от щелей.

В табл. 10 и на рис. 7 а и б дана динамика откачки секции, составленной из 12 усовершенствованных индукторов. Перед подсоединением секции к агре-

гату ВА-05-1 измерены предельное давление насоса P_n и натекание в колпак и в подсоединительный патрубок Q_n , в зависимости от продолжительности вакуумной тренировки, и быстроты откачки на входном фланце насоса в рабочем диапазоне давлений. Предельные параметры агрегата: $P_\infty = 4 \cdot 10^{-7}$ тор, $Q_\infty = 0,025 \cdot 10^{-3}$ лтор /сек.

После тридцатичасовой вакуумной тренировки натекание с одного индуктора составляет

$$Q_n = \frac{10 \cdot 10^{-4}}{12} = 0,83 \cdot 10^{-4} \text{ лтор /сек,}$$

Таблица 10

Продолжительность вакуумной тренировки (час)	Давление, тор			Натекание лтор /сек	Примечание
	ЛТ-2#1	ЛМ2-#1	ЛМ-2#2		
1	$1,5 \cdot 10^{-1}$				Откачка насосом ВН-2
2	$1,3 \cdot 10^{-1}$				
3	$1,2 \cdot 10^{-1}$				
4	$1,1 \cdot 10^{-1}$				
1		$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$25 \cdot 10^{-3}$	Откачка агрегатом ВА-05-1
2		$6,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$		
5		$3,5 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$		
6		$2,6 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	
10		$8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	
26		$7,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	
30		$7,3 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	
36		$7 \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	
60		$3,4 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$0,61 \cdot 10^{-3}$	

что значительно меньше, чем натекание, полученное для опытного индуктора, равное, как указывалось выше, $1,84 \cdot 10^{-4}$ лтор /сек, и соответствует газовыделению с контрольного образца.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕКЦИИ В УСКОРИТЕЛЕ

В этом случае, как это указывалось выше, измерения вакуумных параметров в объемах инжектора и ускоряющей системы проводилось с помощью манометрических преобразователей (4) и (12) и датчиков "Омегатрона" (8) и (14) (рис. 4).

В процессе тренировки ловушки вакуумных агрегатов охлаждались жидким азотом.

Проверка герметичности вакуумных уплотнений индукторов производилась с помощью течеискателя ПТИ-6. Опыт неоднократной сборки десятка секций показывает, что герметичность уплотнений достигается легко и наличие большого количества уплотнений по поверхности эпоксидного компаунда не вызывает каких-либо осложнений при эксплуатации ускорителя. Динамика тренировки ускорителя в процессе запуска показана на рис. 8.

Видно, что необходимое для работы ускорителя разрежение может быть получено в приемлемые сроки. Предельное разрежение в объеме инжектора меньше $7 \cdot 10^{-7}$ тор, а в объеме ускоряющей системы $\approx 3 \cdot 10^{-8}$ тор.

Следует отметить, что в оттренированной системе предельное разрежение достигается за 1-2 часа после включения высоковакуумных агрегатов, что, очевидно, вполне достаточно для нормальной эксплуатации ускорителя.

Результаты масс-спектрометрического анализа остаточных газов для удобства анализа объединены в четырех сводных таблицах. В табл. 11 и 12 приведены результаты анализа остаточных газов в инжекторе и ускоряющей системе без электронного пучка; в табл. 13 - с неускоренным электронным пучком; а в табл. 14 - с ускоренным. При этом приняты соединяющие обозначения:

I - ток пучка; U_a - вытягивающее напряжение на аноде инжектора, U_y - суммарное ускоряющее напряжение на индукторах.

В таблицу 11 включены результаты следующих экспериментов.

1. Масс-спектр в объеме неработающего инжектора с выключенным накалом катода электронной пушки; шибер 7 закрыт. Давление в объеме инжектора $4,4 \cdot 10^{-7}$ тор, в объеме ускоряющей системы - $4,2 \cdot 10^{-8}$ тор.

Таблица II

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Номера экспериментов							
		I		2		3		4	
		Относительное содержание, %	Относительное содержание, %	Относительное содержание, %	Относительное содержание, %	Относительное содержание, %	Относительное содержание, %	Относительное содержание, %	Относительное содержание, %
		Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор	Парциальное давление $P_i \times 10^7$ тор
H ₂	2							0,24	2,2
CH ₂	14				0,26			0,17	1,6
CH ₃	15				0,20			0,15	1,4
CH ₄	16				0,16			0,46	4,3
OH	17				0,50			1,22	11,2
H ₂ O	18	4,2	3,4		1,3			4,37	40
N ₂ +CO+C ₂ H ₄	28	0,18	6,8		5,0			0,62	5,6
CO ₂	44	0,30	6,8		0,64			3,70	33,6
Тяжелые углеводороды	> 44	0,32	88		3,94				
Суммарное давление, тор		3,40	88						
				4,2 · 10 ⁻⁷	3,8 · 10 ⁻⁷				1,1 · 10 ⁻⁶

2. Те же условия, но шиббер 7 открыт. Давление в объеме инжектора $4 \cdot 10^{-7}$ тор, в объеме ускоряющей системы $4,5 \cdot 10^{-6}$ тор.

