



Б.34

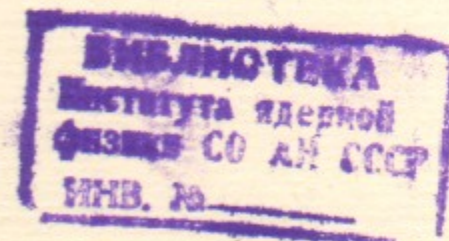
48

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Б.Ф.Баянов, Т.А.Всеволожская,
Г.И.Сильвестров

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ
И КОНСТРУКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛИТИЕВЫХ ЛИНЗ

ПРЕПРИНТ 84-168



НОВОСИБИРСК

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И КОНСТРУКТИВНОЕ
РАЗВИТИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛИТИЕВЫХ ЛИНЗ

Б.Ф.Баянов, Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров

А Н Н О Т А Ц И Я

Проводится анализ механических напряжений в цилиндрических литиевых линзах, возникающих под действием магнитного поля и теплового расширения лития. Приводятся результаты экспериментального исследования напряжений в системе в зависимости от геометрии литиевого объема при циклическом нагреве и охлаждении линзы. Описываются различные варианты конструкций, развитие и совершенствование которых было подчинено задаче создания линз большого диаметра и привело к разработке линз с жидким литием, прокачиваемым через систему, как наиболее полно отвечающих требованиям теплоотвода и снижения механических напряжений.

Цилиндрические литиевые линзы - оптические системы с сильным магнитным полем для аксиально-симметричной фокусировки частиц высоких энергий /1/ находят все большее применение в оптике пучков вторичных частиц /2-5/. Со времени создания в 1972 году первых литиевых линз для применения в системах электрон-позитронной конверсии установок ВЭШ-2 и ВЭШ-3 /6,7/ их конструкции претерпели многочисленные изменения, однако общая конструктивная схема, позволяющая использовать литий - мягкий, химически активный металл - в системах с сильными магнитными полями и высоким энерговыделением, сохраняется практически неизменной. Ее основу составляет тонкостенный цилиндрический контейнер, ограничивающий рабочий объем лития и расширяющийся на концах для формирования областей аксиально-симметричных токоподводов к литиевому стержню. На торцах конструкцию ограничивают два токоподводящих элемента с цилиндрическими расточками, стягиваемые в осевом направлении и уплотняемые на фланцы титанового контейнера, так что образуется герметичный объем, заполняемый литием. В тоководах имеются отверстия для входа и выхода пучка, закрытые бериллиевыми вкладышами. Выбор титана в качестве основного конструктивного материала линзы обусловлен его высокой химической стойкостью по отношению к литию и большим удельным омическим сопротивлением, благодаря чему на титановый цилиндр отвечает малая доля тока, текущего через линзу: $J_{Ti}/J_{Li} \approx \frac{\Delta}{r_0} \rho_{Li}/\rho_{Ti}$, где ρ_{Li} и ρ_{Ti} - удельные сопротивления лития и титана, r_0 - радиус литиевого стержня, Δ - толщина стенки титанового цилиндра. Мы используем в конструкциях линз сплав титана ВТ-6, имеющий удельное сопротивление $\rho_{Ti} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, что позволяет при $\rho_{Li} = 8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см выбирать толщину стенки $\Delta = (0,2+0,3)r_0$, так что $J_{Ti} < 0,1 J_{Li}$.

Химическое взаимодействие жидкого лития с основными конструкционными материалами упрощает проблему переходных контактов между токоподводящими элементами, которые в большинстве случаев изготавливаются из стали, и развитыми торцами литиевого стержня. В процессе заполнения системы

жидким литием он очищает поверхности токоподводов и после затвердевания образуется прочное, подобное припайванию, соединение лития с поверхностью, обеспечивающее надежное контактное соединение, при работе с плотностями тока более 100 кА/см².

Как будет показано ниже, основными техническими проблемами создания литиевых линз с большими магнитными полями >100 кЭ является обеспечение механической прочности конструкции и отвод мощности, выделяемой в рабочей части лития. Многочисленные испытания различных конструктивных вариантов линз показали, что наиболее ответственным элементом системы определяющим работоспособность и надежность линз, является внутренний титановый цилиндр, являющийся оболочкой рабочего объема лития и воспринимающий максимальные механические напряжения, возникающие в системе. Ниже мы рассмотрим основные факторы, определяющие механические напряжения в линзах.

Распределение давления в системе при наличии магнитного поля, постоянного во времени или меняющегося медленно по сравнению со временем установления гидродинамического равновесия в литии, определяемым по порядку величины временем распространения звука в системе, описывается соотношением /8/

$$\text{grad } p + \frac{1}{4\pi} [H \text{ rot } H] = 0 \quad (1)$$

В радиальном направлении, если предположить степенную зависимость поля от радиуса $H = H_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\nu$, получаем $\frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{\nu+1}{8\pi} H^2 \right) = 0$. При близком к однородному распределении тока в сечении линзы ($\nu = 1$) и длине ее, много большей радиуса, давление в центральной части линзы в соответствии с последним выражением зависит от радиуса как

$$p(r) + \frac{H^2}{4\pi} = \text{const} \quad (2)$$

Давление представляет собой сумму $p = p_T + p_X$ тепловой составляющей p_T и "холодной", упругой составляющей p_X . Значение p_T определяется как $p_T = \Gamma \rho \varepsilon_T$, где ρ - плотность лития, Γ - коэффициент Грнайзена, ε_T - тепловая часть удельной внутренней энергии, равная в первом приближении удельной энергии активных потерь плюс начальное значение ε_{0T} , т.е. $\varepsilon_T = \varepsilon_{0T} + \int_0^t \frac{j^2 \delta}{\rho} dt$. Упругая составляющая давления линейно зависит от изменения плотности вещества относительно ее начального значения $p_X = (\rho - \rho_0) C_0^2 + p_{0X}$, где C_0 - скорость звука в литии, связанная соотношением $\rho C_0^2 = 1/\chi$ с удельной сжимаемостью χ . Условие сохранения массы лития в сечении линзы $\int_0^{r_0} (\rho - \rho_0) r dr = 0$ определяет значение константы в (2) как

$$\text{const} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{r_0} H^2 2r dr / r_0^2 + p_T + p_0, \quad (3)$$

где p_0 - начальное значение давления, так же как p_{0X} выше - его упругой составляющей. При нормальных начальных условиях значения $p_0, p_{0X}, \varepsilon_{0T}$, а также $p_{0T} = \Gamma \rho_0 \varepsilon_{0T}$, можно считать нулевыми. Если в системе задано предварительное сжатие, ненулевое значение p_0 возникает за счет ненулевого p_{0X} , значение же p_{0T} (ε_{0T}) и в этом случае остается нулевым.

С учетом временной зависимости поля $H \sim \sin \omega t$ и энергии активных потерь $\varepsilon_T \sim \int \sin^2 \omega t dt$ распределение давления по сечению линзы при достаточно большой толщине скин-слоя δ ($\delta \gg 0.7 r_0$) получаем в виде

$$p(r) = p_0 + \frac{\Gamma H_0^2}{4\pi} \left(\frac{\delta}{r_0}\right)^2 \left(\omega t - \frac{\sin 2\omega t}{2}\right) + \frac{H_0^2}{8\pi} \left(1 - 2\frac{r^2}{r_0^2}\right) \sin^2 \omega t \quad (4)$$

Тепловая составляющая p_T определяется вторым членом выражения (4). С учетом того, что коэффициент Грнайзена выражается через коэффициент теплового расширения α , удельную сжимаемость χ и теплопроводность C_V как $\Gamma = \frac{\alpha}{\chi}$, этот член приводится к виду $p_T = \frac{\alpha T}{\chi} \left(\omega t - \frac{\sin 2\omega t}{2}\right)$, где $\chi \rho C_V T = \frac{H_0^2 \delta^2}{4 \rho \nu r_0^2}$ температура нагрева за один полупериод синусоидального импульса тока, однородная по сечению линзы в случае $\delta/r_0 \gg 0.7$. При меньших значениях δ/r_0 давление, обусловленное нагревом, определяется средним по сечению значением температуры $\bar{T}(r)$. При этом, давление это уже не является чисто тепловой составляющей, но включает в себя и давление за счет перераспределения плот-

ности лития по сечению линзы, компенсирующее неоднородность p_T из-за неоднородности нагрева. Используя для $H(r)$ известную зависимость $H(r) = H_0 J_1(\sqrt{2i}r/\delta) / J_1(\sqrt{2i}r_0/\delta) / 8, I /$ значение $\overline{T}(r)$ получаем в виде

$$\overline{T}(r) = \frac{H_0^2}{4\rho C_V} \left(\frac{\delta}{r_0}\right)^2 \left[1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{4}{4 + (\mu_j \delta)^2} \right], \quad (5)$$

где $\mu_j r_0$ - корни уравнения $J_1(x) = 0$, равные при $j = 1, 2, 3, \dots$ $\mu_j r_0 = 3.83, 7.02, 10.17, \dots$, соответственно.

