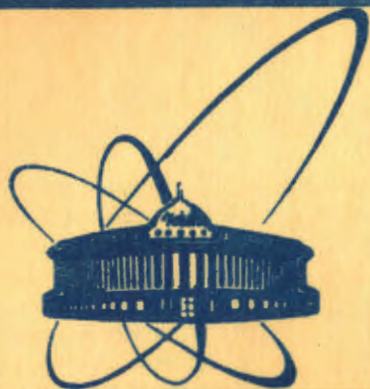


2/IV-84



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

1637/84

9-83-846

**А.Аугустин, В.Гёлер, Й.Гир, К.Дёге,
Г.Ландграф, Х.Любер, Б.Кнауэр, В.И.Мионов,
Ф.Мукке, В.П.Саранцев, Х.Рёле, З.Титтель,
В.Фрикке, Р.Халлер, И.М.Хохлов,
В.С.Швецов, А.С.Щеулин**

КОНСТРУКЦИЯ АДГЕЗАТОРА КУТИ-20

Силовой блок, камера

1983

Адгезатор^{/1/} коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20 представляет собой комплекс устройств, предназначенных для формирования, сжатия и предварительного ускорения электронных колец. Одним из важных его устройств является силовой блок, объединяющий в себе ряд функционально различных узлов, составляющих в совокупности базовую конструкцию адгезатора. Повышенная цикличность /до 20 Гц/ работы ускорителя и возникающие при этом высокие тепловые и механические нагрузки создают напряженные условия работы всех узлов силового блока, и разработка их становится сложной технической задачей. В данной работе рассмотрены конструктивные особенности силового блока, детально описана металлическая камера как нагруженный элемент конструкции, определяющая долговременную работу силового блока на ускорителе КУТИ-20.

СИЛОВОЙ БЛОК

При разработке силового блока адгезатора /р ис.1/ применен функционально-узловой метод конструирования, основанный на разделении блока на функционально законченные части, позволяющие непрерывно совершенствовать весь блок без коренных изменений схемы построения и конструкции адгезатора. Такими частями являются камера в блоке жесткости, стапель, состоящий из двух одинаковых частей, и дополняющие его контейнеры IV ступеней сжатия и градиентного соленоида. Своеобразным конструктивным элементом является находящаяся между камерой и стапелем жидкостная прослойка^{/2/}, выполняющая одновременно функции снижения тепловых и динамических нагрузок. Стапель и кольцо жесткости камеры изготовлены из стеклотекстолита как наиболее прочного и стабильного во времени пластмассового материала, имеют влагозащитное покрытие. В силовом блоке предусматривается устройство для юстировки и жесткой фиксации медианной плоскости и оси конструкции, следовательно, камеры и катушек, фиксируемых в составе блока относительно базовых осей ускорителя с точностью 0,5 мм.

Атмосферное давление нагружает камеру статически. Под воздействием импульсных магнитных полей стенки камеры подвергаются вибрационным и тепловым нагрузкам. Жидкость, смачивая стенки камеры и стапеля, приводит к перераспределению сил, действующих на стенки камеры, и увеличивает массу, воспринимающую динамические нагрузки. Значительно уменьшаются амплитуда колебаний и динамические нагрузки стенок камеры. В результате протока жидкости обеспечивается нормальный тепловой режим камеры.

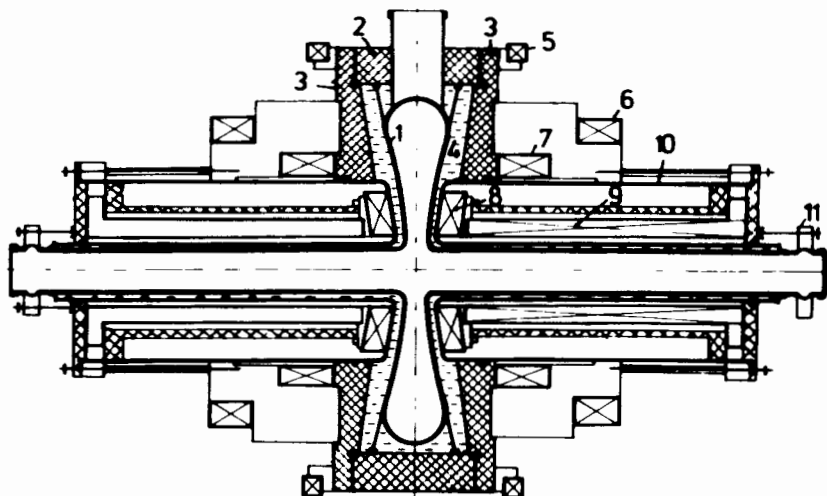


Рис.1. Силовой блок с катушками магнитной системы:
1 - камера; 2 - блок жесткости; 3 - ступень; 4 - жидкостная прослойка; 5 ÷ 9 - катушки магнитной системы; 10 - контейнер; 11 - устройство растяжения патрубков.

