

53
И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 75 - 98

Г.С.Виллевалд, В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров

“ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИЛЬНОТОЧНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЛИНЗ
В РЕЖИМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ”

Новосибирск

1975

Институт ядерной физики СО АН СССР

Виллевалд Г.С., Карасюк В.Н., Сильвестров Г.И.

"ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬНО-
ТОЧНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЛИНЗ В РЕЖИМАХ ДИНАМИЧЕС-
КОГО НАГРУЖЕНИЯ"

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе исследуется механическая прочность параболических линз в динамических режимах нагружения силами магнитного поля с целью выяснения предельно допустимых магнитных полей при различных требованиях к долговечности работы линз (от 10^3 до 10^6 циклов нагружения).

Проводится анализ колебаний механических систем под воздействием сил поля синусоидального тока.

Приводятся аналитические оценки влияния усилия от поперечных и продольных колебаний, моментов сил в местах крепления оболочки, температурных напряжении и др. на прочность и долговечность линзы.

Описываются результаты силовых экспериментов в широком диапазоне длительностей импульса тока: от единиц микросекунд до длительностей, соответствующих квазистатическому режиму нагружения.

Одним из перспективных оптических устройств для светосильной осесимметричной фокусировки пучков вторичных частиц высоких энергий являются параболические линзы [1], поскольку заданием профиля их токовых поверхностей могут быть полностью устранены сферические aberrации — основной источник искажения фазового объема при собирании из точечного источника непараксиальных пучков с большими углами выхода $\theta > 0,1$ рад. Присущий же этим системам принципиальный недостаток — рассеяние частиц в стенках может быть сведен к минимуму, если удастся сделать линзу предельно короткофокусной, так что фазовые углы пучка $\alpha_{\varphi} = \Delta x / \ell_i$ (Δx — размер источника, ℓ_i — эффективное расстояние от источника до точки пересечения с входной и выходной поверхностями) будут больше углов рассеяния $\alpha_{\varphi} > \alpha_p$ в соответствующей стенке линзы. Кроме того, при собирании частиц с большим разбросом по импульсам $\Delta p/p \sim 10\%$ хроматические aberrации, приводящие к углам $\alpha_{\epsilon} \sim \theta \Delta p/p$, так же могут быть сведены к минимуму при условии $\alpha_{\epsilon} < \Delta x/F$ (F — фокусное расстояние линзы). Уменьшение фокусного расстояния при заданной энергии может быть достигнуто двумя способами — увеличением длины линзы или повышением магнитного поля до предельно допустимой величины, определяемой ее механической прочностью.

В работе [2] показано, что может быть выбрана такая форма токовых поверхностей, при которой длина линзы при сохранении практически безабберационной фокусировки будет сравнима с ее фокусным расстоянием. При этом входная поверхность линзы будет сильно отличаться от параболоида вращения и примет бочкообразную форму. Примером такой предельно вытянутой линзы является линза, разрабатываемая для фокусировки антипротонов в проекте про-

тон-антипротонного накопителя ВАШ-4 ИЯФ СО АН СССР [3].

Однако при энергии частиц в несколько Гэв даже в предельно вытянутых линзах для обеспечения фокусного расстояния в несколько десятков сантиметров (для выполнения приведенных выше условий) магнитное поле должно превышать 10 тесла.

Для выяснения возможности технического осуществления таких линз были проведены исследования их механических свойств при предельно допустимых магнитных полях в статическом и динамическом режимах нагружения.

Предметом исследования являлись линзы с профилем, выбранным в работе [4] для собирания антипротонов с токовой мишени, создающей источник частиц, близкий к точечному. Линза имеет следующие параметры: импульс фокусируемых частиц $PC=1,8$ Гэв, линейный угол собирания до $\theta = 0,2$ рад, фокусное расстояние $F = 20$ см, рабочий ток $I_m = 500$ кА. Исследуемые линзы (Рис. I) изготавливались из алюминиевого сплава Д16Т, обладающего следующими механическими свойствами: $\sigma_B = 47$ кг/мм², $E=0,7 \cdot 10^4$ кг/мм², $H_B = 105 + 120$ единиц. Изготавливаются для испытаний линзы из бериллия, у которого $\sigma_B = (40+50)$ кг/мм², $E=3 \cdot 10^4$ кг/мм², $H_B = 120$ единиц.

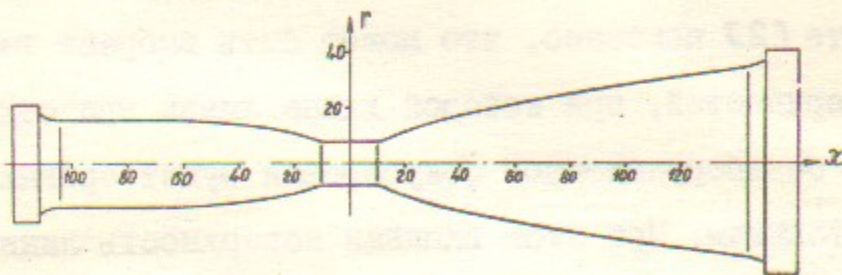


Рис. I Токовый профиль исследуемой линзы.

Линза питается синусоидальным импульсом тока и представляет собой сложную колебательную систему, на которую воздействует возмущающая сила вида $P(r) \sin^2 \omega t$, меняющаяся по длине линзы и нормальная к поверхности, так что имеются поперечные и продольные компоненты сил, возбуждающих в линзе поперечные и продольные колебания с широким спектром собственных частот.

Точный аналитический расчет такой системы в режиме динамического нагружения с учетом тепловых нагрузок достаточно сложен.

Аналитический расчет подобной системы в статическом режиме и численный расчет в динамическом режиме приведены в работах [5,6].

С целью выяснения величин предельных магнитных полей, которые могут быть получены на токовых оболочках приведенной формы, мы стремились выделить все факторы, приводящие к появлению механических напряжений и рассмотреть влияние каждого из них на прочность и долговечность работы линзы.

В связи с этим рассматривались следующие вопросы:

1. Выбор оптимальной длительности импульсов тока, питающих линзу.
2. Роль усилий от продольных и поперечных колебаний и тепловых нагрузок в распределении механических напряжений по длине линзы.
3. Проверка устойчивости стенок линзы в режимах динамического нагружения.
4. Исследование долговечности работы линз при различных режимах нагружения.
5. Выбор вариантов токоподводов, контактных заделок, системы питания и охлаждения линз.

I. АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНОЙ КРИВОЙ

Для исследования механических свойств в режимах динамического нагружения необходимо проанализировать поведение линзы, как колебательной системы, под воздействием сил поля синусоидального тока.

Вынужденные колебания упругих систем (без учета сил сопротивления) под воздействием силы вида $P_0 \sin^2 \omega t$ описываются уравнением

$$m\ddot{y} + cy = P_0 \sin^2 \omega t$$

решение которого при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$y = \frac{P_0}{mp} \int_0^t \sin^2 \omega \tau \cdot \sin p(t-\tau) d\tau$$

где p — угловая частота собственных колебаний системы,
 ω — угловая частота вынуждающей силы,
 P_0 — максимальное значение вынуждающей силы.

Интегрирование дает следующее выражение для перемещений:

$$y = \frac{P_0}{mp^2} \left[\frac{\sin^2 \omega t - k^2 \sin^2 \frac{\omega}{k} t}{1 - k^2} \right]$$

где $k = 2\omega/p$ назовем параметром динамичности.

Максимальное значение выражения в скобках представляет собой коэффициент динамичности η , так что $y_{max} = y_{ст} \cdot \eta$, где $y_{ст} = P_0/mp^2$ — перемещение под действием статической силы P_0 .

Если вынуждающая сила возбуждается полем затухающего тока $I = I_m e^{-\delta t} \sin \omega t$, то выражение для перемещений примет вид:

$$y = \frac{P_0}{mp^2} \left\{ e^{at} \cdot p \left[\frac{p}{2(\alpha^2 + p^2)} - \frac{2\alpha\omega p \sin 2\omega t}{(\alpha^2 + c^2)(\alpha^2 + d^2)} - \frac{\cos 2\omega t}{4} \left(\frac{c}{\alpha^2 + c^2} + \frac{d}{\alpha^2 + d^2} \right) \right] - p \left[\frac{\alpha \sin pt + p \cos pt}{2(\alpha^2 + p^2)} - \frac{\alpha \sin pt}{4} \left(\frac{1}{\alpha^2 + c^2} + \frac{1}{\alpha^2 + d^2} \right) - \frac{\cos pt}{4} \left(\frac{c}{\alpha^2 + c^2} + \frac{d}{\alpha^2 + d^2} \right) \right] \right\}$$

где $\alpha = -2\delta$, $c = p + 2\omega$, $d = p - 2\omega$. На рис. 2 приведены кривые коэффициентов динамичности и коэффициентов остаточных колебаний η_0 (собственных) для однополупериодного импульса тока (а) и для затухающего тока (б), в последнем случае выражение в фигурных скобках увеличено на величину затухания импульса до достижения максимума поля, т.е. на величину

$$e^{\frac{2\delta}{\omega} \arctg \omega/\delta} / \sin^2(\arctg \omega/\delta).$$

Условно кривые можно разделить на три участка: $K = 0 + 0,4$, соответствующий статическому или квазистатическому режиму нагружения, $K = 0,4 + 3$ — прирезонансная область и $K > 3$ — область динамического нагружения.

Естественно представляется заманчивым выбрать для работы линзы крайний динамический режим при $K \gg 3$, что позволяет значительно перегрузить линзу по току или уменьшить толщину стенки. Однако при этом возникает остаточные колебания, вызывающие знакопеременные механические напряжения, которые, вследствие малых затуханий колебаний, могут значительно снизить долговечность работы линзы. Кроме того, с уменьшением длительности импульса возрастает реактивная мощность генератора тока, что существенно усложняет систему питания линзы.

Преимуществом работы в статическом режиме является отсутствие знакопеременных напряжений и упрощение системы питания. Недостатком этого режима является необходимость увеличения толщины стенок при заданных максимальных напряжениях в них и избыточный средний нагрев, вызванный увеличением длительности импульса тока.