Третий член в выражении для давления (4) описывает влияние магнитного поля. На поверхности литиевого цилиндра оно приводит к разгрузке на величину $-\Delta p = \frac{H_0^2}{8\pi}$, на оси - к дополнительной нагрузке на ту же величину $H_0^2/8\pi$. Максимальное значение давления на поверхности достигается в фазе $\omega t = \arctg \frac{r_0^2}{2\Gamma \delta^2}$. При $\delta/r_0 = 0.7$ получаем $\arctg \frac{r_0^2}{2\Gamma \delta^2} = 1/\Gamma$ и $p_{min} = p_0 + H_0^2 (\Gamma \arctg \frac{r_0^2}{2\Gamma \delta^2} - 1) / 8\pi$. Подставляя для Γ в литии значение $\Gamma = \alpha / (\chi \rho C_V) \cong 1$, находим $\omega t \cong \pi/4$ и $p_{min} \cong p_0 - 0.21 H_0^2 / 8\pi$.

При близком к нулю начальном давлении $p_0 \cong 0$ значение p_{min} оказывается отрицательным. Это означает, что происходит обжатие литиевого цилиндра на величину Δr такую, что возникающее в литии давление компенсирует отрицательное значение p_{min} на поверхности, т.е. $\frac{2\Delta r}{\chi r} + p_{min} = 0$. Обжатие лития сопровождается его отрывом от титановой оболочки, что может служить источником неустойчивости в работе линзы. Возбуждение этого значения преддавления p_0 должно выбираться из условия $p_{min} \geq 0$. В рассмотренном выше случае ($\delta/r_0 \sim 0.7$) при поле на поверхности ~ 100 кЭ это означает $p_0 \geq 80$ атм. С уменьшением толщины скин-слоя уменьшение средней температуры нагрева лития и тепловой составляющей давления приводит к увеличению необходимого значения p_0 . В пределе при $\delta \rightarrow 0$ оно стремится к $H_0^2/8\pi$.

Максимальное давление на поверхности лития достигается к концу импульса тока, когда давление, связанное с магнитным полем, становится равным нулю, а тепловое достигает своего максимального значения $p = \frac{\alpha I^2}{\chi}$. При $\delta/r_0 = 0.7$ и поле $H_0 = 100$ кЭ эта величина составляет 1200 атм, что в несколько раз превышает давление, вызванное магнитным полем.

Давление на торце линзы - его среднее по сечению значение $\overline{p}_{\text{торц}}$, определяется условием $p + \frac{H^2}{8\pi} = \text{const}$. Используя (4)

для определения значения константы, получаем с учетом равенства нулю поля на торце:

$$\overline{p}_{\text{торц}} = p_0 + \frac{\Gamma H_0^2}{4\pi} \left(\frac{\delta}{r_0}\right)^2 \left(\omega t - \frac{\sin 2\omega t}{2} \right) + \frac{H_0^2}{16\pi} \sin^2 \omega t \quad (7)$$

Радиальная неоднородность давления, обусловленная в линзе зависимостью поля от радиуса, в торцовой области уменьшается с расстоянием от эффективного края поля как $e^{-\mu_j z}$. Расстояние Δz от торца линзы до эффективного края поля даже в предельном случае бесконечно тонкого токоподвода составляет $\Delta z \cong 0.3 r_0 / I$, что означает уменьшение радиальной неоднородности более, чем в e раз, так что в реальных геометриях давление на торец можно считать однородным по сечению, равным $\overline{p}_{\text{торц}}$.

Максимальное значение $\overline{p}_{\text{торц}}$ достигается в фазе $\omega t = \pi - \arctg \frac{r_0^2}{4\Gamma \delta^2}$ и составляет

$$(\overline{p}_{\text{торц}})_{\text{max}} = p_0 + \frac{\Gamma H_0^2}{4\pi} \left(\frac{\delta}{r_0}\right)^2 \overline{\omega t} + \frac{H_0^2}{16\pi}$$

При $\delta/r_0 = 0.7$ это означает $\omega t = 154^\circ$ и $(\overline{p}_{\text{торц}})_{\text{max}} = p_0 + \frac{H_0^2}{8\pi} \cdot 3.2$, что почти не отличается от значения $\overline{p}_{\text{торц}} = p_0 + H_0^2/8$ в фазе $\omega t = \pi$.

Второй член в правой части (7) не является тепловой составляющей давления поскольку отсутствие поля на торце означает и отсутствие нагрева, давление же передается из центральной части путем сжатия лития в приторцевой области. Соответствующее ему относительное расширение центральной части и уменьшение давления в ней могут не приниматься во внимание, если крайняя область мала по сравнению с длиной линзы.

Приведенное рассмотрение давлений при прохождении тока по литию в абсолютно жесткой конструкции определяет верхнюю границу давлений, получаемых в реальных конструкциях. Действительно, в реальных случаях всегда имеются упругие элементы, включая значительный объем лития в области токоподводов с существенно меньшим нагревом, принимающие на себя тепловое расширение рабочего объема лития, что приводит в зависимости от конструктивного варианта к более или менее заметному снижению давления в системе.

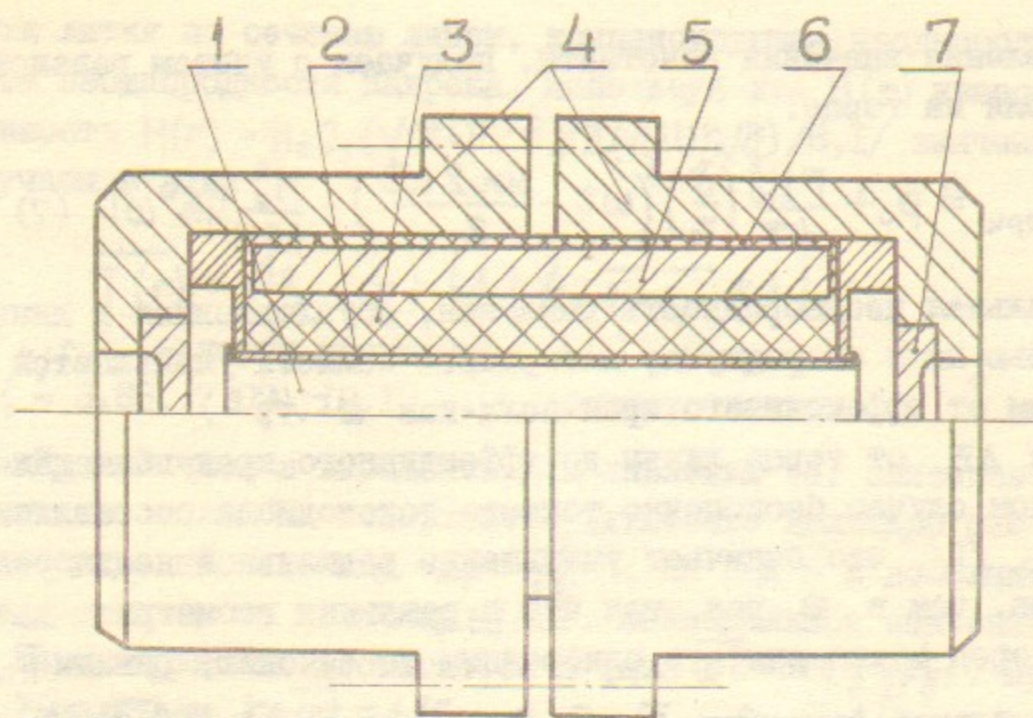


рис.1. Схематический чертеж линзы с жестким обжатием титанового цилиндра. 1 - рабочий объем лития, 2 - титановый цилиндр, 3 - трубка из бериллиевой керамики, 4 - токоподводы, 5 - стальной силовой цилиндр, 6 - изолятор, 7 - бериллиевые окна.