Таблица 12

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Парциальное давление, $P_i \times 10^7$ тор	Относительное содержание, %
H ₂	2	1,2	2,9
CH ₂	14	0,5	1,2
CH ₃	15	0,4	0,9
CH ₄	16	0,2	0,5
OH	17	4,3	10
H ₂ O	18	15,6	37,2
N ₂ +CO+C ₂ H ₄	28	10,1	24
CO ₂	44	2,6	6,3
Тяжелые углеводороды	> 44	7,1	17

Суммарное давление $P = 4,2 \cdot 10^{-6}$ тор

3. Масс-спектр в объеме инжектора при включенном накале катода электронной пушки; шиббер 7 закрыт. Давление в объеме инжектора $1,2 \cdot 10^{-6}$ тор, а в объеме ускоряющей системы $3,8 \cdot 10^{-6}$ тор.

4. Те же условия, что и в п. 3, но шиббер 7 открыт. Давление в объеме инжектора $1,1 \cdot 10^{-6}$ тор, в объеме ускоряющей системы $3,8 \cdot 10^{-6}$ тор.

В табл. 12 приведен масс-спектр остаточных газов в объеме системы ускорения при выключенном накале катода электронной пушки.

В табл. 13 включены следующие эксперименты:

1. Масс-спектр остаточных газов в объеме инжектора при прохождении через ускоритель неускоренного пучка электронов в объеме ускоряющей системы $4,8 \cdot 10^{-6}$ тор. Параметры пучка:

Таблица 13

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Номера экспериментов					
		1		2		3	
		Парциальное давление, P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %	Парциальное давление, P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %	Парциальное давление, P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
H ₂	2					1,4	7,6
CH ₂	14					0,5	2,7
CH ₃	15					0,44	2,4
CH ₄	16					0,35	1,9
OH	17	0,28	2	0,21	1,8	0,99	5,3
H ₂ O	18	0,62	5,2	0,56	4,7	2,9	15,6
N ₂ +CO+C ₂ H ₄	28	4,4	36,6	3,2	27,5	3,59	19,4
CO ₂	44	0,92	7,6	0,94	8,0	1,4	7,6
Тяжелые углеводороды	>44	5,84	48,6	6,88	58,0	6,93	37,5
Суммарное давление, тор		1,2 · 10 ⁻⁶		1,2 · 10 ⁻⁶		1,8 · 10 ⁻⁶	

Таблица 14

Компонента газовой смеси	Масса, а.е.м.	Номера экспериментов					
		1		2		3	
		Парциальное давление P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %	Парциальное давление P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %	Парциальное давление P_i , тор $\times 10^7$	Относительное содержание, %
H ₂	2			0,86	4,4	1,07	2,5
CH ₂	14			0,37	1,8	0,54	1,2
CH ₃	15			0,19	0,9	0,37	0,9
CH ₄	16			0,12	0,5	0,13	0,3
OH	17			1,31	6,4	2,28	5,3
H ₂ O	18	0,2	2,3	4,37	21,2	15,7	37
N ₂ +CO+C ₂ H ₄	28	1,8	21,5	5,25	25,3	11,2	24,3
CO ₂	44	0,46	5,4	1,37	6,6	2,68	6,3
Тяжелые углеводороды	>44	6,0	70,8	6,84	33,1	9,37	22,2
Суммарное давление, тор		8,4 · 10 ⁻⁷		2,0 · 10 ⁻⁶		4,2 · 10 ⁻⁶	

$$I = 40 \text{ а}, \quad U_a = 200 \text{ кв.}$$

2. Те же условия, но давление в объеме ускоряющей системы $6,5 \cdot 10^{-6}$ тор,
 $I = 49 \text{ а.}$

3. Масс-спектр остаточных газов в объеме системы ускорения при прохождении неускоренного пучка электронов. Параметры пучка: $I = 38 \text{ а},$
 $U_a = 240 \text{ кв.}$ Эти испытания проводились при отсоединенном паромасляном агрегате 13, рис. 4. В табл. 14 включены результаты следующих экспериментов.