КАМЕРА

К камере как устройству, создающему определенные физические условия при формировании электронно-ионных колец, предъявляются следующие требования:

- 1/ оболочка камеры - неферромагнитный тонколистовой металл с возможно большим электросопротивлением /3/;
 - 2/ изменение аксиальной апертуры камеры пропорционально ее радиусу /3/;
 - 3/ несимметрия апертуры камеры относительно медианной плоскости магнитной системы - 2%;
 - 4/ возможность получения в камере вакуума - $2 \cdot 10^{-9}$ Тор.
- К камере также предъявляются требования длительной работоспособности.

На прототипе КУТИ/ПКУТИ/ранее использовалась сварная конструкция камеры из тонколистовой стали 12X18H9T со сферическими стенками и вогнутой тороидальной обечайкой/рис.2а/. Сочетание низких механических и резистивных характеристик металла не позволяло использовать эту камеру на КУТИ-20 /табл.1/. Материал и конструкция новой камеры более полно отвечают физико-техническим требованиям, предъявляемым к ней. Камера, применяемая на КУТИ-20, выполнена из листового титанового сплава ОТ4-1. Конструктивно она представляет собой объем, образованный сферическими стенками и выпуклой тороидальной частью, а технологически состоит из двух

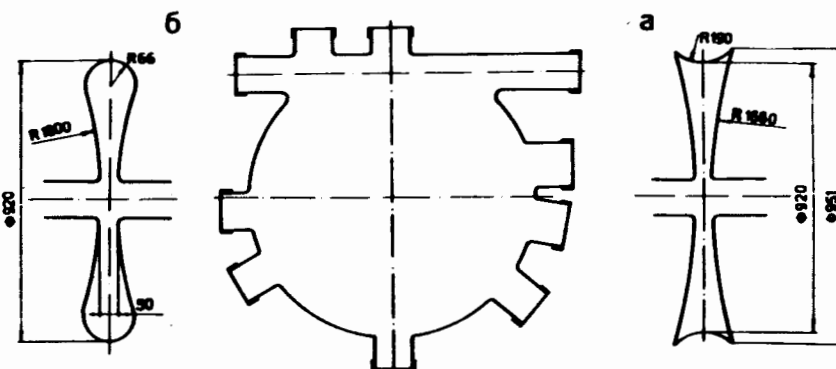


Рис.2. Форма камеры: а - с вогнутой обечайкой; б - с выпуклой обечайкой.

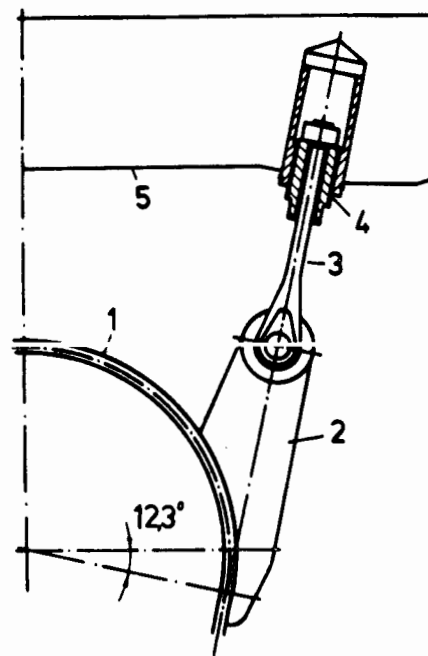


Рис.3. Элемент подвески камеры:
1 - камера; 2 - гребенка; 3 - растяжка; 4 - винтовая пара; 5 - блок жесткости.