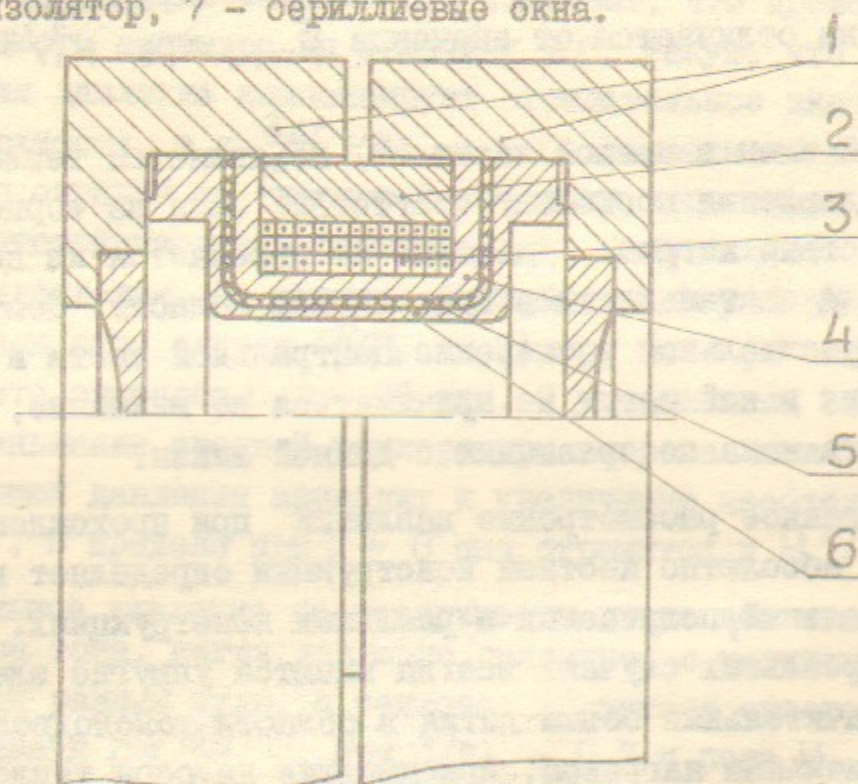


рис.2. Схематический чертеж линзы для систем электрон-позитронной конверсии. 1 - токоподводы, 2 - опорный стальной цилиндр, разрезанный на две половины, 3 - проволочный бандаж, 4 - разрезной медный вкладыш, 5 - изолятор, 6 - титановый контейнер.

В первых конструкциях линз, на которых была показана возможность получения магнитных полей более 100 кЭ на литиевых стержнях /10/, титановый цилиндр запрессовывался в толстостенную трубку из бериллиевой керамики, которая через титановую оболочку воспринимала давление теплового расширения лития и обеспечивала радиальную жесткость системы (рис.1). Торцевые титановые фланцы приваривались к центральной трубке и в месте сварки могли возникать концентрации механических напряжений, что определяло надежность титанового контейнера. В таком варианте конструкции обеспечивается достаточная прочность системы, однако затруднен отвод выделяемой в литии мощности в поперечном направлении и при частоте следования импульсов порядка герца он может применяться только для линз с длиной порядка диаметра, когда теплоотвод в продольном направлении на водоохлаждаемые торцы обеспечивает необходимую скорость охлаждения. В линзах, применяемых для систем электрон-позитронной конверсии /6,7/ при отношении длины к диаметру $l/d \approx 1.5+2$ использовались конструкции с теплоотводом на торцы (рис.2). Титановый контейнер вытачивался из цельковой заготовки с соответствующим плавным переходом на торцевые фланцы, исключаям концентрацию напряжений в месте заделки. Жесткое радиальное обжатие центрального цилиндра осуществлялось изолированным от титана и разрезанным на две части в осевом направлении медным вкладышем, имеющим форму катушки, на который наматывался бандаж из тонкой стальной проволоки. Осевая жесткость системы обеспечивается стальным цилиндрическим вкладышем, на который опираются щеки катушки. В этих конструкциях при $d = 0.8+1$ см и поле 100 кЭ частота следования импульсов может составлять несколько герц. Такие линзы много лет надежно эксплуатируются в системах электрон-позитронной конверсии комплекса ВЭП-2.

При разработке линз для фокусировки частиц с энергией в несколько ГэВ и выше, в частности линз для систем протон-антипротонной конверсии /3/, их длина при той же величине поля увеличивается до 10+15 см при $l/d \approx 10$, так что теплоотвод на торцы, имеющий характерное время $\tau_z \approx \frac{16l^2}{\pi^2} (c\gamma/\lambda)_{Li}$ /9/ составляет ≈ 10 сек и не может обеспечить эффективное охлаждение линзы. Это потребовало поиска новых конструктивных вариантов, позволяющих решить проблему теплоотвода из центральной части линзы

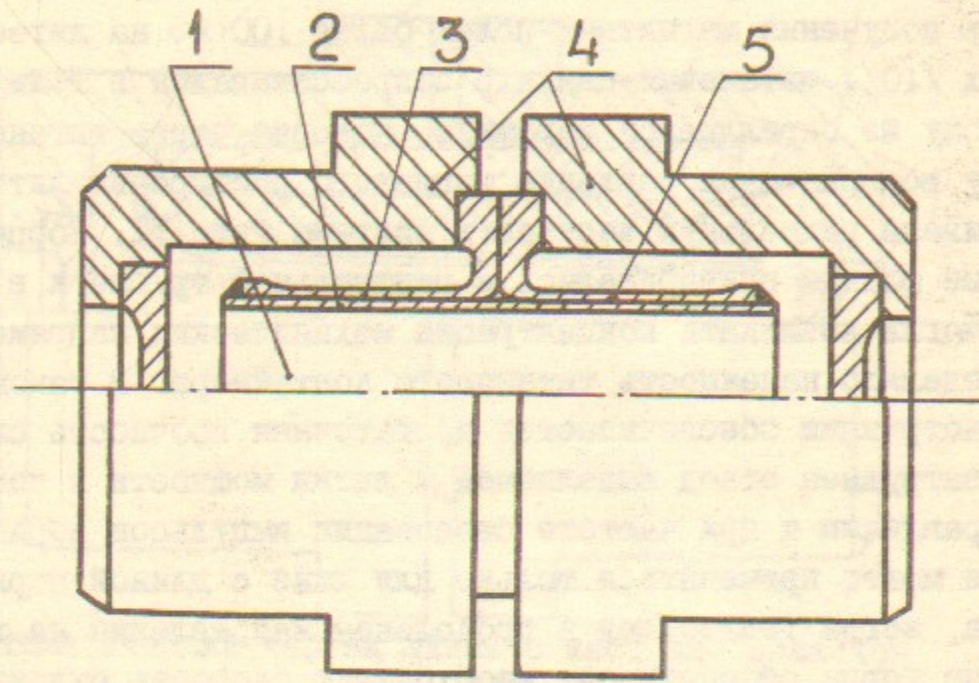


Рис.3. Схематический чертеж линзы с тонкостенным титановым контейнером. 1 - рабочий объем лития, 2 - внутренний титановый цилиндр, 3 - наружный титановый цилиндр, 4 - токоподводы, 5 - изоляционный слой.

В одном из таких вариантов /II/ титановый цилиндр выполнялся в виде двух тонкостенных трубок с $\Delta = 0.5$ мм, плотно надетых друг на друга, изолированных между собой посредством оксидирования поверхностей касания и сваренных на торцах (рис.3). Наружная трубка посредине разрывается и переходит на два фланца, изолированные друг от друга и уплотняемые на токоподводящие цилиндры. Теплоотвод в радиальном направлении на водоохлаждаемые токоподводы осуществляется через две титановые стенки и разделяющий их слой изоляции и цилиндрический слой лития в области токоподводов, которые воспринимают также и усилия от теплового расширения лития. При соответствующей обработке технологии сварки титановых цилиндров такая конструкция может обеспечить достаточную надежность линзы, однако она не получила развития из-за перехода к варианту с более эффективным охлаждением, которое обеспечивалось непосредственным омыванием водой наружной поверхности титанового цилиндра. В этой конструкции (рис.4) между внутренней (1) и наружной (4) трубками двухстенного цилиндра делается зазор, в котором помещается дополнительная цилиндрическая разделительная стенка (8), позволяющая пропускать воду непосредственно по поверхности