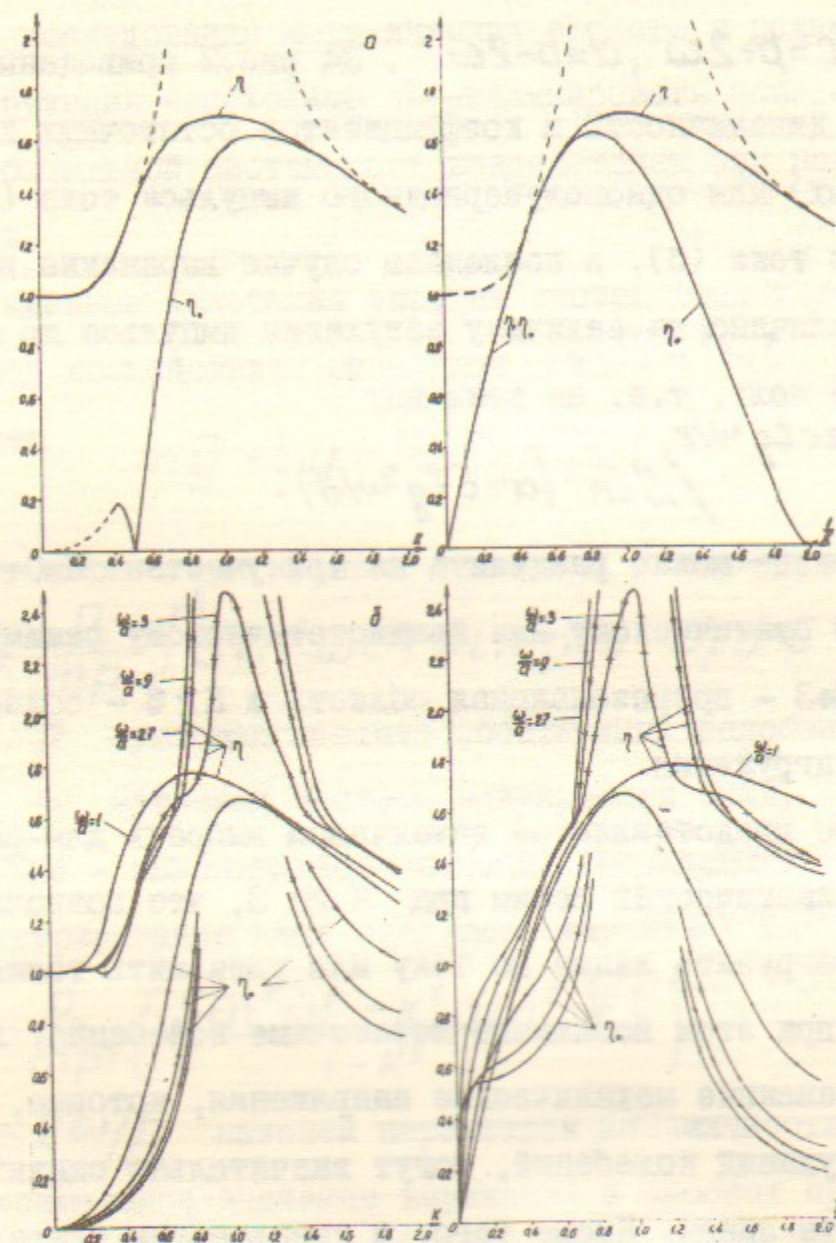


Рис.2 Кривые коэффициентов динамичности и остаточных колебаний:
 а — однополупериодный импульс незатухающего синусоидального тока; б — затухающий синусоидальный ток; η — коэффициенты динамичности; η_0 — коэффициенты остаточных колебаний.

Заметим, что при $K > 2$ и незатухающих синусоидальных импульсах тока кривая коэффициентов динамичности стремится к единице, т.е. максимальные отклонения близки к статическим, а знакопеременные механические напряжения отсутствуют (рис.2,а, прерывистая кривая).

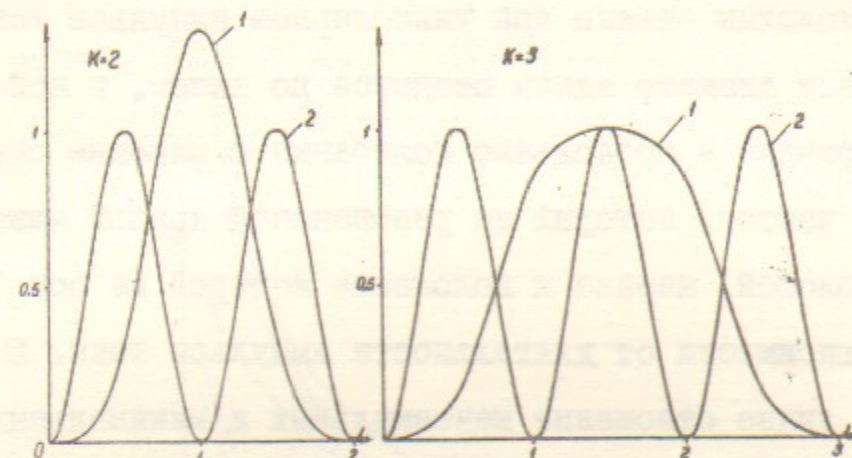


Рис.3 Перемещение упругого тела (1) под воздействием сил поля незатухающего синусоидального тока (2).

Можно дать некоторые рекомендации для работы вблизи резонансной области. Из рис.3 видно, что при $K=2$ питание системы униполярным импульсом тока нецелесообразно, т.к. это приведет к снижению долговечности работы за счет остаточных колебаний, тогда как при использовании двух, трех, четырех и т.д. полупериодов незатухающего тока при $K=2,3,4$ и т.д. соответственно, остаточные колебания отсутствуют. Питание затухающим импульсом тока при работе в таких режимах приведет к неравенству интегралов отклоняющих и возвращающих (гасящих) сил и остаточные колебания будут иметь место, но амплитуды их будут уменьшены; вообще говоря, подбором длительности импульса тока можно

выбрать режим при таком параметре "К", когда остаточные колебания будут несущественными. Выбор $K > 3$ при слабо затухающем токе вряд ли оправдан, поскольку практически сохраняется толщина стенки, а нагрев токоведущих частей увеличивается; в зависимости от требований к нагреву или толщине стенки для сохранения долговечности может оказаться рациональней некоторое увеличение толщины стенки при униполярном импульсе тока.

Поскольку диаметр линзы меняется по длине, в ней возбуждаются поперечные и продольные колебания с широким спектром собственных частот, который на резонансной кривой может быть изображен полосой, ширина и положение которой на оси "К" меняются в зависимости от длительности импульса тока. В рассматриваемой нами линзе отношение максимальных и минимальных собственных частот поперечных колебаний $\rho_{\perp \max} / \rho_{\perp \min} \sim 5$, а продольных и поперечных колебаний $\rho_{\text{пр. max}} / \rho_{\perp \min} \sim 15$. Так при длительности импульса тока $\tau = 3$ мксек рабочая область по радиальным колебаниям лежит в пределах $K \sim 2 + 10$, по продольным $K \sim 15 + 35$; при $\tau = 120$ мксек $K \sim 0,06 + 0,3$ и $K \sim 0,4 + 0,9$ соответственно.

II. Определение толщины стенок линзы по радиальным нагрузкам. Предварительный выбор длительности импульса тока

В работе исследуется механическая прочность пологой линзы (максимальные углы наклона образующих полулинз к продольной оси $\sim 20^\circ$). В этом случае толщину стенок линзы практически определяют радиальные нагрузки, остальные лишь корректируют ее (см. рис. 4). При больших углах наклона образующих линзы значительные поправки в толщину стенок будут вносить

10.

моменты сил. В этих случаях необходимо ввести в рассмотрение изгибные напряжения на всех участках линзы [7], которые в настоящей работе учитываются частично лишь в районе шейки и прилегающих к местам закрепления оболочки участках.

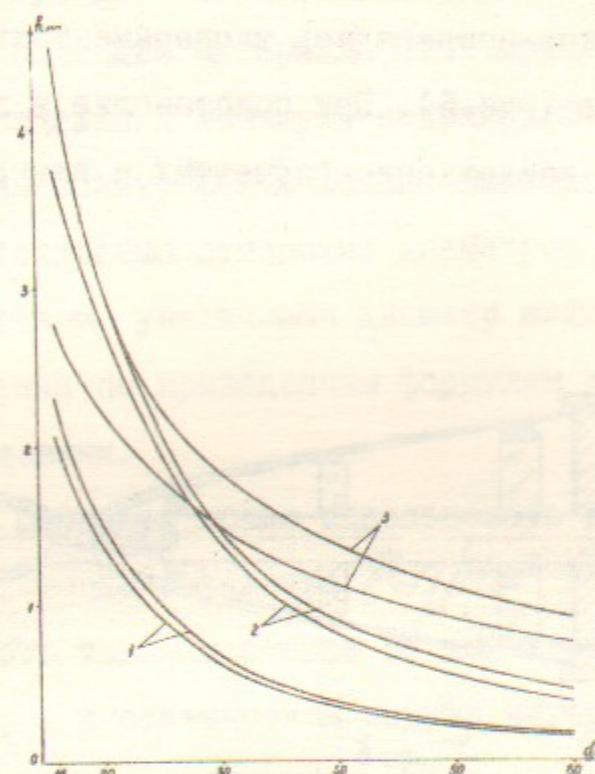


Рис. 4 Зависимость толщины стенок линзы от диаметра, полученная в результате расчета по радиальным перемещениям и скорректированная.
1 - $\tau = 2,5$ мксек, 2 - $\tau = 6$ мксек, 3 - $\tau = 110$ мксек (ресурс работы 10^5 циклов)

Радиальные перемещения на любом диаметре линзы определяются:

$$y = \frac{P_0}{m r^2} \eta \quad (I)$$

II.

где P_0 - поперечная составляющая сил поля на диаметре d линзы,

$$\rho = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}} \quad (2)$$

- угловая частота собственных радиальных колебаний тонкостенного цилиндра [8]. Справедливость применения формулы (2) для конических поясков проверялась экспериментально с помощью емкостных датчиков (рис.5). При подстановке в формулу среднего радиуса участка расхождение расчетных и измеренных частот не превышает 10%.

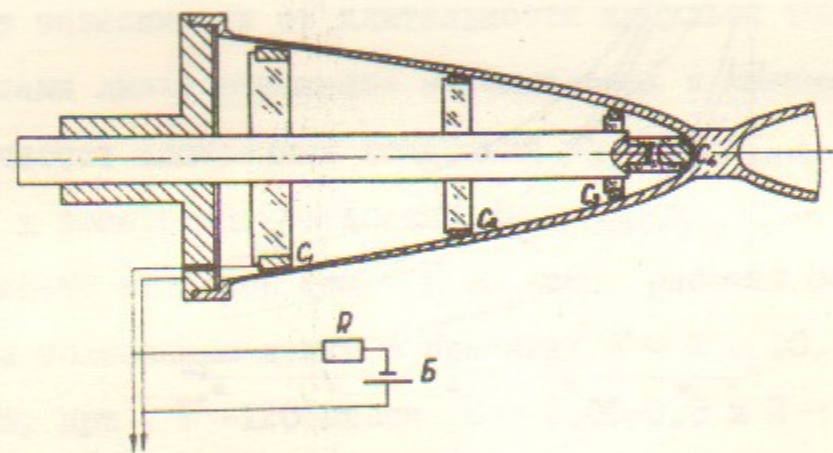


Рис.5 К измерению собственных частот колебаний в линзе.