симметричных штампуемых частей, свариваемых в медианной плоскости /рис.2б/. Выбор выпуклой формы тороидальной части позволил уменьшить сечение камеры, на которое механически воздействует атмосфера, откачиваемые объем и поверхность металла, а также длину вакуумных сварных швов. Получаемое в камере давление - ниже $2 \cdot 10^{-9}$ Тор. В районе перехода тороидальной и сферической поверхностей приварены гребенки, образующие Т-образные соединения, усиливающие тороидальную часть /рис.3/. Регулируемыми винтовыми парами через гребенки камера устанавливается в кольцевом блоке жесткости относительно его медианной плоскости и оси с точностью 0,5 мм. Камера, размещенная в блоке жесткости, - функционально законченный паспортизируемый узел силового блока адгезатора /рис.4/. Следует отметить, что титановые сплавы, имеющие существенные преимущества по физико-механическим характеристикам перед неферромагнитными сталями, относятся к классу труднообрабатываемых /табл.1/. Решение задач штамповки частей камеры необходимых раз-

Таблица 1

Наименование показателей	Марка материала		
	12X18H9T	OT4-1	BT-20
Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ⁻³	7,9	4,55	4,45
Теплопроводность λ , Вт м ⁻¹ , °C	15,1	9,64	7,96
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, / °C/-1	17,2	8,6	8,8
Удельная теплоемкость С, Дж кг ⁻¹ · °C	494	502,8	548,9
Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^6$, Ом·м	0,72	1,1	1,8
Предел текучести σ_{02} , МПа	220	500	900
Предел прочности σ_B , МПа	500	700	1100
Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	20,2	11	12
Относительное удлинение, %	40	20	10

меров и формы и последующего ее изготовления определяло возможность создания камеры. Оптимальной технологической схемой процесса формообразования частей камеры стала схема штамповки-вытяжки из плоской заготовки эластичным пуансоном по жесткой матрице. Штамповка производилась в несколько этапов с межоперационным вакуумным отжигом. Многократный вакуумный отжиг частей камеры по специальному режиму и последующее травление исключили насыщение металла водородом и сняли с поверхности посторонние включения и окислы проката, что важно для сохранения вакуумных и механических свойств сплава. Ввиду высокой активности сварочной зоны и больших поворотов металла сварка велась в жестком стапеле, предусматривающем местную аргонозащитную среду.

РАСЧЕТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕНЗОИЗМЕРЕНИЙ

Конструктивные и технологические требования к камере определили следующие исходные данные для ее расчета:

- радиус камеры $R_K = 460$ мм;
- минимальная апертура камеры $a = 50$ мм;
- толщина материала камеры $S = 0,8$ мм;
- число элементов подвески /ребенок/ $n = 60$.

Расчетная схема /рис.5/ была выбрана в предположении, что конструкция подвески не вносит изгибающих моментов в оболочку камеры.

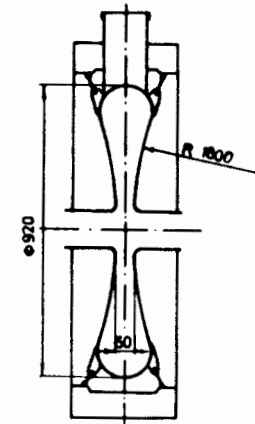


Рис.4. Камера в блоке жесткости.

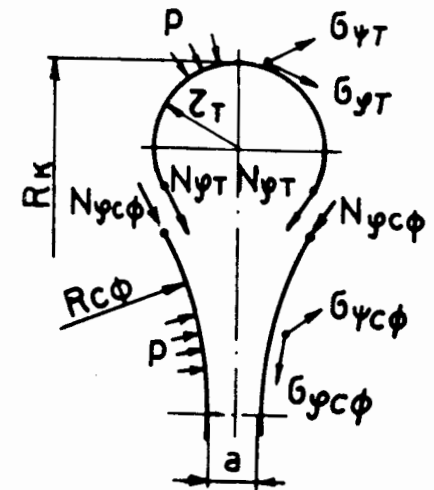


Рис.5. Расчетная схема.