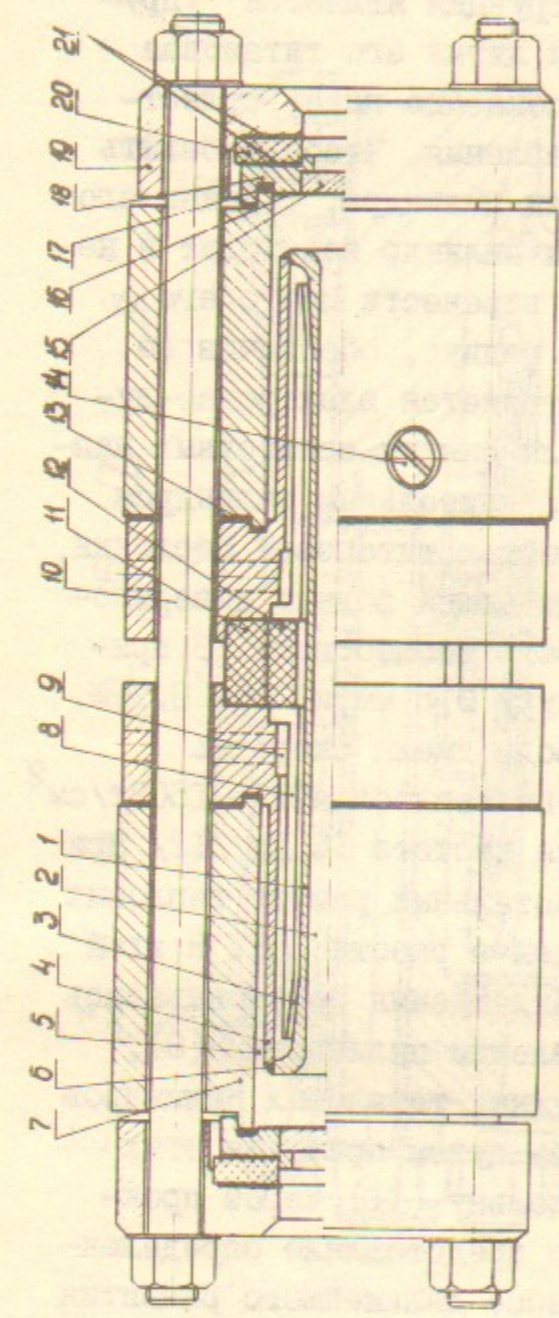


Рис.4. Рабочий вариант линзы с эффективной системой водяного охлаждения. 1 - внутренний титановый цилиндр, 2 - рабочий объем лития, 3 - разделительный зазор системы водяного охлаждения, 4 - наружный титановый цилиндр, 5 - заполненный литием зазор в области токоподводов, 6 - место сварки внутреннего и наружного цилиндров, 7 - токоподводящие цилиндры, 8 - разделительная оболочка системы водяного охлаждения, 9 - места подвода воды, 10 - стяжные шпильки, 11 - керамическое кольцо, 12 - разрезанное керамическое кольцо, 13 - свинцовое уплотнение, 14 - закрытое пробкой отверстие для заливки лития, 15 - бериллиевое окно, 16 - разделительная титановая фольга, 17 - свинцовое уплотнение, 18 - торцевой фланец, 19 - изолированный прижимной торцевой фланец, 20 - керамический изолятор, 21 - демпфирующие свинцовые прокладки.

внутреннего цилиндра. Толщина стенки цилиндра Δ выбирается такой, чтобы при максимальном давлении в рабочей части линзы возникающие в ней напряжения $\sigma = pr_c/\Delta$ не превышали допустимой величины напряжения упругой деформации, составляющей для титана в режиме динамических нагрузок $\sigma \sim 3000 \text{ кг/см}^2$. В отличие от предыдущих вариантов такая конструкция является "упругой", поскольку при тепловом расширении лития его титановая оболочка упруго расширяется, что, как показано ниже, существенно снижает амплитуду возникающего давления. Чтобы избежать концентрации напряжений в местах заделки цилиндра, толщина его стенки на концах плавно увеличивается и цилиндр переходит в небольшие торцевые фланцы. Это позволяет перенести место его сварки с внешним цилиндром на наружный радиус, обеспечив ее максимальную надежность. Сварка осуществляется электронно-лучевым способом с последующим отжигом для снятия остаточных напряжений. Создавая малый зазор между разделительным цилиндром водяного охлаждения и наружной поверхностью титановой оболочки, можно обеспечить высокую скорость охлаждающей воды у поверхности оболочки и максимальную эффективность теплоотвода. В приведенной на рис.4 линзе, имеющей апертуру $\varnothing 5 \text{ мм}$ и $\Delta = 0.7 \text{ мм}$, этот зазор составлял 0.5 мм , так что вода имела скорость $\sim 10 \text{ м/сек}$, что обеспечивало коэффициент теплоотдачи $\sim 150 \text{ Вт/см}^2$ и при поле 100 кЭ позволило работать на частоте 15 Гц /12/ при температуре в центре линзы $\sim 180^\circ\text{C}$. Детальный расчет тепловых режимов в подобных конструкциях приведен в работе /9/. В этой линзе разделительная стенка системы охлаждения образовывалась двумя разрезанными в продольном направлении цилиндрами (8), центрируемыми в расточках фланцев наружных титановых цилиндров (4), и водяная система герметизировалась путем прижатия этих фланцев к изолирующему керамическому кольцу (II) через прокладку из отожженной медной фольги, что представляло определенную технологическую сложность. В процессе дальнейшего развития конструкции при переходе к линзам увеличенной апертуры ($\varnothing 2 \text{ см}$) система охлаждения была изменена (рис.5) – разделительный цилиндр (4) в новом варианте делается двухслойным из двух тонкостенных титановых трубок, имеющих оксидированные поверхности касания и сваренных на концах. Как и основной силовой цилиндр, наружная трубка имеет посередине разрез и переходит во фланцы (5), привариваемые к фланцам основных наружных цилиндров (3),