Определяются допускаемые статические перемещения поясков

линзы:

$$\Delta l = \pi \Delta d = \frac{P_{cm} \cdot l}{E \cdot F} = \frac{G \pi d}{E} \quad , \text{откуда}$$

$$y = \Delta z = Gd/2E$$

Введя допускаемые напряжения, имеем:

$$[y] = [G]d/2E \quad (3)$$

(о выборе $[G]$ см. ниже).

Приравняв перемещения (1) допускаемым (3), находим толщины стенок h на любом диаметре линзы.

Диаметр шейки выбирается из двух соображений. Во-первых, по допустимому магнитному полю, критерий выбора которого будет указан ниже. При расчетном ресурсе работы линз $10^5 - 10^6$ циклов магнитное поле для материала Д16Т принято равным 12,5 тл. Во-вторых, для сведения к минимуму напряжений от моментов в местах перехода на шейку, шейка должна быть радиально подвижной т.е. в ней необходимо отверстие диаметром порядка толщины стенки. Таким образом, увеличивая диаметр шейки, рассчитывается толщина ее стенки по приведенным формулам до удовлетворения указанным условиям.

В оценочных расчетах можно использовать приближение $d_{cp} = d - h$, тогда выражение $P_0 \eta / mp^2 = [G]d/2E$ дает простую зависимость толщины стенки от диаметра линзы:

$$h = Const \cdot \eta / d, \text{ а в статическом режиме нагружения } hd = Const$$

С использованием этого приближения построены кривые зависимости толщин стенок линзы от диаметра при различной длительности импульса тока (рис.6) для материала Д16Т, $I_m = 500$ кА, $[G] = 18$ кг/мм². Для сравнения на рисунке приведена кривая толщин стенок линзы, построенная из соображений равенства пробегов всех частиц в материале линзы (физический профиль) с учетом зависимости сил поля от диаметра в случае статического нагружения, т.е. соблюдены условия: $S_{1i} + S_{2i} = S = Const$ и $hd = Const$, где S_{1i} и S_{2i} - длины пробега i -той частицы в материале полулинзы. Построение физического профиля исследуемой линейной линзы ясно из рис.7.

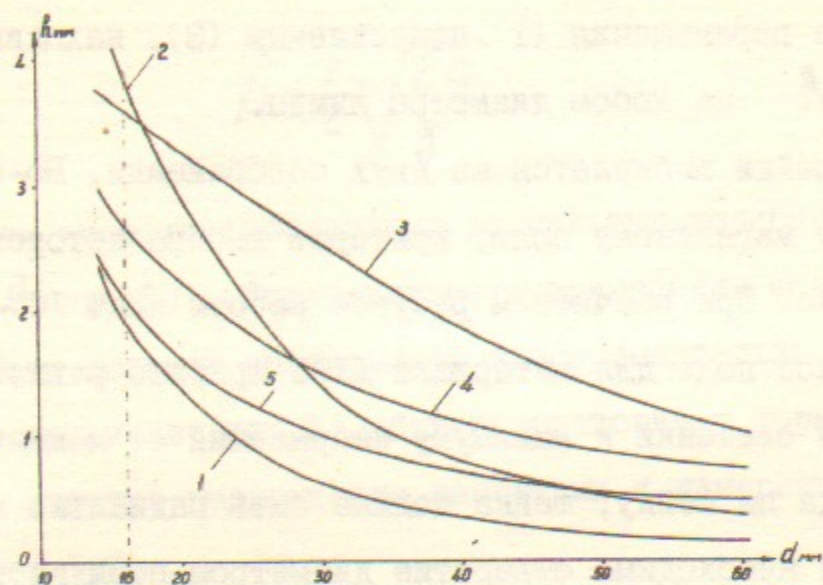


Рис.6 Зависимость толщины стенок линзы от диаметра при различной длительности однополупериодного импульса тока.
 1 - $\tau = 2,5$ мксек, 2 - $\tau = 6$ мксек, 3 - $\tau = 20$ мксек,
 4 - $\tau = 110$ мксек, 5 - линза физического профиля при $S = 1$ см.

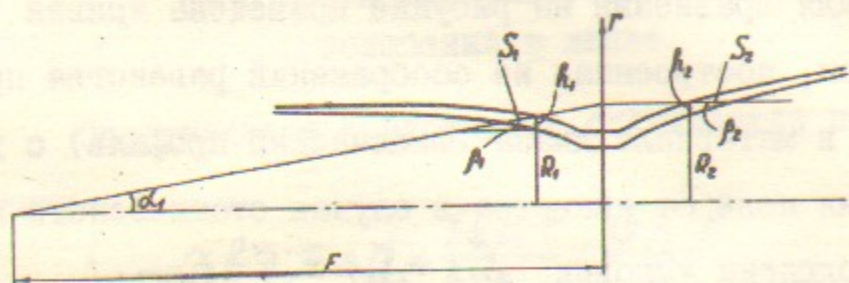


Рис.7 К построению физического профиля линзы.

$$\frac{S_1}{\cos \beta_1} = \frac{h_1}{\sin(\alpha + \beta_1)}, \quad h_2 = S_2 \cdot \operatorname{tg} \beta_2,$$

используя $S_1 + S_2 = S$ и $h_1 R_1 = h_2 R_2$, имеем

$$h_2 \left(\frac{F \operatorname{tg} \alpha}{R_1} \cdot \frac{\cos \beta_1}{\sin(\alpha + \beta_1)} + \operatorname{ctg} \beta_2 \right) = S, \quad h_1 = h_2 \frac{F \operatorname{tg} \alpha}{R_1}$$

Используя рисунки 2 и 6 можно оценить длительность импульса тока для используемого материала в зависимости от требуемой прозрачности линзы. Можно рекомендовать такую последовательность предварительного выбора длительности импульса тока по условию прозрачности: строится внутренний профиль линзы заданной прозрачности (задается S), рассчитываются толщины стенок линзы статического нагружения; отношение толщин стенок линзы физического профиля на диаметрах, не удовлетворяющих условию прозрачности, к толщинам стенок линзы статического нагружения — суть коэффициенты динамичности, по которым определяются параметры "К" (рис.2), а затем и длительность импульса, при которой условие прозрачности выполняется на всех диаметрах линзы. Далее проводится расчет толщин стенок линзы по радиальным перемещениям для выбранной длительности импульса тока. Выбор длительности импульса тока для дюралевых линз в пределах $\tau = 7-70$ мксек нежелателен, поскольку линза оказывается в резонансной области по радиальным колебаниям.

Заметим, что для бериллиевых линз квазистатический режим наступает при длительностях, в 1,5 раза меньших, чем для дюралевых, за счет соотношения модуля упругости E и плотности γ (см. формулу 2).

III. ПРОВЕРКА СТЕНОК ЛИНЗЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПО УСИЛИЯМ ОТ ПРОДОЛЬНЫХ НАГРУЗОК

Поскольку линза крепится в сравнительно массивных жестких токоподводах, она считалась заземленной на концах. В противном случае ошиновку линзы следует рассматривать как участок линзы.

Проведем вначале расчет симметричной линзы (равны длины и углы наклона образующих полулинз). В этом случае середина шейки оказывается неподвижной (эквивалент заземления), а полулинзы независимы.

Разобьем линзу плоскостями, перпендикулярными продольной оси на "m" участков и найдем продольные силы на каждом участке:

$$P_k = \int \frac{m I_m^2}{4\pi} \ell_n \frac{R_k}{R_{(k-1)}} , \quad [H].$$

По формуле для продольных колебаний стержней [8] найдем собственные частоты колебаний полулинз: $\rho = \frac{l \pi}{\ell} \sqrt{Eg}$ где ℓ — длина образующей полулинзы. Рассматривались только основные частоты колебаний ($l=1$). Справедливость допущения линза-стержень проверялась экспериментально на несимметричной линзе так же с помощью емкостных датчиков (рис.5). Расхождение частот с расчетными не превышает 10%.

По соотношению частот собственных и вынужденных колебаний находится коэффициент динамичности η (рис.2), а затем эквивалентные статические силы, действующие на участках:

$$P_{zk} = P_k \cdot \eta .$$

При разбиении линзы на небольшое число участков для уменьшения ошибки в последующих расчетах границами участков

следует считать точки приложения сил (центры тяжести нагрузки на участках).

По формулам

$$S_{Gi} = \pi(R_i^2 - r_i^2), \quad C_i = \frac{E S_{Gi}}{\ell_i}, \quad \text{где } S_{Gi} = \frac{S_{Gi} + S_{G(i-1)}}{2}$$

находятся сечения для определения напряжений на участках и жесткости участков (C_i). Жесткость линзы для каждой силы ($C_{\Sigma k}$) определяется суммой жесткостей слева (C_{lk}) и справа (C_{pk}) от точки ее приложения, т.е.

$$C_{\Sigma k} = C_{lk} + C_{pk} = \frac{1}{\sum_0^k 1/C_i} + \frac{1}{\sum_{k+1}^n 1/C_i}$$

где $n = m + 1$ — число участков жесткости.

Реакции в заделках определяются из уравнений:

$$|R_l|/C_l = |R_n|/C_n, \quad \bar{R}_l + \bar{R}_n = \bar{P}_z$$

откуда $\bar{R}_{lk} = \bar{P}_{zk} C_{lk} / C_{\Sigma k}$. Результирующая сила \bar{P}_{pk} , действующая на каждом участке, $\bar{P}_{pk} = \sum_0^m \bar{R}_{lk} + \sum_{k+1}^n \bar{P}_{zk}$, а соответствующие ей напряжения:

$$\bar{\sigma}_{pk} = \bar{P}_{pk} / S_{Gk}$$

При значительной несимметрии линзы приведенный расчет окажется недостаточным, т.к. в такой линзе возникает несколько основных частот продольных колебаний, которые, вследствие малых затуханий, могут оказаться в фазе, а напряжения в стенках превысить расчетные. В этом случае следует либо совместно решать дифференциальные уравнения движения участков линзы [6, 8], либо, выделив силы, вызывающие колебания основных частот и помножив их на соответствующие коэффициенты динамичности, свести задачу к статической.