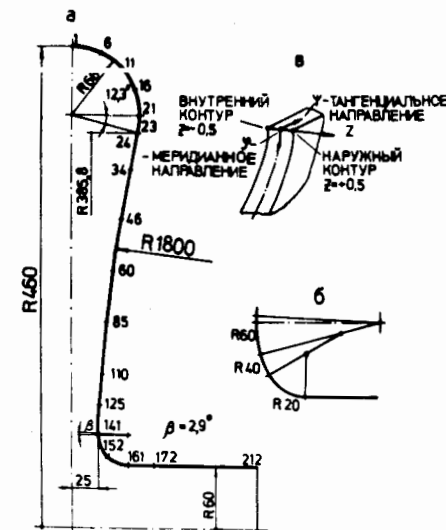


Рис.6. Геометрия камеры с характерными точками /а/, переход "сфера-патрубок"/б/, принятые обозначения /в/.

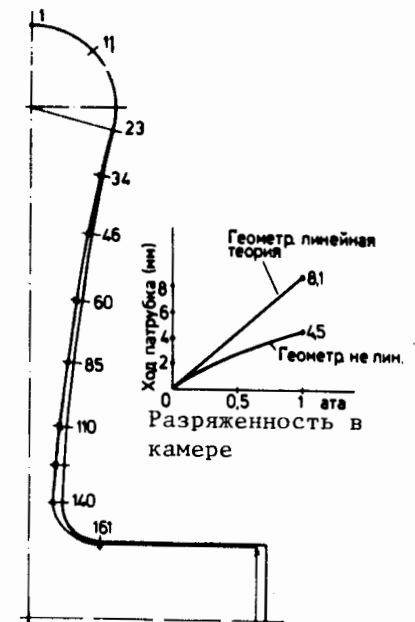


Рис.7. Перемещение стенок камеры под действием вакуума.

Расчетными формулами при статическом нагружении явились следующие: для напряжений в торе

$$\sigma_{\phi T} = \frac{Pr_T}{2S} \cdot \frac{2 + \frac{r_T}{R_T} \cdot \sin \alpha}{1 + \frac{r_T}{R_T} \cdot \sin \alpha} \approx \frac{Pr_T}{S}; \quad \sigma_{\psi T} = \frac{Pr_T}{2S},$$

для напряжения в сфере $\sigma_{сф} = P \cdot R_{сф} / 2S$; для сил в меридианном направлении $N_{\phi T} = \sigma_{\phi T} \cdot S$; $N_{\phi сф} = \sigma_{\phi сф} \cdot S$ и усилия на одну подвеску $N = (N_{\phi T} + N_{\phi сф}) \cdot 2\pi \cdot R_{сп} / \pi$; где P - внешнее давление, $R_{сп}$ - радиус сопряжения сферы и тора, ψ, ϕ - индексы, относящиеся к окружному и меридианному направлению соответственно.

Из геометрических соотношений размеров оболочки и приведенных формул вытекает, что уменьшение радиуса сферы приводит:

- к снижению напряжений в сфере и уменьшению силовых потоков через гребенки, что способствует увеличению ресурса работы камеры в условиях статических и динамических нагрузок;
- к увеличению радиуса тора и напряжений в нем.

Ограничение на увеличение радиуса тора накладывается устойчивостью тороидальной части и технологическими требованиями при изготовлении. При определенном способе формообразования камеры из сплава ОТ4-1 радиус тора не мог быть получен большим, чем $r = 66$ мм, что определило остальные размеры камеры /рис.2б/. Проверка на устойчивость тороидальной части показала, что тор с радиусом $r = 66$ мм устойчив с коэффициентом запаса $K = 1,3 : 1,8$.

Подобные расчеты были выполнены также для камеры из стали 12Х18Н9Т. В табл.2 приведены сравнительные расчетные параметры камер из титанового сплава ОТ4-1 и стали 12Х18Н9Т.

Из табл.2 видно, что:

- 1/ механические нагрузки на различные элементы конструкции камеры с выпуклой обечайкой /рис.2б/ существенно меньше, чем с вогнутой /рис.2а/;
- 2/ меньшие нагрузки в камере /рис.2б/ в сочетании с прочностными свойствами применяемого сплава ОТ4-1 /см. табл.1/ позволяют прогреть ее до температуры $\sim 300^\circ\text{C}$, что важно для получения высокого вакуума /прогрев до 300°C в течение 24-х часов/ и длительной работы при повышенной тепловой нагрузке /рабочая температура камеры в районе IV ступени $\sim 80^\circ\text{C}$ /;
- 3/ использование камеры из стали 12Х18Н9Т в условиях работы КУТИ-20 невозможно.