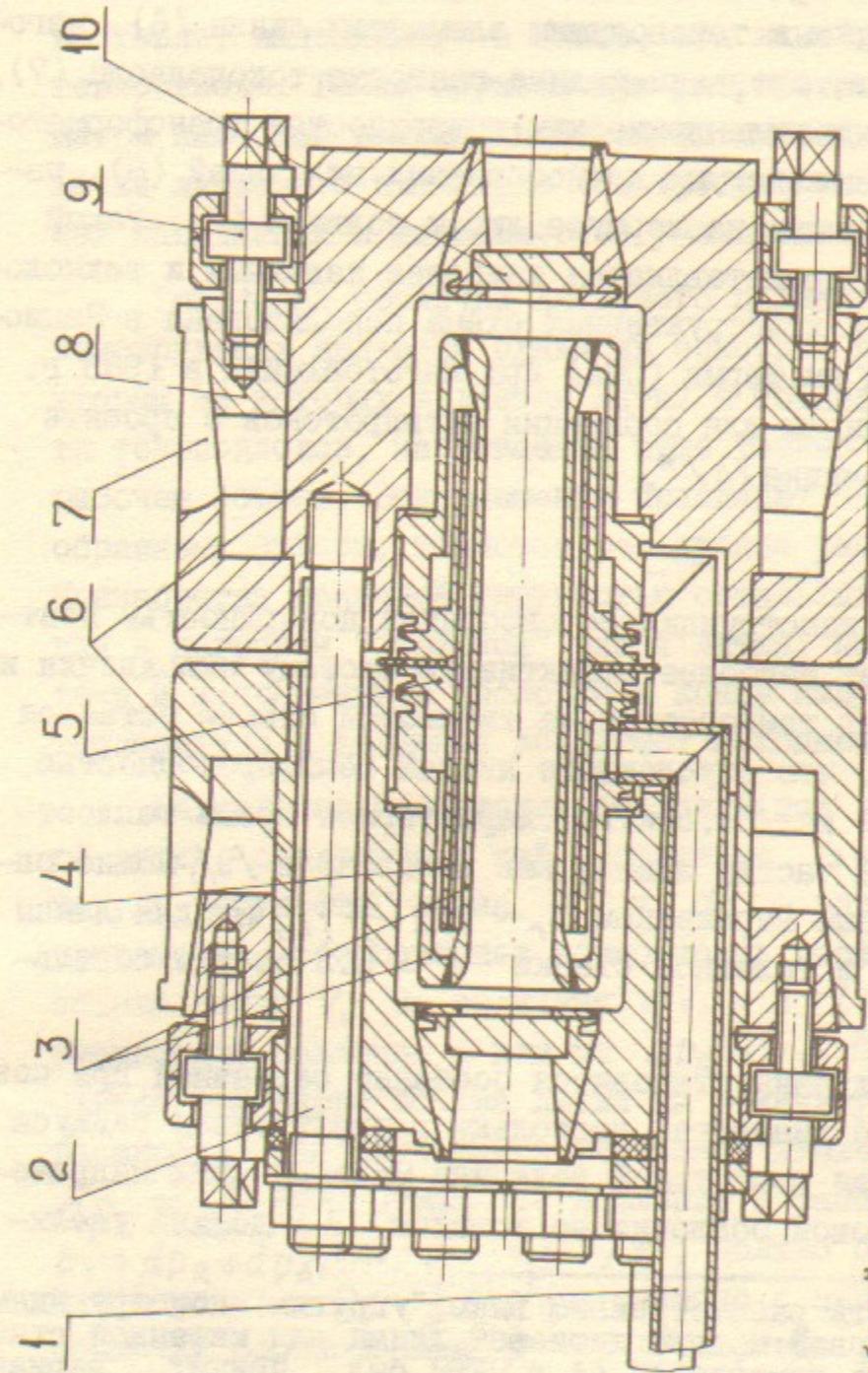


Рис.5. Рабочий вариант линзы большого диаметра.
1 - трубки подвода воды, 2 - стяжные болты, 3 - внутренний и наружный основные титановые цилиндры, 4 - двухслойный разделительный цилиндр системы водяного охлаждения, 5 - фланец разделительного цилиндра, 6 - основные токоподводящие цилиндры, 7 - цапговые токоподводы, 8 - клинообразные вкладыши, 9 - прижимные болты цапговых контактов, 10 - бериллиевые вкладыши, отделенные от лития титановой фольгой.

ограничивающих объем лития. Таким образом, разделительный цилиндр также отвечает на себя небольшую (меньше процента) часть тока, но водяная система оказывается полностью сварной, в ней исключены уплотняемые соединения и открытые поверхности изоляторов, омываемые водой. Для повышения надежности контактов на токи более 0.5 мА в местах соединения с тороидальным согласующим трансформатором к тоководящим элементам линзы (6), изготавливаемым из стали, припаяны медные цанговые токоподводы (7), которые прижимаются к цилиндрическим поверхностям трансформатора посредством 12 независимых клинообразных вкладышей (8), перемещаемых закрепленными на корпусе линзы болтами (9). Такой вариант конструкции представляется наиболее надежным и технологичным. Именно такая конструктивная схема использована в Национальной лаборатории им. Ферми (США) при изготовлении в 1983 г. рабочего варианта линзы для собирания антипротонов в проекте антипротонного источника /4/ *.

Рассмотренная конструкция со свободной поверхностью центральной трубки имеет наиболее эффективную систему охлаждения и тем не менее перепад температуры на титановой стенке остается достаточно большим, что обусловлено низкой теплопроводностью титана $\lambda_{Ti} = 0.017$ кал/(см.сек.гр.). Характерное время теплоотвода из центральной части линзы, как показано в /9/, можно определить приближенным выражением $\tau_r \sim r_0 \Delta \left(\frac{c\gamma}{\lambda} \right)_{Li}$, что для линзы с диаметром ϕ 2 см и толщиной стенки $\Delta = 0.2$ см уже составляет ~ 2.5 сек.

Проблема охлаждения становится особенно серьезной при создании линз большего диаметра, поскольку с увеличением радиуса линзы для сохранения допустимой величины механических напряжений в стенке титановой оболочки ее толщина Δ должна увели-

* В противоположность рассмотренным выше "упругим" конструкциям, при разработке первой модели литиевой линзы для мишенной станции антипротонного накопителя АА в ЦЕРН был принят вариант "жесткой" конструкции, в которой между изготавливаемой из нержавеющей стали центральной трубкой, ограничивающей литиевый стержень, и цилиндрическими поверхностями токоподводов размещается большое количество керамических шаров с диаметром 6 мм, создающих жесткую опору цилиндра во многих точках касания шаров с его наружной поверхностью /13/. К сожалению, в настоящее время еще нет сведений о силовых испытаниях этой линзы, которые дадут интересную информацию о надежности такой конструкции.

чиваться пропорционально радиусу и, следовательно, квадратично увеличивается и характерное время охлаждения. Перепад температуры на титановой стенке, пропорциональный ее толщине Δ и тепловому потоку q кал/см, также увеличивается квадратично с радиусом линзы из-за линейного увеличения как толщины, так и теплового потока, обусловленного квадратичным ростом количества тепла, выделяемого в линзе, при линейном росте поверхности теплоотвода. Таким образом при разработке линз большого диаметра наиболее важным является оптимизация толщины стенки оболочки литиевого цилиндра, что требует анализа возникающих в ней напряжений и возможностей уменьшения ее толщины.

Титановая оболочка литиевого цилиндра в рассмотренных конструкциях является одним из основных упругих элементов, вторым из которых является литий в торцевой области и в области токоподводов, нагреваемый существенно меньше, чем литий в рабочем объеме. Эти элементы принимают на себя, подобно своеобразному буферу, тепловое расширение рабочего объема лития. Пренебрегая конечной упругостью остальных элементов конструкции и нагревом "буферной" части лития, найдем давление в системе и напряжение в оболочке в конце импульса тока, когда температура и давление достигают максимальных значений.

Радиальное растяжение оболочки под давлением разогретого лития, создающее в ней напряжение $\sigma = E \frac{dR}{R}$, где E - модуль упругости титана, R и dR - радиус оболочки и его приращение, обеспечивает возможность расширения рабочего объема лития V_0 на величину $dV_R = 2\pi l R dR$, что приводит к уменьшению давления в нем на $dp_R = -\frac{1}{\chi} \frac{dV_R}{V_0} = -\frac{2}{\chi} \frac{dR}{R}$. Сжатие буферного объема лития на величину dV_δ и равное ему расширение рабочего также уменьшает давление в последнем на $dp_\delta = -\frac{1}{\chi} \frac{dV_\delta}{V_0}$. Суммарное давление в рабочем объеме $P = P_T + dp_R + dp_\delta$, где $P_T = \alpha T / \chi$, должно быть равно давлению в буферном, $P_\delta = \frac{1}{\chi} \frac{dV_\delta}{V_\delta}$ и связано с напряжением в стенке оболочки соотношением $P = \sigma \Delta / R$, где Δ - толщина оболочки. Решение получающейся системы уравнений

$$\sigma = E \frac{dR}{R} = P R / \Delta$$

$$P = \frac{1}{\chi} \frac{dV_\delta}{V_\delta} = P_T - \frac{1}{\chi} \left(2 \frac{dR}{R} + \frac{dV_\delta}{V_\delta} \right)$$

определяет значение σ в зависимости от температуры нагрева и конструктивных параметров линзы как

$$\sigma = \frac{\alpha T}{\chi_{Li} \frac{\Delta}{R} \left(1 + \frac{V_f}{V_0}\right) + \frac{2}{E_{Ti}}} \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что с уменьшением отношения $\frac{\Delta}{R}$ ниже значения, определяемого условием $\frac{\Delta}{R} \left(1 + \frac{V_f}{V_0}\right) \cong \frac{2}{\chi_{Li} E_{Ti}}$, напряжение в титановой оболочке перестает зависеть от ее толщины. Это позволяет уменьшить Δ и время охлаждения вплоть до значений, определяемых достижимым теплосъемом с охлаждаемой водой поверхности. Величина напряжения при этом, равная своему максимальному для заданного T значению $\sigma_{max} = \frac{\alpha T E}{2}$, зависит только от температуры, которая таким образом оказывается ограниченной предельным значением напряжения $T \leq \frac{2}{\alpha E} \sigma_{пред}$. Если принять для $\sigma_{пред}$ в титане при динамическом режиме нагрева значение $\sigma_{пред} \cong 3000 \text{ кг/см}^2$, получим предельную допустимую температуру нагрева $T \leq 35^\circ$ и соответствующую ей амплитуду магнитного поля $H \leq 75 \text{ кЭ}$ при $\delta/r_0 \sim 0.7$. Использование сплавов титана или других материалов с более высоким значением $\sigma_{пред}$ может повысить допустимое значение магнитного поля.