1. Масс-спектр остаточных газов в объеме инжектора при прохождении ускоренного пучка. Давление в объеме инжектора $8,8 \cdot 10^{-7}$ тор, в объеме ускоряющей системы $7,5 \cdot 10^{-6}$ тор. Параметры пучка: $I = 75 \text{ а}, \quad U_a = 150 \text{ кв},$
 $U_y = 750 \text{ кв.}$

2. Масс-спектр остаточных газов в объеме ускоряющей системы при прохождении ускоренного пучка. Параметры пучка: $I = 40 \text{ а}, \quad U_a = 240 \text{ кв},$

$$U_y = 910 \text{ кв.}$$

3. Те же условия, но параметры пучка: $I = 57 \text{ а}, \quad U_a = 225 \text{ кв},$

$$U_y = 820 \text{ кв.}$$

При этих экспериментах также был отключен агрегат 13, рис. 4.

Сравнение масс-спектров, приведенных в таблице 11, показывает, что газоразделение в объеме ускоряющей системы не влияет на давление в объеме инжектора, причем относительное содержание компонент газовой смеси, выделяющихся из эпоксидного компаунда (см. 83), в объеме инжектора не увеличивается, а уменьшается. Следовательно, газоразделение из индукторов не должно влиять на эмиссионную способность катода электронной пушки.

Большое относительное содержание тяжелых углеводородов в объеме инжектора в данном и последующих экспериментах может быть объяснено загрязнением вакуумных объемов, и в частности датчика РМО-4С, парами масла, падающими либо из вакуумных агрегатов в результате некачественной конструкции ловушек и недостаточного охлаждения их жидким азотом, либо по какой-то другой причине. Анализ всех масс-спектров в таблице 11 показывает, что основным источником тяжелых углеводородов является объем инжектора. Масс-спектр, приведенный в таблице 12, показывает, что давление в ускоряющей системе определяется в основном компонентами газовой смеси с массами 18 и 28, обычно выделяющимися в недостаточно оттренированных вакуумных системах. Некоторое количество указанных компонент должно выделяться и из

эпоксидного компаунда, примененного в индукторах. Сравнение масс-спектров 1 и 2 в табл. 13 подтверждает выводы, сделанные при рассмотрении табл. 11. Из сравнения масс-спектров табл. 12 и 3 табл. 13 можно сделать вывод, что наличие в системе неускоренного электронного пучка не приводит к увеличению относительного содержания компонент газовой смеси, выделяющихся из эпоксидного компаунда. Следовательно, при наличии неускоренного электронного пучка газоразделение из эпоксидного компаунда не увеличивается сколько-либо заметно.

Сравнение масс-спектров 1 и 3 табл. 14 также подтверждает выводы, сделанные при рассмотрении табл. 11. Анализ масс-спектров 3 таблицы 13 и 2 и 3 табл. 14 показывает, что увеличение энергии (мощности) пучка вызывает незначительное повышение относительного содержания компонент газовой смеси с массами 17, 18 и 28. Вероятнее всего, это обусловлено увеличением газоразделения из графитного коллектора при его нагреве пучком. Не исключено, что увеличение относительного содержания газовой компоненты с массой 28 может быть вызвано разложением под влиянием облучения тяжелых углеводородов с выделением компоненты C_2H_4 .

Следует отметить, что из-за большого относительного содержания тяжелых углеводородов идентификация и точное количественное определение компонент газовой смеси были затруднены. Кроме того, при обработке масс-спектров, зафиксированных самописцем, парциальные давления компонент газовой смеси определялись по амплитудам составляющих пиков без учета их площади, что привело к получению заниженных данных по относительному содержанию углеводородов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано следующее:

1. Десорбция с поверхности индукторов имеет величину, при которой возможно осуществление откачки и поддержание давления в области пучка $< 5 \cdot 10^{-6}$ тор небольшим количеством высоковакуумных агрегатов.

2. Ускоряющая система достаточно быстро оттренировывается, и в ней без труда поддерживается давление $< 5 \cdot 10^{-6}$ тор. В оттренированной системе

требуемое разрежение достигается примерно через два часа после включения высоковакуумных агрегатов.

3. Спектральный состав остаточных газов при исследовании десорбции с поверхности опытных индукторов и контрольных образцов мало отличается от атмосферного. В спектре же остаточного газа в ускорителе содержатся тяжелые углеводороды, наличие которых, по-видимому, обусловлено миграцией масла из паромасляных агрегатов вследствие недостаточно хорошей защиты азотными ловушками.