Кроме того, для определения статических нагрузок по программе NIVIPS /5/ на ЭВМ выполнены расчеты распределения напряжений по контуру камеры в условиях больших деформаций и нелинейных областей поведения материалов. Решение основных физических уравнений получено в дискретных точках меридиана тела. Условие непрерывности выполняется путем задания шага дискретности /рис.6/. Результаты расчета по выбранному варианту подвески ка-

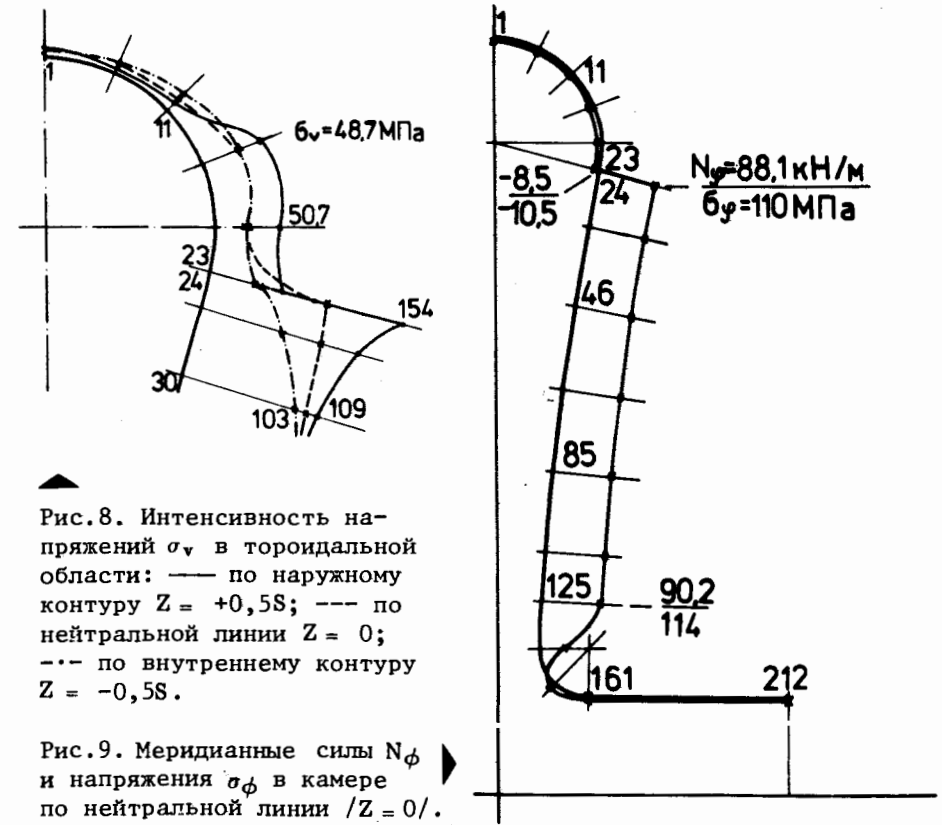


Рис.8. Интенсивность напряжений σ_v в тороидальной области: — по наружному контуру $Z = +0,5S$; --- по нейтральной линии $Z = 0$; -·- по внутреннему контуру $Z = -0,5S$.

Рис.9. Меридианские силы N_ϕ и напряжения σ_ϕ в камере по нейтральной линии $Z = 0$.

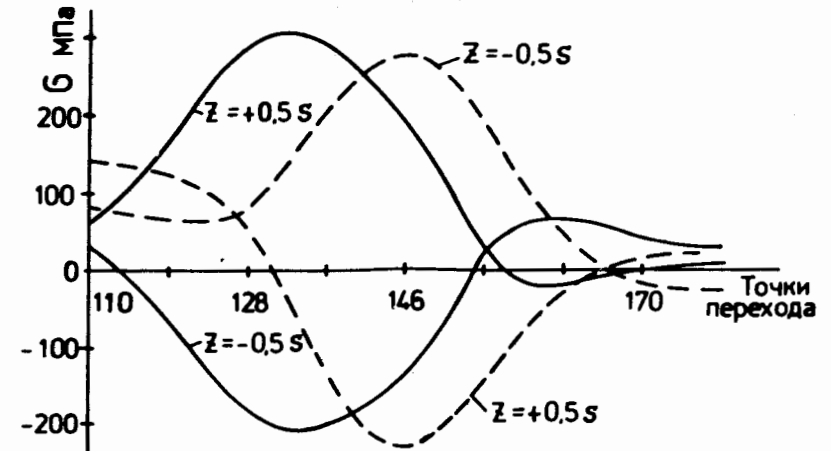


Рис.10. Напряжения на переходе "сфера-осевой патрубков" камеры: — патрубок закреплен; --- патрубок не закреплен.