В некотором приближении продольные нагрузки в несимметричной линзе можно разделить на три составляющие (рис.8), где суммарные силы $P_1=P_2$ и P_3 вызывают продольные колебания с частотами, определяемыми длинами образующих на участках l_1, l_2 и l соответственно. Помножив силы, составляющие P_1, P_2 и P_3 , на соответствующие коэффициенты динамичности, проводится аналогичный приведенному выше расчет для каждой группы эквивалентных статических сил (в нашем случае трех групп) вначале для основных колебаний (сил $P_{эk} = P_k \cdot \eta$), а затем для остаточных колебаний (силы $P_{эk} = P_k \cdot \eta_0$).

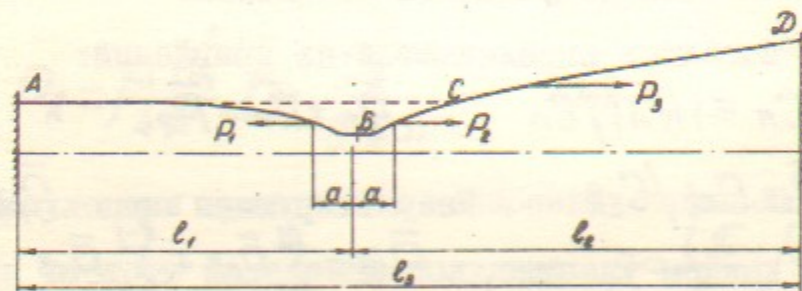


Рис.8 Эквивалентные силы в несимметричной линзе.

Полученные напряжения ниже будут складываться с другими напряжениями, действующими в линзе (см.гл.УП.).

На рис.9 и 10 показано распределение механических напряжений от продольных усилий по длине линзы и зависимость максимальных напряжений от диаметра шейки линзы статического нагружения из материала Д16Т и $[\sigma] = 18 \text{ кг/мм}^2$.

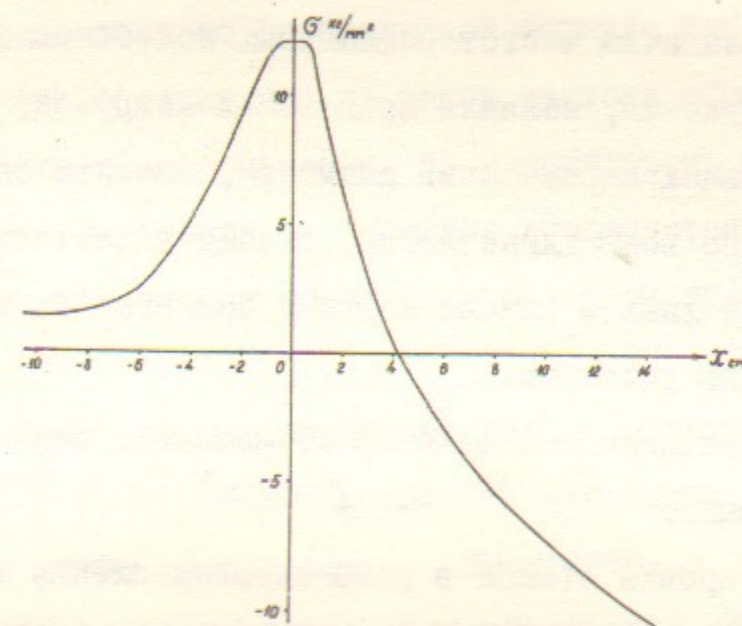


Рис.9 Распределение напряжений от продольных усилий по длине линзы.

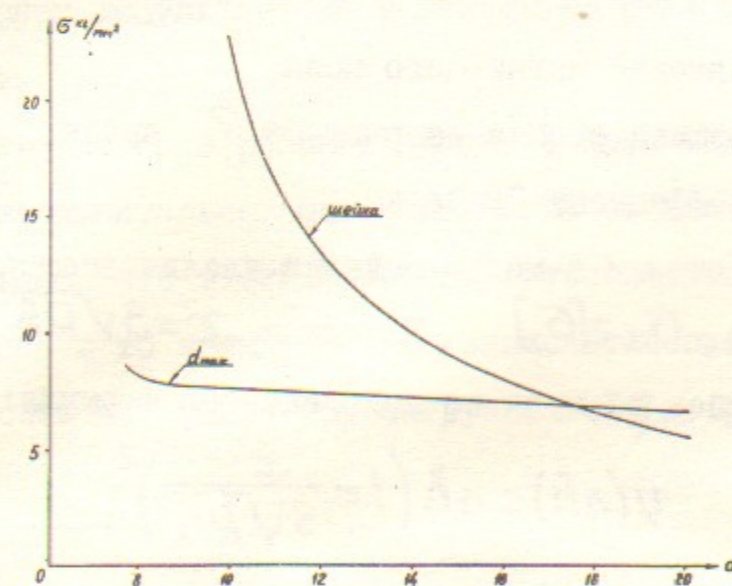


Рис.10 Зависимость максимальных напряжений от продольных усилий от диаметра шейки.

IV. КОРРЕКТИРОВКА ТОЛЩИН СТЕНОК ЛИНЗЫ ПО НАПРЯЖЕНИЯМ ОТ МОМЕНТОВ СИЛ

Ввиду различия частот радиальных колебаний в динамических режимах нагружения, наличия продольных нагрузок, непропорциональности радиальных перемещений диаметру, моменты сил имеют место практически по всей длине линзы, однако значительных величин они достигают лишь в районе шейки и прилегающих к местам закрепления оболочки участках.

Путь уменьшения напряжений от моментов сил в районе шейки был указан выше.

Корректировка стенок в районах закрепления оболочки проводилась с использованием формул, приведенных в литературе [7,9]. Для этого находятся напряжения в местах закрепления оболочки:

$$\sigma_u = \frac{3PR}{h\sqrt{3(1-\mu^2)}},$$

где P — давление магнитного поля,

h — толщина стенки на радиусе R линзы,

μ — коэффициент Пуассона.

Толщина стенки в месте заделки увеличивается на величину Δh так, что $\sigma_u = [\sigma]$. На длине $x = 3\sqrt{Rr}$ величина Δh уменьшалась до нуля по приближенной формуле:

$$y(\Delta h) = \Delta h \left(1 - \frac{x}{3\sqrt{Rr}}\right)^2$$

Поскольку на этой длине искажается токовый профиль линзы, длины полулинз должны быть несколько увеличены.

V. ПРОВЕРКА СТЕНОК ЛИНЗЫ НА РАДИАЛЬНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Проверка проводилась по приближенной формуле для цилиндрических оболочек, что справедливо до углов наклона образующей к оси $\sim 10^\circ$ (на участках, где проверка на устойчивость может внести коррекцию в толщины стенок, это условие выполняется). Проверку на устойчивость конических оболочек с большими углами наклона см. в [9, 10].

Критическое давление в статическом режиме нагружения [Л9]:
 $q_{кр} = 0,92E(R/R)^{2,5} \cdot R/L$, [кг/см²], где R — средний радиус на длине L участка линзы. Длина $L_{кон}$ выбирается в зависимости от изменения устойчивости по длине (для конических оболочек).

При работе в динамических режимах естественно предположить повышение устойчивости за счет скорости нагружения и уменьшения или отсутствия сил поля в максимуме отклонения (рис. II); при $K \geq 2$ и униполярном импульсе тока в максимуме отклонения силы поля отсутствуют.

Устойчивость стенок в режимах динамического нагружения проверялась экспериментально. Описанные ниже результаты экспериментов показывают, что в этих режимах в устойчивости имеется значительный запас в то время, как в квазистатическом режиме потеря устойчивости наступила при нагрузке $1,1q_{кр}$ (рис. 12)

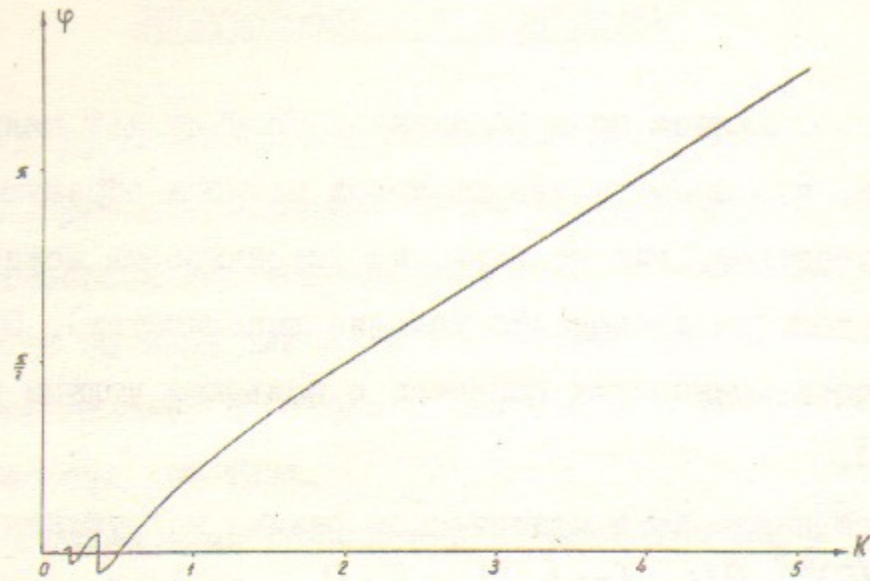


Рис. II Смещение первого максимума отклонения колебательной системы от максимума сил поля при униполярном импульсе тока в зависимости от параметра динамичности "К" (в единицах длительности импульса тока $\tau = \pi$).

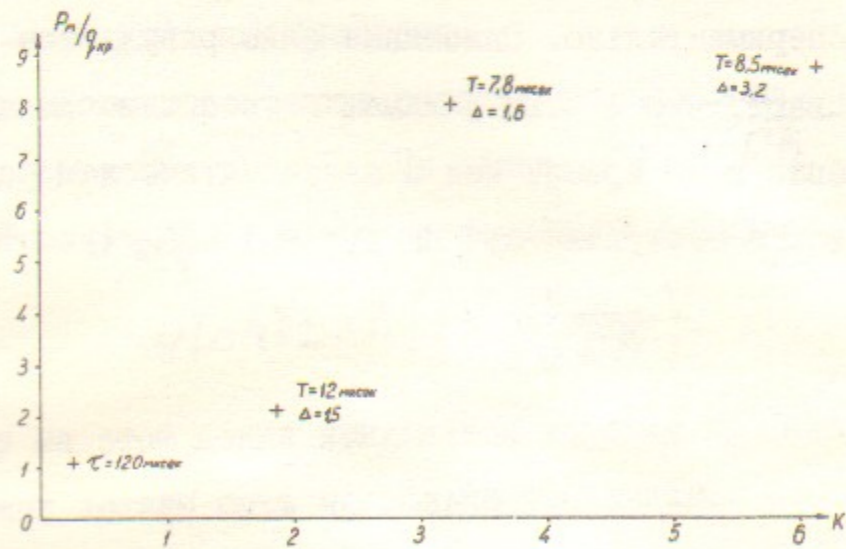


Рис. I2. Экспериментальные точки потери устойчивости в режимах динамического нагружения.