4. Осуществляется надежное уплотнение между поверхностями индукторов.

5. Разрежение в области инжектора лучше, чем в области ускорительной системы, и имеет значение $< 1 \cdot 10^{-6}$ тор. Подсоединение ускоряющей системы не ухедшает вакуума в области катода электронной пушки. Влияния ускоряющей системы на эмиссионную способность пушки не обнаружено.

6. Давление в области ускорительной системы не изменяется при прохождении через систему ускоренного или неускоренного сильноточного пучка электронов.

Итак, проведенные исследования показывают возможность осуществления ускоряющей системы без специальной вакуумной трубки. Следует отметить, что при проведении исследований на ускорителе было отмечено изменение зазора между индукторами, что приводило к возможности возникновения пробоя между соседними индукторами. Увеличение зазора на 3 мм привело к полному прекращению пробоев. В связи с этим при изготовлении индукторов должно быть обращено внимание на прочность медного кожуха (первичной обмотки).

Л и т е р а т у р а

1. N. Christofilos и др. В кн. "Труды Международной конференции по ускорителям высоких энергий" (Дубна, 1963), М., Атомиздат, 1964, стр. 1073.
2. Н.С. Педенко и др. Сборник "Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой", Киев, 1965, стр. 229.
3. А.И. Анашкин, О.С. Богданов, П.В. Букаев, Ю.П. Вахрушин и др. Атомная энергия, 21, стр. 439 (1966).
4. Н.Я. Басалаева. ЖТФ, 28, стр. 1102 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел
19 апреля 1967 года.

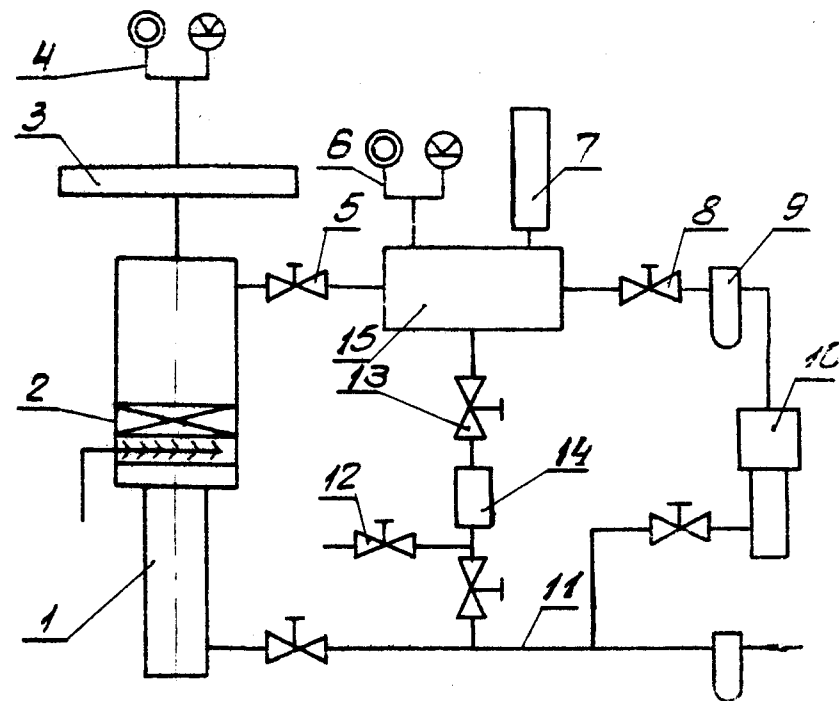


Рис. 1. Вакуумная система экспериментального стенда.

- 1 - вакуумный агрегат ВА-05-1;
- 2 - шибер; 3 - индуктор;
- 4 - измерительный блок; 5 - вентиль ВМ-40; 6 - измерительный блок; 7 - датчик "Хронотрона" МСХ-3; 8 - вентиль ВМ-40;
- 9 - азотная ловушка; 10 - парортутный насос РН-31; 11 - форвакуумная линия; 12 - натекатель; 13 - вентиль ВМ-40;
- 14 - объем для размещения контрольного образца; 15 - контрольный объем ($V = 4,25$ л).