Таким образом в "упругих" конструкциях с тонкостенной внутренней трубкой может быть получена величина магнитного поля, в ряде случаев удовлетворяющая требованиям конкретной физической задачи. В частности, в работе /2/ для формирования нейтринных пучков с широким спектром рассматривается применение линз большого диаметра ($2R \cong 4+5 \text{ см}$) с полями, $\leq 100 \text{ кЭ}$, что может быть достигнуто развитием таких конструкций. "Упругие" конструкции линз с тонкостенными титановыми оболочками ($\Delta/R < 0.1$) имеют еще и то преимущество, что в них сводится к минимуму абсолютная величина давления от теплового расширения лития $p = \sigma \Delta/R$, что повышает надежность всей системы. В частности, снижение продольного усилия от давления на торцы особенно важно для линз большого диаметра. Следует отметить, что проведенное рассмотрение выявляет дополнительное преимущество титана — максимальные допустимые напряжения при малом модуле упругости — перед другими материалами, в том числе, нержавеющей сталью, имеющей в два раза больший модуль упругости.

При создании линз с большими полями толщина оболочки оказывается ограниченной снизу. Так, при поле 100 кЭ ($T = 60^\circ$) для обеспечения напряжения, не превышающего $\sigma = 3000 \text{ атм}$, толщина оболочки при близком к нулю буферном объеме должна составлять не менее $\Delta = 0.2R$, т.е. $\Delta = 2 \text{ мм}$ при $R = 1 \text{ см}$.

Эффективным средством уменьшения напряжений в стенке титановой оболочки, как следует из выражения (8), может быть увеличение полного объема лития в системе по сравнению с объемом нагреваемой части линзы, т.е. создание в области токоподводов специального буферного объема лития с таким сечением, которое практически исключало бы его нагрев при прохождении импульса тока. Путем некоторого изменения конструкции линзы этот объем может быть сделан существенно большим рабочего объема. Однако, в реальной задаче при этом возникает вопрос о временах установления давления в буферном объеме и его релаксации по окончании импульса нагрева. До тех пор, пока деформация в литии не превышает предела упругости, эти времена по порядку величины определяются временем распространения звука во всем объеме лития, когда же деформация переходит в область пластической времена ее релаксации не могут быть оценены с какой-либо определенностью. Для изучения эффективности работы буферного объема были проведены экспериментальные исследования на модели линзы /14/.

Модель представляла собой линзу без водяного охлаждения с апертурой диаметром 19 мм , толщиной оболочки $\Delta = 2 \text{ мм}$ и длиной 10 см с возможностью подсоединения дополнительных объемов лития и измерения и регулировки начального статического давления p_n . Наблюдение скачков давления в результате импульсного нагрева и их последующей релаксации осуществлялось при помощи тензодатчика, приклеенного на наружную поверхность титанового цилиндра. Калибровка датчика производилась до заполнения системы литием путем подачи в нее жидкости с давлением в пределах до 1000 атм , при различной температуре. Контроль температуры в центре линзы осуществлялся коаксиальной термопарой, вводимой в литий через один из торцовых фланцев. Схематический чертеж различных вариантов моделей приведен на рис.6.

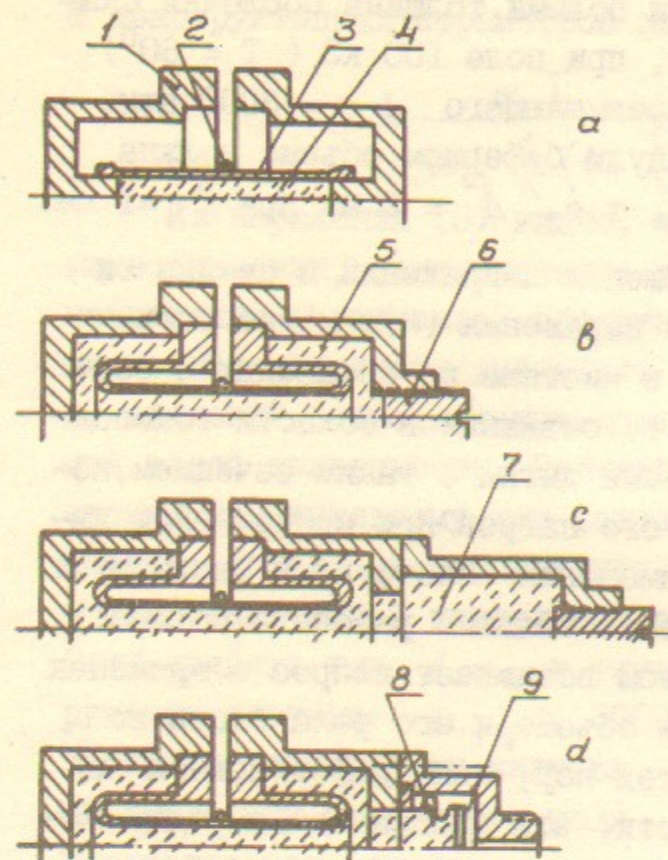


Рис.6. Схематический чертеж моделей линз

- 1 - токоподводы,
- 2 - тензодатчик,
- 3 - центральная трубка
- 4 - рабочий объем лития,
- 5 - буферный объем лития,
- 6 - пробка регулировки давления в литии,
- 7 - дополнительный буферный объем
- 8 - сильфон с литием,
- 9 - масляный объем.

В варианте "а" объем линзы ограничивался в цилиндрической части торцевыми пробками, через которые к литию подводился ток, т.е. осуществлялась геометрия без буферного объема, $V_{\text{б}} = 0$. Зависимость амплитуды скачка давления от температуры нагрева оказалась равной $p = 9.7 T$, что находится в хорошем согласии с расчетной по формуле (8) для такой геометрии. Спад давления после импульса совпадал с кривой остывания лития, форма которой определялась сравнительно быстрым (~ 2 сек) перераспределением тепла между литием и холодной титановой оболочкой и более медленным (~ 10 сек) отводом на торцы (рис.7-1).

В варианте "в" геометрия отвечала рабочей геометрии линзы. Весь объем лития, включая области токоподводов составлял $\sim 100 \text{ см}^3$ при объеме цилиндрической части $\sim 30 \text{ см}^3$. На одном из торцов системы имелось отверстие диаметром 20 мм со ввинченной пробкой, перемещением которой регулировалось начальное статическое давление P_H , измеряемое калиброванным тензодатчиком на поверхности титановой трубки. Форма кривой релаксации давления в этой геометрии существенно отличалась

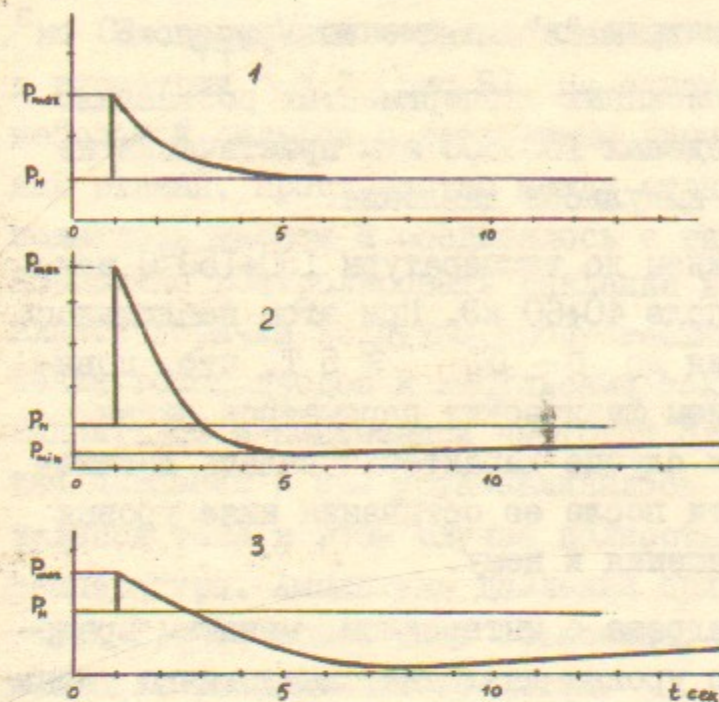


Рис.7. Сигналы с тензодатчика при различных режимах работы линзы.

от кривой остывания прежде всего наличием отрицательного (относительно уровня P_H) хвоста с медленным восстановлением до уровня P_H за время в несколько десятков секунд, существенно большее времени остывания (рис.7-2). Такая форма импульса свидетельствует о большом времени τ_p релаксации деформации лития в буферном объеме. Быстрое (по сравнению с τ_p) остывание рабочего объема лития и уменьшение тепловой составляющей P_T в нем при практически неизменной разгрузочной (< 0) упругой составляющей P_X , обусловленной перераспределением лития из рабочей части в буфер в процессе нагрева, приводит к понижению давления в рабочем объеме после его остывания ниже начального уровня с восстановлением до уровня P_H за время $\sim \tau_p$. Амплитуда скачка давления составляла в этой геометрии $P - P_H = 6.5 T$. Это согласуется с выражением (8) если принять для объема нагреваемого лития значение $V_{\text{эфф}} \cong 50 \text{ см}^3$, в ~ 1.7 раз большее объема цилиндрической части линзы, что по оценкам с учетом нагрева лития в области токоподводов вблизи рабочей части близко к действительности.