Механические напряжения, возникающие в линзе при тепловом расширении от импульсного нагрева, по разному влияют на механическую прочность ее в зависимости от режима работы и длительности импульса тока, поэтому мы выделяем три эффекта нагрева.

1. Средний нагрев линзы, обусловленный недостаточным охлаждением в промежутках между импульсами. При жесткой заделке концов линзы он приводит к статическим напряжениям, на которые накладываются импульсные напряжения, вызванные силами магнитного поля и импульсным нагревом. Средний нагрев определяет частоту следования импульсов тока.

2. Однородный по сечению импульсный нагрев при питании линзы длинными импульсами тока (квазипостоянный нагрев), когда толщина скин-слоя больше толщины стенки ($\delta \gg h$). При питании униполярным импульсом тока температура нагрева достигает максимума к фазе $\tau = \pi$, так что совпадающее по фазе с нагревом расширение приводит к импульсным напряжениям, которые могут сложиться с напряжениями от поперечных и продольных нагрузок.

Легко произвести оценку напряжений от теплового расширения, зная коэффициент линейного расширения α и жесткость линзы C_L . При разных по длине сечениях линзы суммарное удлинение будет $\Delta l = \sum_{i=0}^n \Delta l_i = \alpha \sum_{i=0}^n l_i \Delta T_i$, а возникающее усилие $P = \Delta l C_L$, где $C_L = 1 / \sum_{i=0}^n 1/C_i$, так что напряжения на разных участках будут: $\sigma_R = P / S_{sk}$. Поскольку линза имеет приблизительно равные сечения по длине, то и $\Delta T \approx Const$ и $\sigma_T = \alpha E \Delta T$. Так для материала ДИ6Т нагрев на 100° вызывает дополнительные напряжения

$\sigma_T \approx 15 \text{ кг/мм}^2$, для бериллия, имеющего больший модуль упругости, $\sigma_T \approx 36 \text{ кг/мм}^2$. Заметим, что у материала ДІ6Т прочностные свойства значительно ухудшаются при нагреве выше 100° .

Таким образом, однородный по сечению нагрев линзы чрезвычайно опасен и для напряженных линз от него нужно избавляться либо путем укорачивания длительности импульса тока, либо устранением жестких заделок, что приводит к увеличению напряжения в шейке линзы, либо созданием специальных тепловых компенсаторов в токоподводах, компенсирующих тепловое расширение в момент нагрева в фазе с импульсом тока. К примеру, роль компенсатора может выполнять коаксиальный токоподвод из нержавеющей стали или титанового сплава с высоким удельным сопротивлением с толщиной стенки $\sim 2-3 \text{ мм}$ или ступенчатый компенсатор, конструкция которого ясна из рис.13.

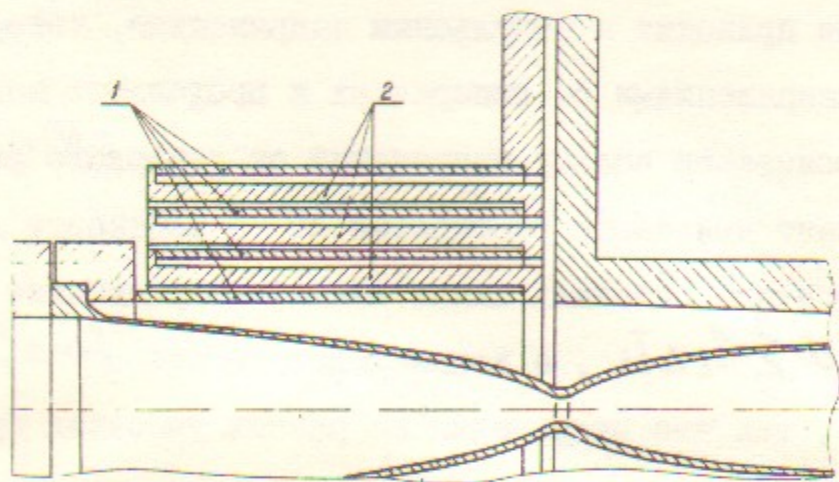


Рис.13 Ступенчатый компенсатор теплового расширения.

1 — компенсирующие трубы, 2 — коммутирующие трубы.

При охлаждении компенсация удлинений может нарушаться, т.к. сложно создать одинаковые условия теплоотвода для линзы и компенсаторов, однако возникающие при этом напряжения менее опасны, поскольку к этому моменту практически отсутствуют другие напряжения в линзе.

3. Скиновый нагрев стенок линзы при питании коротким импульсом тока, при котором толщина скин-слоя $\delta < r$. В этом режиме происходит нагрев только наружной поверхности линзы при неизменной температуре внутренней, так что отсутствует удлинение линзы, как целого, но возникают поверхностные напряжения, которые и определяют максимальную величину магнитного поля. Как показали описанные ниже эксперименты, предельное поле в скиновом режиме для материала ДІ6Т составляет $\sim 25 \text{ тл.}$ т.е. существенно выше рабочего диапазона полей, определяемого предельными напряжениями от сил поля в статических режимах.

В скиновом режиме температура нагрева поверхности минимальна, поскольку при $\delta \ll r$ она не зависит от длительности импульса и для заданного материала определяется только величиной магнитного поля ($\Delta T \approx H^2$), так что нагрев происходит только в области шейки и быстро уменьшается с увеличением радиуса. Выполнение условия $\delta \ll r$ требует существенного уменьшения длительности импульса тока, что наряду с усложнением системы питания приводит в область нежелательных механических резонансов, поэтому рассмотрим подробнее критерий перехода от скинового нагрева к квазипостоянному.

С достаточной точностью можно считать, что линза в каждом сечении представляет собой трубу с наружным радиусом r_0 и

внутренним r_1 ($\Delta r = h$ - толщина стенки). При питании синусоидальным импульсом тока частотой ω распределение поля по сечению трубы описывается выражением:

$$H(r,t) = H_0 \operatorname{Re} \left[i \frac{\mathcal{Z}(x\sqrt{t})}{\mathcal{Z}(x_0\sqrt{t})} e^{-i\omega t} \right] + \sum_{j=1}^{\infty} a_j e^{-\frac{c^2 \mu_j^2 t}{4\kappa\delta}} \cdot \mathcal{Z}(\mu_j r),$$

где

$$\mathcal{Z}(x\sqrt{t}) = J_1(x\sqrt{t}) \mathcal{H}_1(x\sqrt{t}) - \mathcal{H}_1(x\sqrt{t}) J_1(x\sqrt{t}),$$

$$\mathcal{Z}(\mu_j r) = J_1(\mu_j r) N_1(\mu_j r) - J_1(\mu_j r) N_1(\mu_j r),$$

$J_1(x\sqrt{t})$, $\mathcal{H}_1(x\sqrt{t})$, $N_1(\mu_j r)$ - цилиндрические функции мнимого аргумента, $\mu_j r_0$ - корни уравнения $\mathcal{Z}(x) = 0$, $x = \sqrt{2} \frac{r}{\delta}$. Первый член в правой части соответствует установившемуся процессу, второй член - сумма релаксационных составляющих, описывающих переходные процессы при включении тока.

При рассмотрении нагрева в цилиндрической геометрии при $\delta \sim \Delta r = r_0 - r_1$, учет релаксационных составляющих дает небольшую поправку в температуре ($\sim 5\%$), так что с достаточной точностью можно считать процесс установившимся [II] и получить для температуры нагрева за "n" полупериодов синусоидального импульса тока выражение:

$$T(r) = \frac{H_0^2}{8\delta c} n \left| \frac{J_0(x\sqrt{t}) \mathcal{H}_1^{(n)}(x\sqrt{t}) - \mathcal{H}_0^{(n)}(x\sqrt{t}) J_1(x\sqrt{t})}{J_1(x_0\sqrt{t}) \mathcal{H}_1^{(n)}(x\sqrt{t}) - J_1(x\sqrt{t}) \mathcal{H}_1^{(n)}(x_0\sqrt{t})} \right|^2$$

В предельных случаях при $r_1/r_0 = 0$ - сплошной цилиндр - это выражение принимает вид $T(r) = \frac{H_0^2}{8\delta c} n \left| \frac{J_0(x\sqrt{t})}{J_1(x_0\sqrt{t})} \right|^2$ а при $r_1/r_0 \rightarrow 1$ - геометрия эквивалентна бесконечно высокой плоской шине толщиной $x_0 = \Delta r$ (обратный ток идет по второй шине, так что поле между ними $H = H_0$, а вне шины $H = 0$) -

распределение нагрева по толщине описывается, как

$$T(x) = \frac{H_0^2}{8\delta c} n \frac{\operatorname{ch} \frac{2x}{\delta} + \operatorname{Cos} \frac{2x}{\delta}}{\operatorname{ch} \frac{2x_0}{\delta} - \operatorname{Cos} \frac{2x_0}{\delta}}.$$