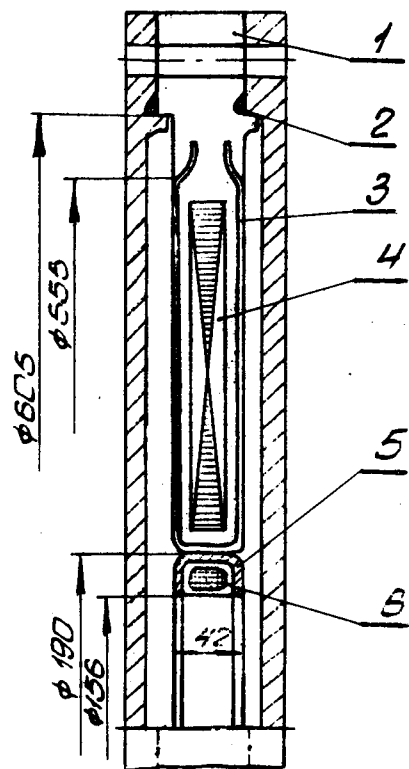


Рис. 2. Схема индуктора.
 1 - эпоксидный компаунд; 2 - уплотняющая прокладка;
 3 - вакуумно-плотный медный кожух (первичная обмотка);
 4 - сердечник; 5 - магнитный экран; 6 - изоляция фокусирующей катушки из эпоксидного компаунда.

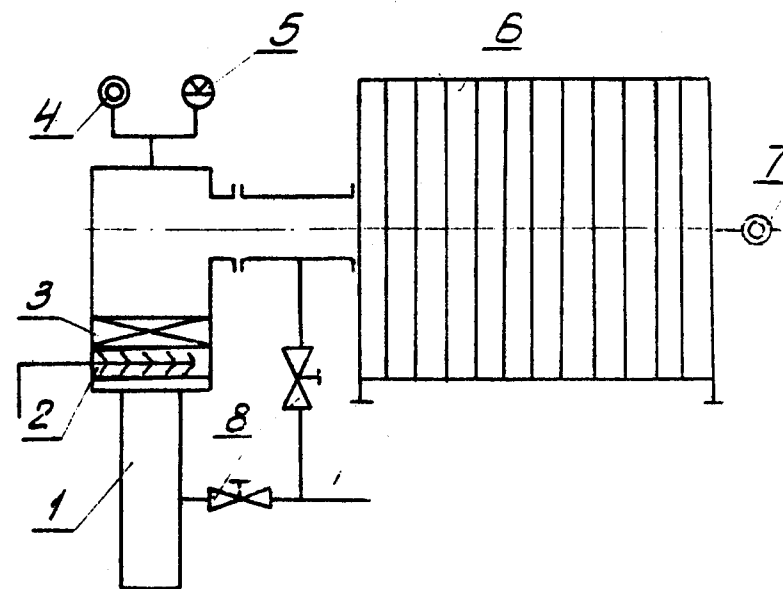


Рис. 3. Вакуумная система стенда.
 1 - агрегат ВА-05-1; 2 - азотная ловушка; 3 - шибер;
 4 - манометрический преобразователь ЛТ-2; 5, 7 - манометрический преобразователь ЛМ-2; 6 - индуктор; 8 - вентиль.