Таблица 2

Наименование показателей	Стальная камера /рис.2а/	Титановая камера /рис.2б/
Меридианные силы на радиусе сопряжения, $N_{\phi} = N_{\phi T} + N_{\phi сф}$, кН/м	102,1	6,6+90=96,6
Усилия для удержания формы камеры, $N_{\phi} \cdot 2\pi R_{сп}$ кН	305	233,7
Усилие на одну растяжку $N_{\phi} \cdot 2\pi R_{сп}/60$, кН	5,08	3,89
Напряжение в сфере, $\sigma_{сф}$; МПа	187	112,5
Напряжение в торе, $\sigma_{VT} = \sqrt{\sigma_{\psi T}^2 + \sigma_{\phi T}^2} - \sigma_{\psi T} \cdot \sigma_{\phi T}$, МПа	7,3	7,1
Коэффициент запаса, при 20°C	1,1	5,1
$K = \sigma_{02} / \sigma_{сф}$ при 300°C	<1	3,2

меры показаны на рис.7-10. Сильный концентратор напряжения находится в интервале 110 ÷ 170 /см. рис.6/. С учетом конструктивных требований построен оптимальный переход сферы в осевой патрубок /рис.6б/

По данным рис.10 видно, что существует оптимальное закрепление патрубков, при котором напряжения по толщине перехода однородны и близки к напряжению в сфере. При оптимальном закреплении патрубков напряжение в камере существенно меньше предела текучести /для сплавов ОТ4-1 $\sigma_{02} = 500$ МПа/ и не превышают $\sigma = 150$ МПа.

Важным требованием, предъявленным к камере, является длительная работоспособность, которая определяется допустимыми статико-динамическими нагрузками. Распределенные равномерно по окружности силовые потоки, возникающие в стенках камеры в результате статических и динамических нагрузок, "стягиваются" в область гребенки, делая это место наиболее напряженным, определяющим длительность работоспособности камеры. Предел выносливости камеры /см. рис.11а/ оценивался по 40 образцам при базовом числе $N_{баз} = 7 \cdot 10^6$ циклов; при этом форма образца повторяла форму опасной зоны, а нагрузка задавалась по схеме, представленной на рис.11б. Участок графика 10^4 цикл. и $f = 20$ Гц имитирует динамические нагрузки, а участок перепада $F_{сТ} - F_a$ - циклы "откачка-напуск" камеры. Кривая выносливости /рис.11а/ показывает, что при статической $F_{сТ} \leq 3,9$ кН и динамической $F_{дин} \leq 0,66$ кН нагрузках, действующих на одну гребенку, образец может выдержать значительно больше чем $7 \cdot 10^6$ циклов динамической нагрузки.

Таким образом, результаты расчета и испытаний образцов показывают, что длительная работа камеры />> $7 \cdot 10^6$ циклов срабатываний адгезатора/ возможна при условии, что не будут превышены действующие на отдельную гребенку статические и динамические нагрузки, равные соответственно 3,9 и 0,66 кН.

Тензометрирование производилось на полномасштабной модели силового блока, при этом были определены:

- действующие напряжения и деформации в камере;
- резонансные частоты стенок камеры;
- влияние на нагрузку камеры охлаждающей жидкости.