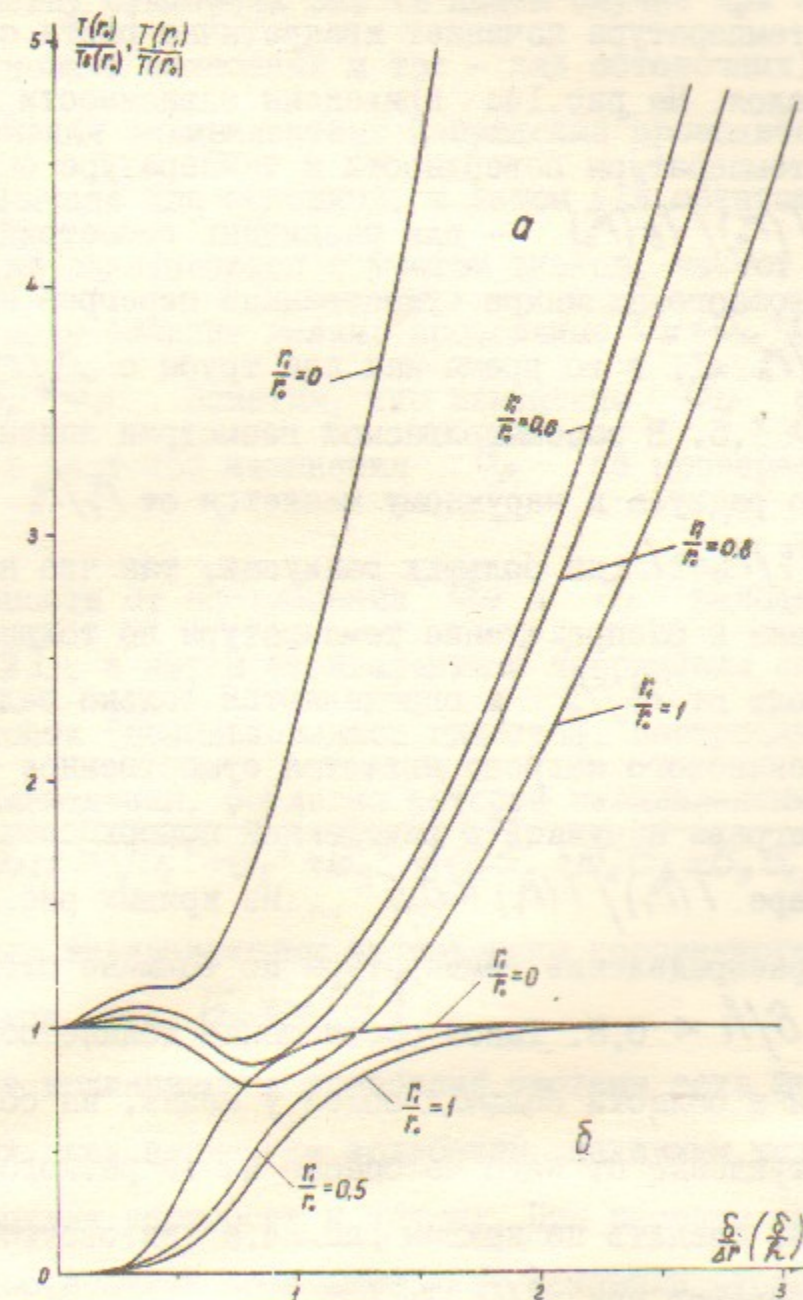


Рис.14 К расчету нагрева.

При $\delta/h \rightarrow 0$ во всех трех случаях температура поверхности не зависит от длительности импульса и равна $T(r_0) = \frac{H_0^2}{8\delta C} n$. Так при поле $H = 100$ кэрстед и $n = 1$ скиновый нагрев дает температуру поверхности для алюминия $T(r_0) = 52^\circ$ и для бериллия $T(r_0) = 41^\circ$. Слабая зависимость температуры от величины скин-слоя имеет место приблизительно до $\delta/h \sim 1$, а при $\delta/h > 1$ температура начинает квадратично расти с увеличением скин-слоя. На рис. 14а приведены зависимости перегрева — отношение температуры поверхности к температуре скинового нагрева $T(r_0)/T_0(r_0)$ — для различных геометрий. Видно, что для сплошного цилиндра существенный перегрев наступает уже при $\delta/r_0 = 1$, в то время как для трубы с $r_1/r_0 > 0,5$ — при $\delta/r_0 \geq 1,5$. В рассматриваемой геометрии линзы отношение внутреннего радиуса к наружному меняется от $r_1/r_0 \geq 0,5$ на шейке до $r_1/r_0 \rightarrow 1$ на больших радиусах, так что на всей линзе и величина и распределение температуры по толщине практически не зависят от r_1/r_0 и определяются только величиной δ/r_0 . Критерием скинового нагрева является существенное отличие температуры нагрева наружной и внутренней поверхности линзы, по крайней мере $T(r_1)/T(r_0) < 0,5$. Из кривых рис. 14, б видно, что такое распределение температуры по толщине стенки имеет место при $\delta/h < 0,8$. Такое соотношение должно обязательно выполняться в области больших полей у шейки, на больших же радиусах отступление от него не опасно из-за резкого спада поля и нужно лишь следить по кривым рис. 14, а за отсутствием существенных перегревов при $\delta/h > 1,5$.

При $\delta/h = 1+3$ по приведенным кривым можно легко построить распределение температуры по длине при заданных геометрии, токе и длительности импульса.

Выше получен ряд напряжений: от радиальных усилий $\sigma_r = [\sigma]$, изгибных напряжений от моментов сил σ_u , от продольных усилий σ_{np} и тепловых нагрузок σ_T . В динамических режимах нагружения продольные нагрузки представлены числом слагаемых, равным количеству суммарных сил (в нашем случае три значения σ_{np} для основных колебаний и три — для остаточных).

Для получения эквивалентных напряжений проводится сложение напряжений: вначале для основных, а затем для остаточных колебаний. Напряжения складываются с учетом знаков, частот и фаз (рис. 11) в каждом сечении линзы: продольные $\sigma_{||} = \sigma_u + \sigma_{np} + \sigma_T$ и радиальные $\sigma_{\perp} = \sigma_r$. Заметим, что изменение σ_u совпадает в нашем случае с частотой изменения σ_r на проверяемом диаметре линзы.

В зависимости от соотношения $\sigma_{||}$ и σ_{\perp} находятся главные напряжения [12], а затем эквивалентные напряжения согласно гипотезам прочности (использовалась гипотеза, построенная на теории энергии формоизменения, согласно которой эквивалентные напряжения

$$\sigma_{эkv} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)}$$

по большим эквивалентным напряжениям корректируются толщины стенок линзы так, что $\sigma_{эkv} = [\sigma]$.

Затухание механических колебаний системы есть функция ряда величин, таких, как амплитуда колебаний, величины механических напряжений, модуля упругости и других. При расчете линзы по напряжениям от остаточных колебаний, как показали эксперименты, ориентировочно можно считать, что механические колебания вблизи шейки затухают за единицы периодов, на диаметрах 20–30 мм — за

десятки периодов, на больших диаметрах и продольные колебания — за сотни периодов.

Используя зависимость фазы максимумов перемещений от параметра "К" (рис.II), в зависимости от величин напряжений σ_{np} , σ_p и σ_T , можно оптимизировать длительность импульса тока путем смещения по фазе максимумов наибольших напряжений.

УШ. Выбор допускаемых напряжений для различных ресурсов работы линз

Поскольку ставилась задача изготовления линз на различное число циклов нагружения ($10^3 + 10^6$ циклов), возникает необходимость выявления допускаемых напряжений для таких режимов работы, в [13] приведены кривые долговечности сплава марки Д16 (рис.I5). Задача сводилась к проверке возможности использования этих кривых для материала линз (Д16Т, $N_B = 105 + 120$). Испытание материала линз проводилось по схеме рис.I6 в двух точках: $\sigma = 20 \text{ кг/мм}^2$ и $\sigma = 45 \text{ кг/мм}^2$. В первом случае образцы выдерживали $\sim 10^6$ циклов, во втором $10^3 - 10^4$ циклов нагружения, что согласуется с приведенной кривой.

Таким образом, в зависимости от материала линзы и желаемого числа циклов работы по кривой долговечности определяются допускаемые напряжения $[\sigma]$.

Экспериментально проверялось влияние на долговечность работы нагрева, остаточных колебаний, симметрии нагружения и др.

IX. Экспериментальные установки

Программа экспериментального исследования механических свойств линз предполагала работу в двух режимах: в крайнем динамическом режиме при длительности полупериода импульса тока

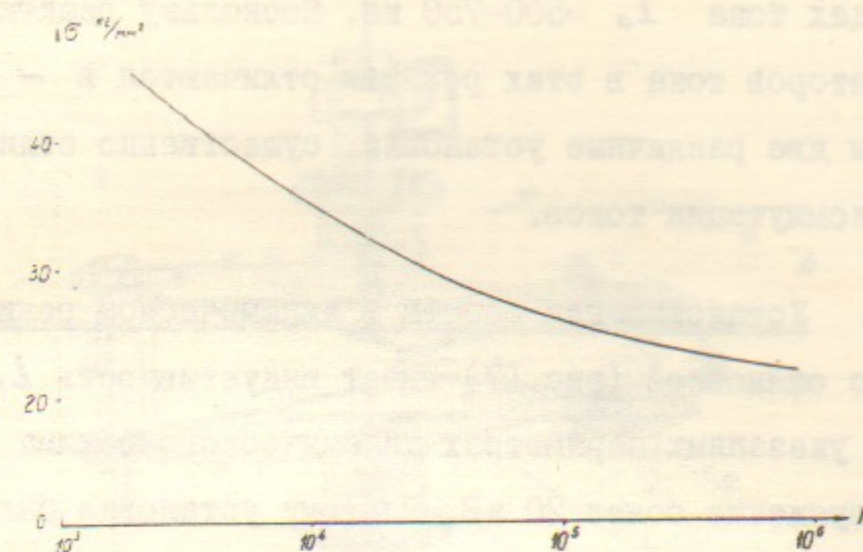


Рис.I5 Кривая долговечности материала Д16Т

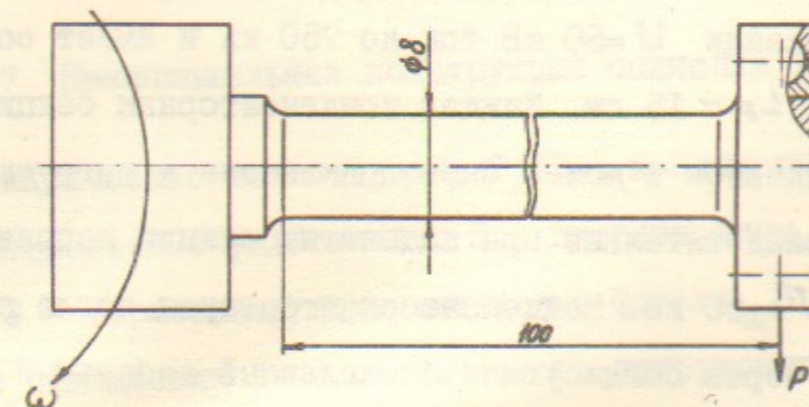


Рис.I6 Схема испытаний материала линз

$\tau = 2 + 6$ мксек и в квазистатическом режиме с $\tau \sim 100$ мксек при амплитудах тока $I_0 = 500-750$ ка. Поскольку реактивные мощности генераторов тока в этих режимах отличаются в ~ 30 раз, были созданы две различные установки, существенно отличающиеся по технике коммутации токов.

Установка для работы в динамическом режиме

Линза с ошиновкой (рис.17) имеет индуктивность $L_l \sim 35$ см, так что при указанных параметрах динамического режима на ней выделяется напряжение более 20 кВ. Поэтому установка была собрана на малоиндуктивных высоковольтных конденсаторах ИКМ-50-3 с коаксиальным выводом, имеющих собственную индуктивность $L_c \sim 10$ см и ошинованных в две секции по четыре параллельно соединенных конденсатора. Коммутация тока осуществлялась специально разработанными трехэлектродными разрядниками под давлением (5-10 атм. азота) с автоматическим продувом. Разрядник способен коммутировать при напряжении $U = 50$ кВ ток до 750 кА и имеет собственную индуктивность $L_p \sim 15$ см. Каждая конденсаторная секция снабжена своим разрядником и может быть подключена к нагрузке параллельно или последовательно при подаче на секции напряжения разной полярности $U = \pm 50$ кВ. Конденсаторная батарея могла подключаться к нагрузке через согласующий безжелезный кабельный трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 4$. Рабочее напряжение трансформатора в цепи нагрузки $U_2 = 25$ кВ, в первичной цепи — $U_1 = \pm 50$ кВ, индуктивность рассеяния, приведенная к цепи нагрузки $L_s \sim 10$ см.