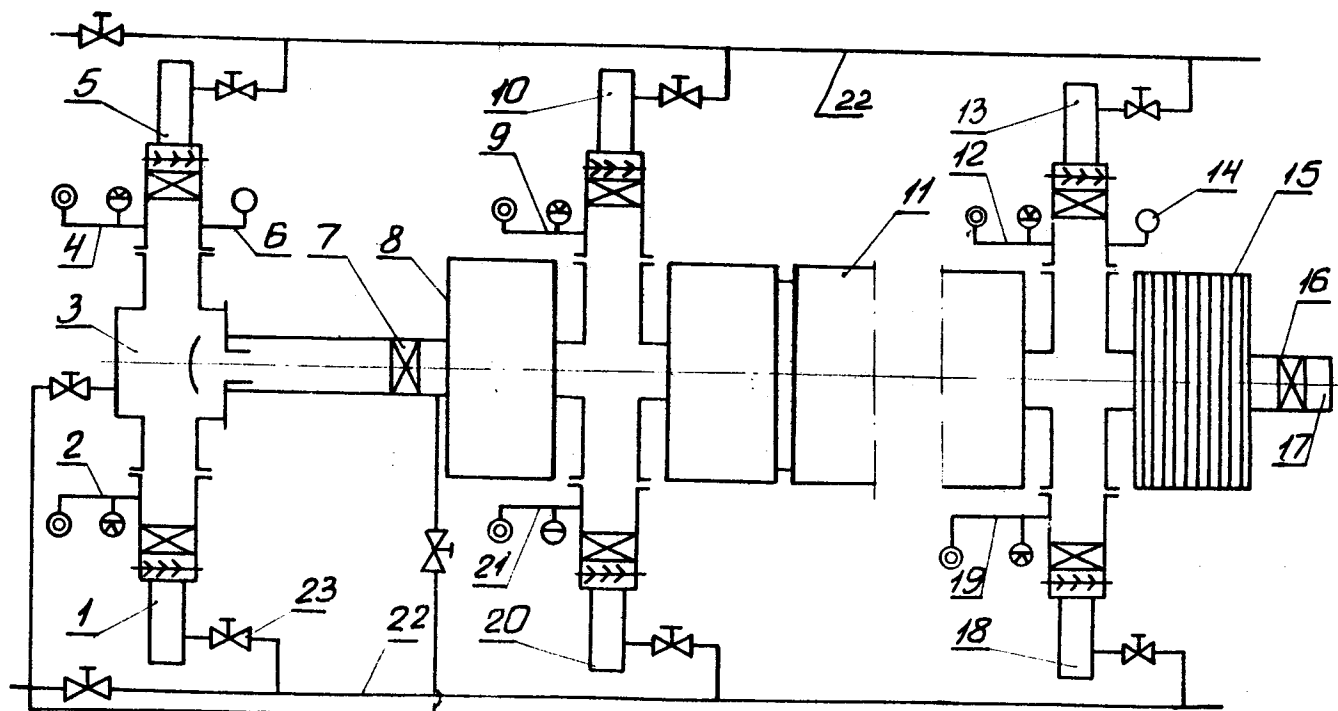


Рис. 4. Схема вакуумной системы ускорителя.
 1,5,10,13,18,20 - вакуумный агрегат ВА-05-4;
 2,4,9,12,19,21 - измерительный блок из манометрических преобразователей ЛМ-2 и ЛТ-2; 3 - инжектор; 6,14 - датчик РМО-4С; 7,16 - шибер; 8,11 - секции ускорительные с трубкой; 15 - секция ускорительная без трубки; 17 - коллектор; 12 - форвакуумная линия; 23 - вентиль.

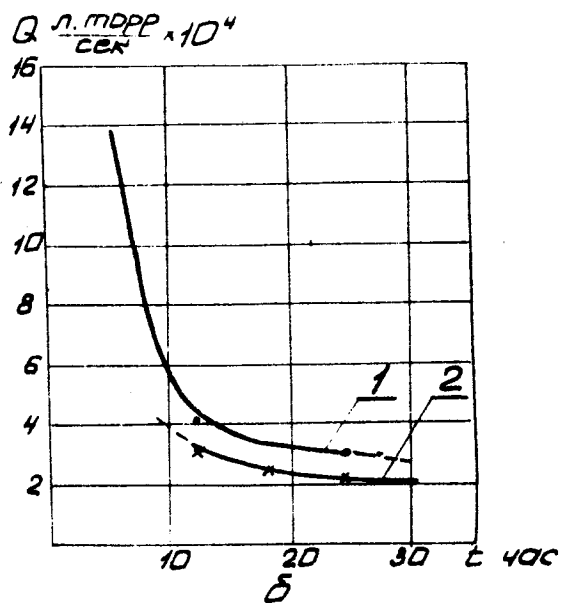
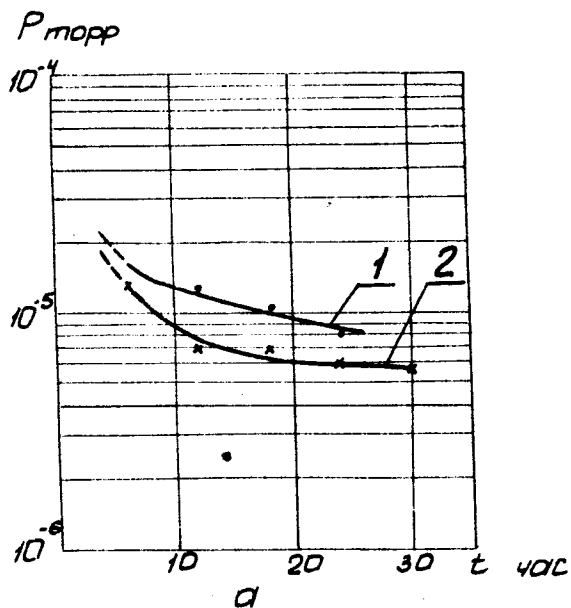


Рис. 5. Динамика вакуумной тренировки индуктора.
 1 - до прогрева; 2 - после прогрева.