Подключение к линзе дополнительного буферного объема величиной 100 см^3 (геометрия "с" рис.6) привело к дальнейшему снижению амплитуды скачка до $P - P_H = 4 T$ и увеличению амплитуды отрицательного хвоста (рис.7-3). Значение $P - P_H$ хорошо согласуется с выражением (8) при подстановке в качестве V_0

значения, принятого для геометрии "в", а именно $V_{эфф} = 50 \text{ см}^3$.

Начальное давление в описанных экспериментах составляло 200 атм. Его изменение в пределах 100+500 атм практически не влияло на амплитуду и форму импульсов давления.

Влияние нагрева всей линзы до температуры 130+150°C изучалось в геометрии "в" при поле 40+60 кЭ. При этом наблюдалось уменьшение амплитуды давления до $p - p_n \cong 5 \text{ Т}$, что, по видимому, объяснялось изменением физических параметров лития. Релаксация давления и в этом случае характеризовалась понижением давления в рабочей части после ее остывания ниже уровня p_n с большим временем возвращения к нему.

Повторение импульсов нагрева с интервалом, меньшим времени восстановления начального уровня давления, аналогично уменьшению p_n , что суммируясь от импульса к импульсу приведет в итоге к снижению его до нуля. В последующих импульсах произойдет образование пустот в литии, ведущих к неоднородности литиевого проводника — локальному уменьшению его сечения. Возникающая при этом продольная неоднородность магнитного поля усугубляет это уменьшение вплоть до разрыва литиевого стержня, локального перегрева титановой оболочки и ее разрушения. Имитация такой ситуации путем снижения до нуля начального давления действительно приводила к разрушению титановой трубки при поле ~ 100 кЭ, выражающемуся в появлении продольных трещин в ее центральной части при сохранении наружного диаметра. Такой вид разрушения вместо пластической деформации трубки, которая наблюдалась при повышении статического давления в системе выше 1000 атм свидетельствует о взрывном характере процесса, развивающегося в течение импульса тока ($\tau \sim 1 \cdot 10^{-3}$ сек).

Таким образом, использование буферного объема, хотя и приводит к ожидаемому результату — снижению амплитуды импульсного давления от теплового расширения лития, ограничено большими временами релаксации пластической деформации в твердом литии, что не позволяет иметь достаточно высокую частоту повторения импульсов. Это ограничение снимается, если литий, заполняющий линзу и буферный объем, находится в жидком, расплавленном состоянии. В этом случае времена релаксации определяются временами распространения звука во всем объеме лития, а частота следования импульсов ограничивается только временем отвода тепла,

выделяющегося за импульс.

Эксперименты с расплавленным литием проводились на модели в геометрии "d" (рис.6). На одном торце к линзе подсоединялся небольшой сиффон с заваренным дном, на который надевался стальной стакан. Пространство между стенками стакана и сиффоном заполнялось маслом и соединялось с гидравлическим насосом, что позволяло контролировать давление в литии. Нагрев линзы осуществлялся горячим воздухом, пропускаемым по трубкам водяного охлаждения токоподводов и импульсами тока через линзу с уменьшенной амплитудой и повышенной частотой следования. После плавления лития давление в нем устанавливалось на уровне ~ 50 атм. Форма импульсов тока в этом случае полностью определялась изменением температуры. Амплитуда давления при этом уменьшалась до $p - p_n \cong$

1.2 Т , что может быть объяснено, в основном, увеличением сжимаемости расплавленного лития.

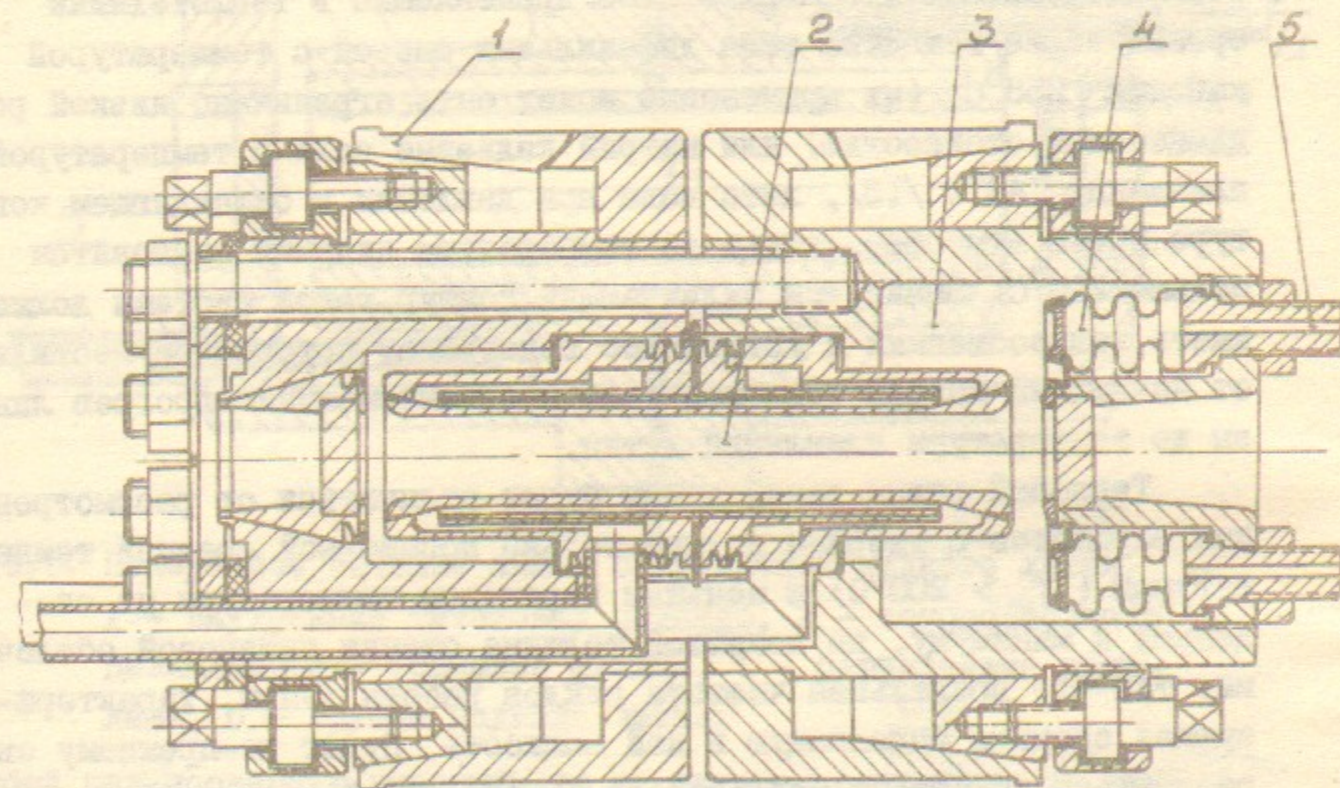


Рис.8. Поперечное сечение линзы с жидким литием.

- 1 — цанговые токоподводы, 2 — рабочий объем лития,
- 3 — буферный объем лития, 4 — упругий сиффонный элемент,
- 5 — вводы сиффонного элемента.

Конструкция одного из возможных рабочих вариантов линзы с жидким литием приведена на рис.8. Она представляет собой доработку рассмотренной выше конструкции (рис.5), которая вырази-

лась в создании на одном из торцов линзы большого буферного объема (3) ($V_b \sim 200 \text{ см}^3$) и размещением в нем заполненного жидкостью упругого элемента (4), выполненного из двух сильфонов с заваренными торцами, и закрепленного на фланце линзы посредством двух вводов (5). Через один из вводов система длиной тонкой трубкой соединяется с насосом и манометром, что позволяет контролировать и регулировать давление в жидком литии в процессе плавления; через другой вводится термопара для контроля средней температуры. За счет значительного буферного объема и существенно большей сжимаемости жидкого лития давление от его теплового расширения в такой конструкции сводится к минимуму ($p/T < 1$). Однако снижение механических напряжений в линзе достигается ценой существенного усложнения системы отвода мощности, выделяемой в литии, который в данном случае должен осуществляться теплоносителем со средней температурой $200+220^\circ\text{C}$. Роль таких теплоносителей могут играть либо применяемые в теплотехнике органические вещества типа дифенильных смесей с температурой кипения 258°C (их применение может быть ограничено низкой радиационной стойкостью) или натрий калиевые соли с температурой плавления 148°C /15/, либо вода при давлении в охлаждающем контуре $20+25$ атмосфер, когда ее температура кипения становится большей 200°C . Замкнутый охлаждающий контур такой системы должен иметь теплообменник и устройство подогрева, которое осуществляет начальный нагрев теплоносителя и одновременный прогрев линзы до температуры плавления лития.