Таким образом вариацией емкости конденсаторной батареи от 6 мкф до 24 мкф (последовательное, одиночное и параллельное соединение) и включением в схему или выключением трансформатора

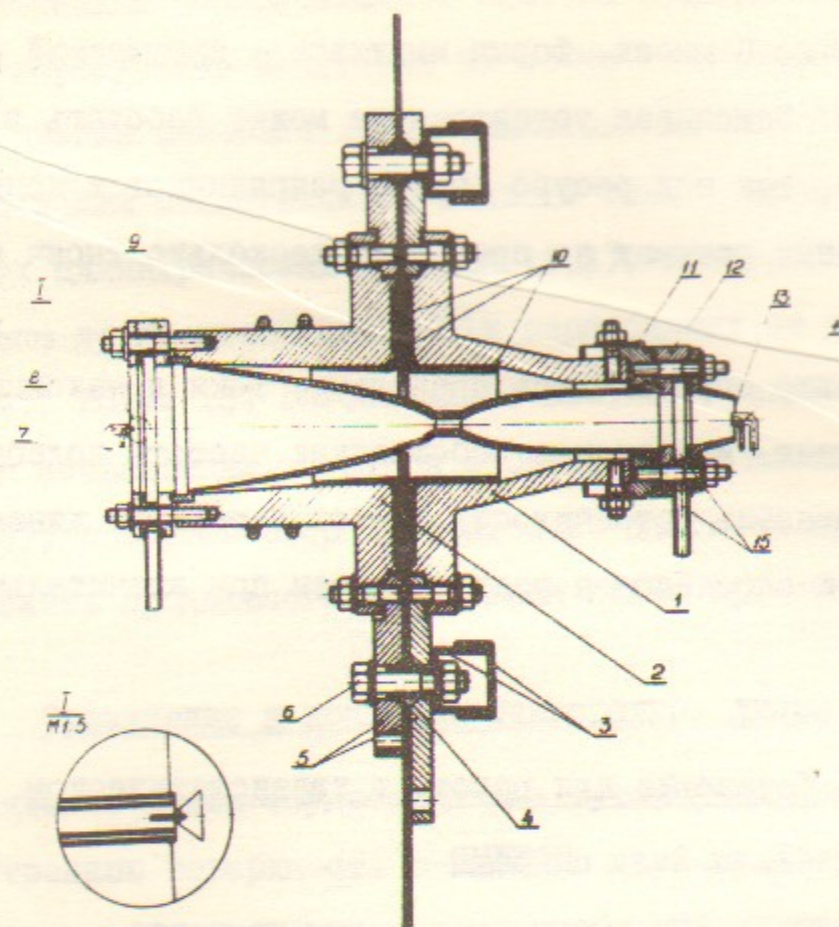


Рис.17 Принципиальная конструкция ошиновки линз.

1,2 — цилиндрические токоподводы, 3,10 — изоляторы, 4 — резиновые высоковольтные уплотнения, 5 — плоские шины, 6 — стяжные болты, 7,13 — герметизирующие титановые фольги, 8,14 — напорные трубки охлаждения линз статического нагружения, 9,12 — силовые контактные фланцы с водяным уплотнением, II — контактные элементы, обеспечивающие отсутствие продольных напряжений при сборке, 15 — канавки и трубки сливного тракта.

можно было изменять длительность полупериода импульса тока от $\tau = 2,2$ мксек до 6 мксек. Форма импульса — затухающий колебательный разряд. Описанная установка не может работать в режиме 10^5 – 10^6 циклов, так как ресурс работы разрядников и конденсаторов в указанных режимах не превышает несколько тысяч импульсов.

На установке определялись предельные токи и максимальные рабочие поля линз, измерялись собственные частоты колебаний в линзе, исследовалась устойчивость стенок в режимах динамического нагружения и определялся ресурс работы при значительных перегрузках.

Установка для работы в квазистатическом режиме

Установка собрана на конденсаторах ИСУ-5-200 в параллельно-последовательном включении (три последовательно включенные секции по четыре параллельно ошинованных конденсатора) с рабочим напряжением $U_1 = 10$ кВ. Линза подключалась через согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 10$. Коммутация первичного тока $I_0 = 55$ кА осуществлялась игнитронами ИЗ-140/0,8А. Униполярная форма тока обеспечивалась игнитроном, закорачивающим нагрузку на активное сопротивление, представляющее собой две коаксиальные трубки длиной $l \sim 1,5$ м, причем наружная медная трубка имеет малое сопротивление, а внутренняя из нержавеющей стали имеет $R = 0,08 \Omega$ и охлаждается водой. Длительность полупериода импульса тока составляет $\tau \sim 120$ мксек, частота следования импульсов $f = 0,2$ гц.

На установке отрабатывалась система охлаждения линзы и проводились ресурсные испытания на сотни тысяч импульсов.

Конструкция ошиновки линзы приведена на рис.17. Коаксиальная ошиновка для симметричного подвода тока к линзе выполнена в виде двух цилиндрических деталей (1,2), сцентрированных друг относительно друга изоляторами (3) и переходящих на плоские токоподводы (4). Болты (5) обеспечивают жесткое крепление линзы в продольном направлении. С одной стороны линза жестко крепится фланцем (6), с другой стороны применено цанговое крепление (7), чтобы избежать продольного нагружения линзы при сборке.

Охлаждение и контроль температуры линзы

Охлаждение линзы осуществлялось путем разбрызгивания воды на ее внутреннюю поверхность с помощью двух пульверизаторов, установленных на торцах линзы так, чтобы они находились в "тени" от шейки и вместе с подводами, выполненными из тонкостенных трубок, не ухудшали прозрачность линзы. Конструкция системы охлаждения ясна из рис.17. По внутренней трубке поступает сжатый воздух, по наружной — вода. Сток воды осуществляется через отверстия в боковых фланцах. В сливных ветвях системы охлаждения установлены контактные расходомеры, отключающие установку при недостаточной подаче воды. Недостаточное давление воздуха также фиксируется расходомерами, т.к. при этом вода через отверстие в шейке выбрасывается из одной половины линзы в другую, меняя соотношение расходов в сливных ветвях. Суммарный расход воды составляет порядка 1 литра в минуту при частоте циклов $f = 0,2$ гц и $\tau_{и} = 120$ мксек, при этом средний нагрев линзы к началу следующего импульса не превышает 10^0 .

Контроль температуры линзы осуществляется термопарными датчиками, зачеканенными в отверстия в контактных буртах и в районе шейки. К сожалению, в результате вибрации подводы к термопарам, расположенным в районе шейки, отламывались после нескольких сотен импульсов и на них производились только калибровочные измерения. Сигналы с термопарных датчиков путем поочередного переключения ($\sim 0,5$ гц) регистрировались малоинерционным чувствительным самописцем Н-373-1, снабженным блокировочными контактами, выключающими систему питания при перегреве линзы.

Измерение частот собственных колебаний

Измерение собственных частот поперечных и продольных колебаний производилось емкостными датчиками, установленными внутри линзы как показано на рис.5. Емкость, образованная внутренней поверхностью линзы и внешней поверхностью датчика, повторяющей поверхность линзы, заряжалась через высокоомное сопротивление от батареи $U = 80$ В. Изменение напряжения на емкости при колебаниях стенки линзы фиксировалось осциллографом ($R_{вх} = 0,5 \Omega$). Сигнал с датчика представляет собой сумму колебаний всех частот, с которыми колеблются стенки линзы на длине датчика, поэтому осциллограммы имеют вид синусоид, амплитуды которых уменьшаются до нуля (стенки линзы на краях датчика колеблются в противофазе), затем снова возрастают и т.д. Погрешность в измерении частоты зависит от длины датчика, точности воспроизведения поверхностью датчика профиля линзы, различия перемещений стенок на длине датчика и др. Таким образом датчик измеряет среднюю частоту колебаний, расхождение которой с расчетной при подстановке среднего диаметра линзы в середине датчика не превышает $5 \pm 10\%$. Частота

продольных перемещений измерялись торцевым датчиком, установленным в районе шейки на линзе без отверстия в шейке (рис.5).

Х. Результаты испытаний дюралевых линз

Для проведения исследования были изготовлены три типа линз, рассчитанные на униполярные импульсы тока длительностью: $\tau = 2,5$ мксек, $\tau = 6$ мксек и $\tau = 110$ мксек, ток 500 ка и $[G] = 18$ кг/мм². Линзу на длительность $\tau = 6$ мксек предполагалось исследовать при значительных перегрузках, поэтому из соображений устойчивости в районе максимального диаметра линза была усилена ($h = 0,8$ мм). Диаметр шейки линз 16 мм, при этом ее прозрачность ($K = \frac{\alpha \text{ собирания}}{\alpha \text{ шейки}}$) составляет 92%. С целью проверки на устойчивость и долговечность работы испытывались и отбракованные линзы, на которых были допущены существенные отклонения толщин стенок от расчетных или нарушена необходимая чистота поверхности (риски от резца). Контрольное измерение толщин стенок изготовленных линз производилось электроконтактным способом с использованием нониусов токарного станка и индикаторов перемещений. Таблицу толщин стенок линз см. на рис.18.

1) Линзы квазистатического нагружения

Испытательный ток $I_m = 550$ ка, частота следования импульсов $f = 0,2$ гц. На линзах отработывались системы охлаждения и контроля температуры, потому имели место и перегрев, и неравномерность распределения воды в полулинзах (слой воды в нижней части полулинз эквивалентен несимметрии нагружения).

Линза № 1. $T/2 = 115$ мксек, форма тока — колебательный разряд, декремент колебаний тока $\Delta = 2,2$. Линза с риской (брак

при изготовлении) на максимальном диаметре в начале перехода на контактный фланец (риска в форме проточки шириной $\sim 0,3$ мм и глубиной $\sim 0,2$ мм). После 3500 импульсов появилась трещина на проточке.