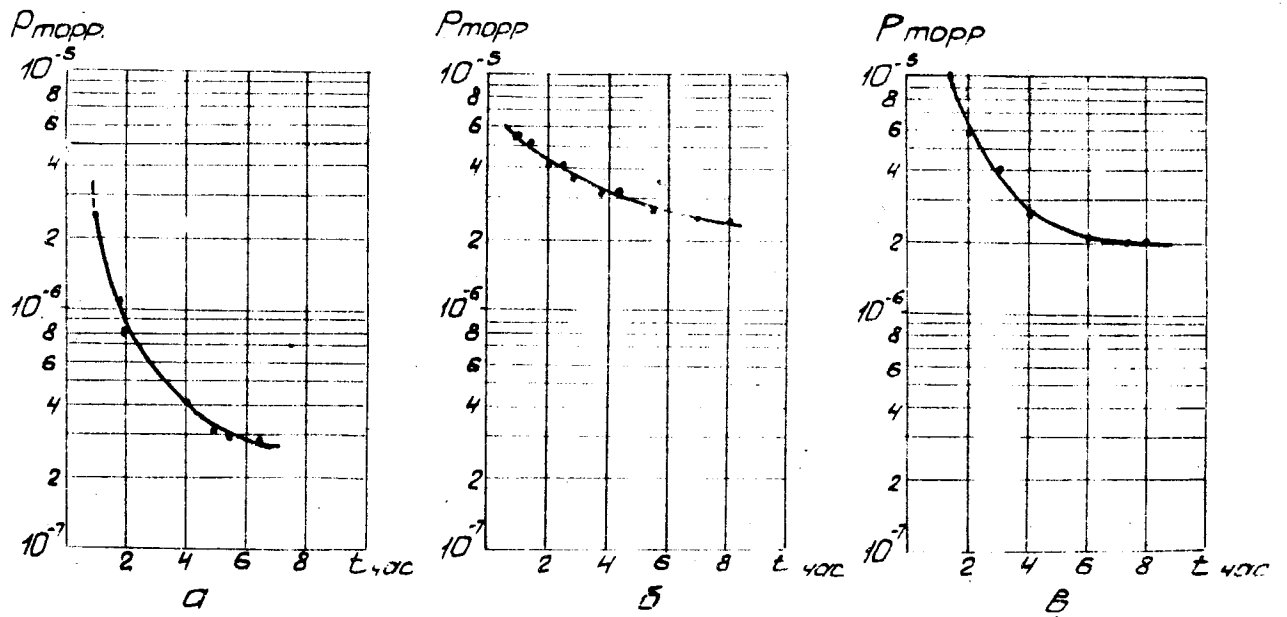


Рис. 6. Динамика тренировки контрольного образца.
 а - имитация ввода образца; б - непрогретый образец;
 в - предварительно прогретый образец.