В модели использовался стапель из композитного материала /4/. Подключение системы питания производилось только к катушкам IV ступени сжатия, действие импульсных полей которых на камеру является доминирующим. Тензодатчики устанавливались в 30 местах, они охватывали все критические районы камеры. Результаты измерений статических нагрузок показали, что:

1/ средние усилия в растяжках составляют 3,6 кН, при этом максимальные усилия - 5,2 кН, они объясняются неравномерностью натяжения при установке камеры в блоке жесткости и неравномерностью жесткости самого блока;

2/ перемещение осевых патрубков при откачке камеры составляет 7,4 мм, сферы на радиусе 150 мм - 4,2 мм;

3/ напряжения в тороидальной и сферической частях малы и хорошо согласуются с расчетом / $\sigma_{тор} \leq 60$ МПа, $\sigma_{сф} \leq 120$ МПа/;

4/ максимальные напряжения находятся в районе перехода сферы в осевой патрубок и равны $\sigma = 296$ МПа;

5/ оптимальное закрепление осевых патрубков соответствует растяжению их в откаченном состоянии камеры на 1 ÷ 3 мм /натяжение 3 ÷ 4 кН/. Напряжения на переходе "сфера-патрубок" при этом минимальны и не превосходят 150 МПа.

Результаты измерений динамических нагрузок с незакрепленными осевыми патрубками позволили сделать следующие выводы.

1. Импульсные магнитные поля своим силовым действием возбуждают колебательное движение стенок камеры. Собственные частоты колебаний стенок и максимальные амплитуды в районе перехода "сфера-патрубок" составили:

- с масляной прослойкой - 130 Гц, 0,8 мм;
- без масляной прослойки - 250 Гц, 3 мм.

2. Масляная прослойка вносит в колебательную систему вязкое трение. Время полного затухания составляет - 5 периодов колебаний /- 40 мс/.

3. Максимальные динамические нагрузки с масляной прослойкой /рис.12/ составляют:

- на растяжке - +60 и -70 кН;
- на переходе "сфера-патрубок" - +40 и - 55 МПа;
- в середине сферы - +25 и - 36 МПа,

и в среднем не превосходят 15% от статических. Сравнивая полученные результаты с диаграммами длительной прочности сплава

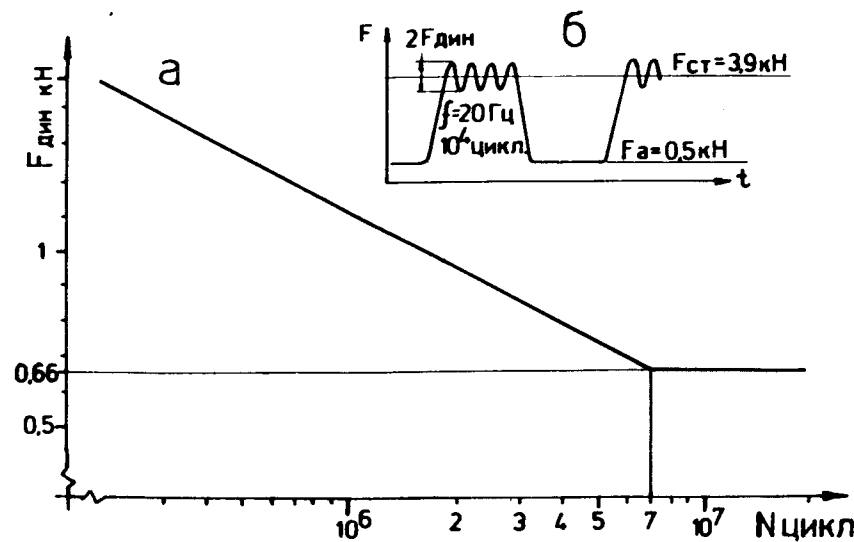


Рис.11. Кривая выносливости образцов подвески камеры /а/ и схема нагружения /б/.

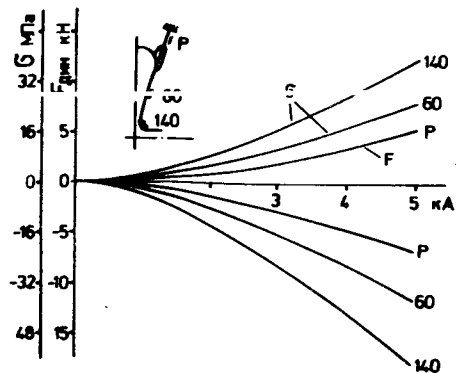
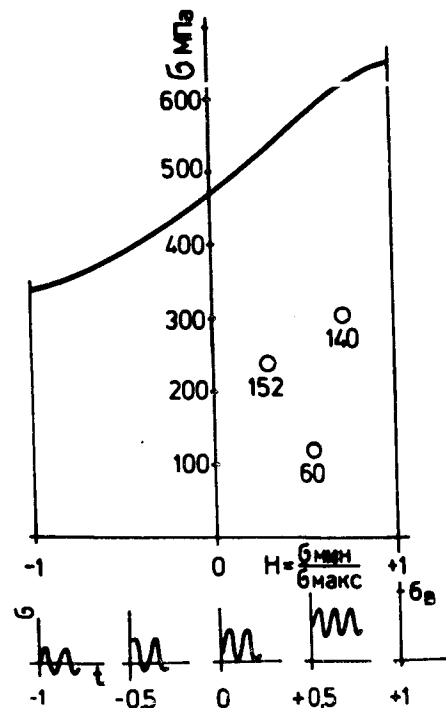