Линза № 2. $T/2 = 115$ мксек, $\Delta = 2,2$. Малая полулинза закреплена не коаксиально в токоподводе (смещение 0,5 мм при зазоре в 5 мм). После 30000 импульсов малая полулинза деформировалась со стороны меньшего зазора.

| x | | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | |
|------------|------------------------|--------------|----------------------|------|------|------|-----|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| R | | 15,35 | 15,8 | 15,4 | 13,9 | 10,7 | 8 | 11,6 | 16,6 | 20,5 | 24 | 27 | 29,9 | 32,6 | |
| $N = 10^5$ | Диаметр материала ДФбТ | $\tau_{2,5}$ | $\frac{h}{0,83}$ 0,8 | 0,82 | 1,1 | 1,68 | 3 | 1,22 | 0,73 | 0,52 | 0,39 | 0,27 | 0,22 | 0,2 | |
| | | τ_e | 1,53 | 1,35 | 1,5 | 1,8 | 2,6 | 4,5 | 2,47 | 1,38 | 1,08 | 0,89 | 0,77 | 0,68 | 0,6 |
| | | τ_{10} | 1,79 | 1,72 | 1,78 | 1,97 | 2,7 | 4,5 | 2,65 | 1,65 | 1,33 | 1,15 | 1 | 0,91 | 0,85 |
| $N = 10^6$ | Диаметр Ве | τ_{10} | 1,91 | 1,85 | 1,9 | 2,16 | 3 | 5 | 2,8 | 1,8 | 1,46 | 1,25 | 1,1 | 1 | 0,95 |
| | | τ_{10} | 2,61 | 2,55 | 2,6 | 3,1 | 4,1 | $\frac{p-g}{h=6}$ 3,5 | 2,4 | 1,96 | 1,67 | 1,5 | 1,38 | 1,3 | |

Рис.18 Сводная таблица толщин стенок линз.

x - расстояние вдоль линзы, см; R - координата наружного (токового) профиля линзы, мм; h - толщина стенки, мм; индексами обозначена расчетная длительность импульса тока; N - число циклов нагружения.

Линза № 3. $T = 120$ мксек, импульс униполярный, частота следования импульсов тока $f = 0,25 \pm 0,3$ гц. После 200000 импульсов появились усталостные трещины вблизи шейки и на диаметре 56 мм, вслед за чем на этом диаметре линза потеряла устойчивость.

2) Линзы, рассчитанные на длительность импульса

тока $\tau = 6$ мксек

Охлаждение линз осуществлялось сжатым воздухом.

Линза № 1. Режим а) $I_m = 670$ кА, $T = 12$ мксек,

$\Delta = 1,5$; после 250 разрядов ток увеличен до 750 кА. Режим б) $I_m = 750$ кА, $T = 12$ мксек, $\Delta = 1,5$; 130 разрядов, - деформировалась малая полулинза вблизи заделки при напряжениях в стенке выше предела прочности материала. Поверхность шейки стала шероховатой (поле на шейке равно 18,7 мл).

Линза № 2. $I_m = 750$ кА, $T = 12$ мксек, $\Delta = 1,5$. После

100 разрядов линза потеряла устойчивость на участке с заниженной толщиной стенки (диаметр 50 мм, $h = 0,65$ мм вместо расчетной 1,05 мм) при напряжениях, значительно превосходящих предел прочности материала.

3) Линзы, рассчитанные на длительность импульса

тока $\tau = 2,5$ мксек

Линзы исследовались путем постепенного (через ~ 10 импульсов) увеличения тока от 450 кА до момента начала деформации.

Линза № 1. а) $I_m = 530$ кА, $T = 4,4$ мксек, $\Delta = 2$, 100 разрядов, Экспериментальная установка не позволяет дальнейший подъем напряжения на батареях.

б) $I_m = 550$ кА, $T = 7,8$ мксек, $\Delta = 1,6$. Линза потеряла устойчивость на диаметре 56 мм ($h = 0,3$ мм) при напряжениях в стенке, превосходящих предел прочности материала ввиду большой длительности и слабого затухания импульсов тока.

Линза № 2. $I_m = 570$ кА, $T = 8,5$ мксек, $\Delta = 3,24$ (внесено дополнительное затухание). Линза потеряла устойчивость на диаметре 56 мм при напряжениях в стенке, близких к пределу прочности материала.

Напомним, что в динамических режимах нагружения вклад в перемещения стенок вносят все полупериоды затухающего тока и имеют место остаточные колебания максимальных амплитуд (см. рис. 2), поэтому в действительности число нагружений линзы существенно выше числа разрядов (см. главу УП).

XI. Анализ результатов исследований

I. Выбор допускаемых напряжений

Приближения, использованные в расчетах линзы на прочность, не вносят больших погрешностей. Эксперименты показали, что более существенными оказываются: наличие остаточных колебаний, асимметрия нагружения (подвод тока, точность изготовления, распределение охлаждающей воды в полулинзах), чистота поверхностей, соблюдение условий закрепления, стабильность механических характеристик материала и др. Поэтому при выборе допускаемых напряжений следует вводить эти факторы в виде коэффициентов запаса. Так при работе в крайне динамических режимах нагружения на больших диаметрах вдали от мест закрепления оболочки (диаметры 45 + 55 мм) долговечность за счет остаточных колебаний снижается по крайней мере на порядок. Поправки от других факторов, понижающих долговечность, можно свести к минимуму надлежащим контролем изготовления линз, совершенствованием системы охлаждения и тщательной сборкой всей системы. Приведем приближенную зависимость допускаемых напряжений от числа циклов

нагружения для материала Д16Т.

| | | | | |
|----------------|--------------------------------|------------------|----------|-----------|
| При $[\sigma]$ | $= 40 + 45$ кг/мм ² | ресурс работы до | 10^3 | импульсов |
| " | $= 30 + 35$ кг/мм ² | ресурс работы до | 10^4 | импульсов |
| " | $= 20 + 25$ " | " | 10^5 | " |
| " | $= 15 + 17$ " | " | 10^6 | " |
| " | < 15 " | " | $> 10^6$ | " |

2) Устойчивость стенок в динамических режимах нагружения

В квазистатическом режиме нагружения потеря устойчивости наступила при давлении поля в 1.1 раз превосходящем критическое давление в статическом режиме, при напряжениях в стенках ~ 20 кг/мм². Поскольку деформация линз в динамических режимах нагружения имела место при напряжениях, близких к пределу прочности материала линз, вопрос устойчивости при рабочих напряжениях $\sigma_{\text{раб}} \leq 18$ кг/мм² в исследованном диапазоне длительностей в задачу не входит. На рис. 12 показана зависимость отношения магнитного давления на диаметре деформации к критическому давлению из условия статической устойчивости от параметра динамичности "К" вычисленного по эффективному времени нагружения

$$t_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} e^{-2\delta t} \cdot \sin \omega t dt$$

3) Предельные магнитные поля

Магнитное поле ~ 14 тл после 200000 импульсов длительностью $\tau = 120$ мксек не дало заметных изменений на поверхности шейки линзы из материала Д16Т. При поле ~ 20 тл после 100 разрядов длительностью $T \sim 10$ мксек, $\Delta \sim 2$ на поверхности

можно заметить продольные прерывистые полосы — "шелушение" поверхности, а при поле 22 тл этот эффект наблюдается после единичного разряда тех же параметров. При поле ~ 30 тл и длительности импульса тока $T \sim 8$ мксек, $\Delta \sim 2$ поверхность при разряде оплавляется (специальные эксперименты на сплошном стержне из того же материала). Таким образом полем, выше которого линза может использоваться лишь однократно, следует считать поле ~ 25 тл.

Хотя работа в динамических режимах привлекает возможностью существенного уменьшения толщины стенок линз, создание надежно работающей системы питания на ресурс $\sim 10^6$ циклов в условиях эксплуатации ускорительного комплекса и высоких доз радиации в районе самой линзы представляет значительные технические трудности и кроме того ограничена применимость таких линз для фокусировки пучков с большой длительностью сгустка частиц. Поэтому для работы на ускорительном комплексе выбран вариант линзы при длительности импульса $\tau = 70 + 110$ мксек и максимальных напряжениях $[G] \leq 16$ кг/мм². Профили таких линз из материалов Д16Т и бериллия, рассчитанных на ресурс $\geq 10^6$ импульсов, приведены на рис. 18.

При такой геометрии средний путь частицы в материале стенок линзы составляет для Al $S \sim 2$ см, для Be $S \sim 3$ см, что при импульсе частиц $PC = 1,8$ Гэв приведет к углу многократного рассеяния для Al $\sqrt{\theta^2} \sim 3,5 \cdot 10^{-3}$ и даже при размере источника $\Delta X = \pm 1$ мм углы рассеяния меньше фазовых углов в пучке, так что искажение фазового объема пучка за счет рассеяния будет незначительным.

Авторы выражают благодарность Всеволожской Т.А. за полезные обсуждения, Купчику В.И. за помощь в проведении численных расчетов, Вечеславовой Т.Е. за ряд конструкторских разработок, Самошину В.С. за помощь в разработке технологии изготовления линз, Ленькову А.К. за активное участие в разработке и изготовлении ряда узлов экспериментальных установок.

Л и т е р а т у р а

1. Л.Л.Данилов, С.Н.Родионов, Г.И.Сильвестров, ЖТФ, 37, 914, 1967, М-Л.
2. Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров, ЖТФ, 43, 61, 1973, Л.
3. Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов, В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров, Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 2, 224, 1972, М.
4. Г.И.Будкер, Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 2, 196, 1972, М.
5. Д.Г.Баратов, В.М.Валов, Р.А.Рзаев, В.Л.Рыков, И.М.Шалашов, ПМТФ, 3, 1974, М.
6. *J.C. Dusseux, J.V.M. Pattison, G. Liebagth, CERN-TCD/Int. 72-11 (1972).*
7. Справочник машиностроителя, 3, изд.2, М, 1956.
8. С.П.Тимошенко, "Колебания в инженерном деле", Физматгиз, 1959.
9. "Прочность, устойчивость, колебания", Справочник, 3, 1968, М.
10. А.С.Вольмир, "Устойчивость деформируемых систем", изд.2, 1967, М.
11. Т.А.Всеволожская, М.А.Любимова, Г.И.Сильвестров, "Оптические свойства цилиндрических линз", Препринт ИЯФ СО АН СССР, 74-27, Новосибирск, 1974.
12. Справочник металлиста, 2, ред.С.А.Чернавский и др. М, 1958.
13. С.В.Серенсен, В.П.Когаев, Р.М.Шнейдерович, "Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность", Машгиз, М, 1963.

Работа поступила -10 июля 1975 г.

Ответственный за выпуск Г.А.СПИРИДОНОВ
Подписано к печати 30.X-1975 г. МН 03209
Усл. 2,5 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 98 . Препринт

Отпечатано на роталпринте в ИЯФ СО АН СССР