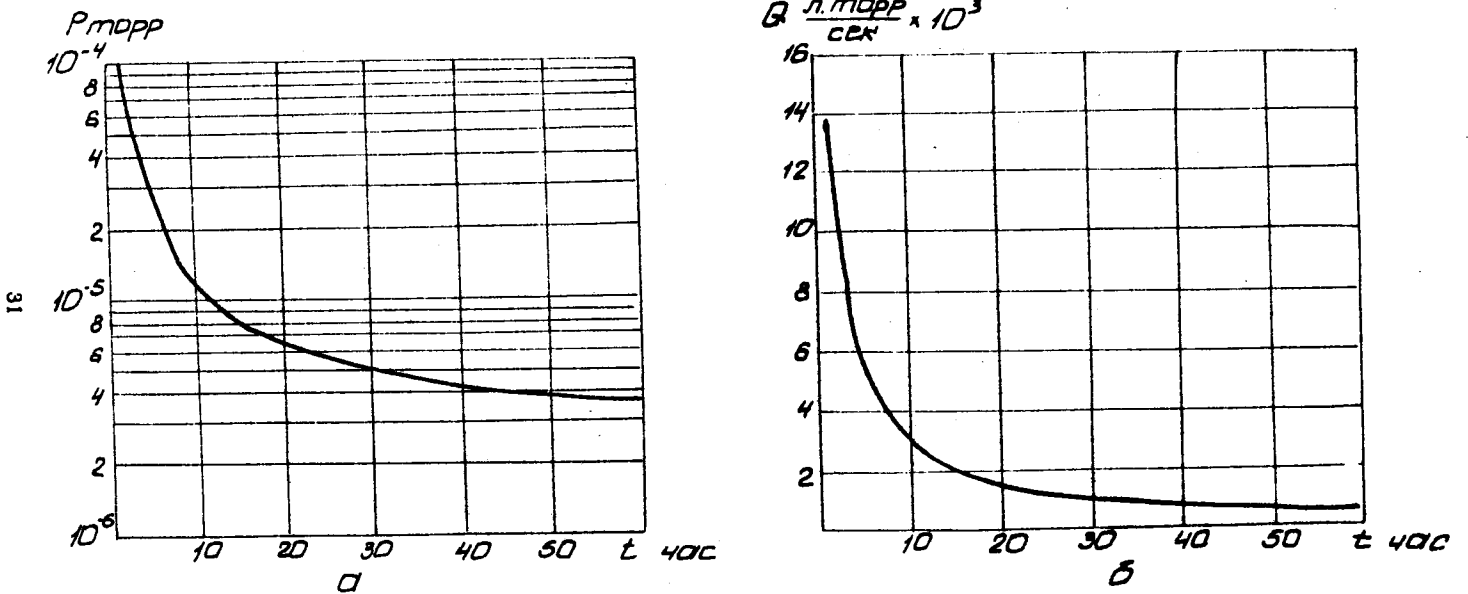


Рис. 7. Динамика тренировки секции.

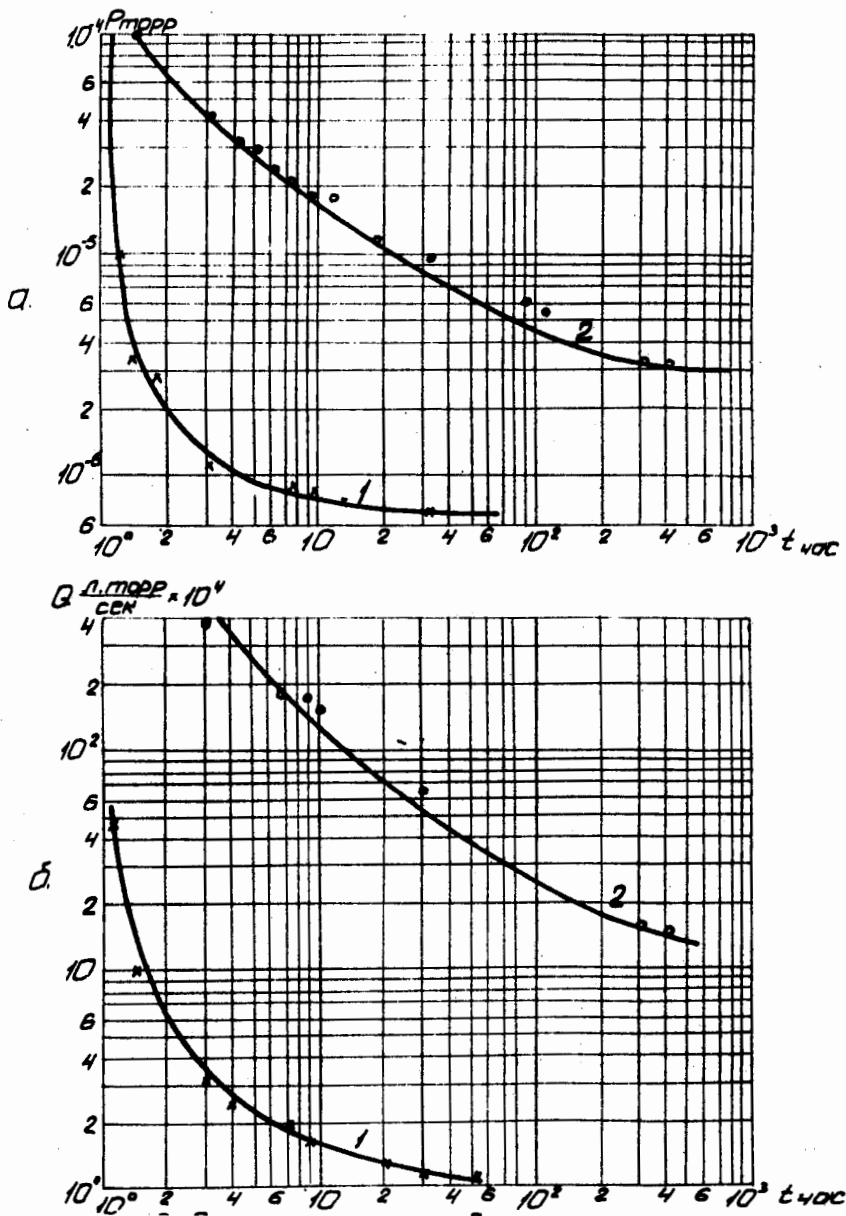


Рис. 8. Динамика тренировки ускорителя.
 1 - в объеме инжектора; 2 - в объеме ускоряющей системы.