Рис.12. Зависимость импульсных нагрузок на элементы камеры от тока IV ступени сжатия.

Рис.13. Диаграммы длительной прочности тонколистового сплава ОТ4-1. 0 - рабочие нагрузки в точках меридиана оболочки камеры.



ОТ4-1 /рис.13/ и кривой выносливости образцов, можно сказать, что нагрузки в оболочке камеры и в зоне приварки гребенок не ограничивают длительности ее работы. С учетом разброса механических характеристик металла и сварного соединения гребенок $/5 \pm 10\%$, точности измерений $/10\%$, неподключения I, II и III ступеней сжатия $/20\%$ суммарный разброс основных факторов, влияющих на длительную работу камеры, составляет 30%. При этом расчетная вероятность нахождения эксплуатационных нагрузок в зоне длительной работы составляет 0,7. Действительная долговечность камеры может быть определена на ее полномасштабных образцах в рабочих режимах.

Выводы

1. В результате проведенной работы создан силовой блок адгезатора, обеспечивающий физические условия сжатия электронных коллекторов. Блочная схема компоновки придает силовому блоку высокие эксплуатационные свойства /удобство юстировки, оперативная смена функциональных блоков, стабильность геометрических связей/.

2. На основе расчетных и экспериментальных исследований элементов конструкции камеры и эксплуатации двух камер на ПКУТИ и КУТИ-20 в течение двух лет определена нижняя граница ее выносливости, равная $7 \cdot 10^6$ циклов срабатываний ускорителя. Камера способна выдержать значительно больше чем $7 \cdot 10^6$ циклов срабатываний с доверительной вероятностью, равной 0,9.

Авторы признательны Л.М.Барабановой, Р.Н.Кинаш, В.Ю.Шокину, А.П.Дергунову, Г.С.Мельникову, И.А.Судакову за полезные обсуждения вопросов технологии при изготовлении силового блока и А.И.Ладыгину за подготовку экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
2. Хохлов И.М. и др. Автор. свид. СССР №499693, от 22.03.74 г. Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №2, с. 158.
3. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
4. Беляев Л.Н. и др. ОИЯИ, 9-81-642, Дубна, 1981.
5. Röhle H., Ulbricht V. Berechnung von Rotationsschalen bei nichtlinearem Deformationsgesetz, Dissertation, Technische Universität, Dresden, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 декабря 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Аугустин А. и др.	9-83-846
Конструкция адгезатора КУТИ-20. Силовой блок, камера	
Приведено описание конструкции силового блока и вакуумной камеры адгезатора коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20. Силовой блок выдерживает механические нагрузки и обеспечивает необходимую точность установки катушек магнитной системы. Вакуумная камера изготовлена из тонколистового титанового сплава. На основе расчетов, испытаний элементов конструкции и опыта двухлетней эксплуатации двух камер делается вывод о пригодности камеры для работы в условиях КУТИ-20 при цикличности ускорителя 20 Гц.	
Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения, ОИЯИ.	
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983	
Augustin A. et al.	9-83-846
KUTI-20 Adgesator Design. Force Block, Chamber	
Designs of the force block and adgezator vacuum chamber of the KUTI-20 heavy ion collective accelerator are presented. The force block sustains mechanical loadings and ensures the necessary tolerances for the magnetic system coils placement. The vacuum chamber is made of the thin-layer titanic alloy. The conclusion about the fitness of the chamber for working conditions of the KUTI-20 accelerator at the 20 Hz repetition rate is made basing upon the calculations, design element testing and the experience of two chamber operation during the period of two years.	
The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Acceleration Techniques and Automation, JINR.	
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983	

Перевод О.С.Виноградовой