Тепловой режим такой линзы будет отличаться от рассмотренных вариантов с твердым литием только повышенной средней температурой ($T_{cp} > 200^\circ\text{C}$) и меньшим перепадом температуры на сведенной к минимуму, но конечной толщине стенки титановой оболочки, так что предельная частота циклов работы линзы, характеризующая среднюю выделяемую в ней мощность, будет по-прежнему определяться условиями теплоотвода — допустимой величиной теплового потока на охлаждаемой поверхности и градиентом в радиальном распределении температуры в литии. Значительные градиенты температуры в литии при напряженных тепловых режимах приводят к перераспределению его проводимости и соответственно плотности тока по сечению, что ограничено допустимыми абберациями линзы.

Кардинальным изменением режима работы линзы является переход к конструкциям с прокачкой жидкого лития через систему по замкнутому контуру, включающему теплообменник /16/. Переход от конвективного теплообмена при охлаждении к механическому удалению из системы нагреваемой части лития снимает принципиальные ограничения частоты следования рабочих циклов, которые определяются теперь только мощностью системы прокачки, и позволяет существенно упростить конструкцию исключением из нее системы водяного охлаждения. В новом варианте (рис.9) ликвидированы уплотняемые соединения в литиевом объеме и линза представляет

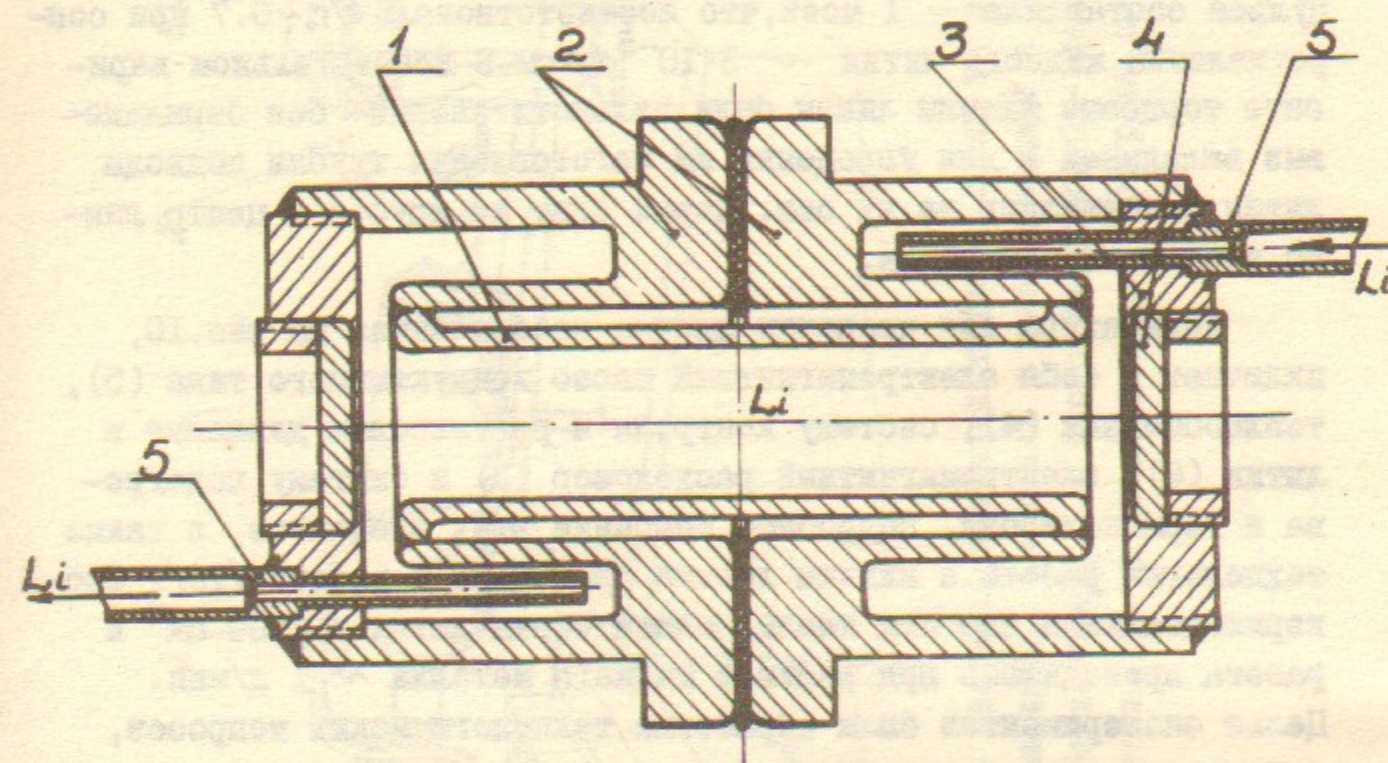


Рис.9. Поперечное сечение линзы с прокачкой жидкого лития.

1 — внутренний титановый цилиндр, 2 — токоподводящие цилиндры, 3 — торцевые фланцы, 4 — бериллиевые вкладки, 5 — трубки подвода лития.

собой цельносварную конструкцию из титана, состоящую из центральной трубки (1) и двух приваренных к ней токоподводящих цилиндров (2) с глубокими кольцевыми проточками для ввода и растекания жидкого лития. На торцах цилиндров привинчены и затем приварены для герметизации два торцевых фланца (3) с бериллиевыми вкладышами, отделенными от лития миллиметровыми титановыми стенками. Жидкий литий вводится в линзу по трубкам (5), проходящим через торцевые фланцы в полости токоподводящих цилиндров. Толщина стенки центральной трубки, которая в преж-

нем варианте определяла время охлаждения линзы, теперь ограничивается только допустимым шунтированием тока, текущего по литиевому цилиндру, и для повышения надежности может быть увеличена ценой незначительного усложнения импульсного генератора. Эксперименты с жидким литием проводились на линзе с апертурой 3 см, толщиной стенки внутренней трубки 3 мм и длиной 14 см, на установке, позволяющей запитывать ее импульсами тока амплитудой до 500 кА, применяемой ранее для испытания твердолитиевых линз диаметром до 2 см, так что максимальное поле на поверхности лития в этих экспериментах достигало 65 кЭ. Длительность импульса составляла ~ 1 мсек, что соответствовало $\delta/r_0 \sim 0.7$ при сопротивлении жидкого лития $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ ом·см. В испытательном варианте торцевые фланцы линзы были цельнотитановые без бериллиевых вкладышей и для упрощения их изготовления трубки подвода лития размещались на их оси. Через одну из трубок в центр линзы вводилась термопара.

Аппаратура для прокачки лития, изображенная на рис.10, включает в себя электромагнитный насос кондуктивного типа (5), теплообменник (4), систему контроля и регулировки давления в литии (6), электромагнитный расходомер (3) и систему подогрева и термоконтроля. Подробное описание этих элементов, а также технологии работы с жидким литием приведены в работе [16]. Экспериментальная система имела полный объем лития ~ 500 см³ и работа проводилась при расходе жидкого металла ~ 1 л/мин. Целью экспериментов была отработка технологических вопросов, связанных с использованием жидкого лития, и испытанием работоспособности элементов системы под действием гидравлических ударов в жидком литии от давления магнитного поля и импульсного нагрева рабочей части линзы.

В настоящее время подготавливается экспериментальная установка для испытания жидкометаллических линз большого диаметра, которые будут запитываться импульсами тока до 1 МА от радиационно-стойкого тороидального трансформатора [14] с использованием аппаратуры, наиболее полно отвечающей требованиям работы в радиационных условиях мишеней станций с интенсивными протонными пучками. Для этого вся аппаратура прокачки жидкого лития, которая должна находиться за радиационной защитой, будет отделена от линзы с трансформатором магистральными

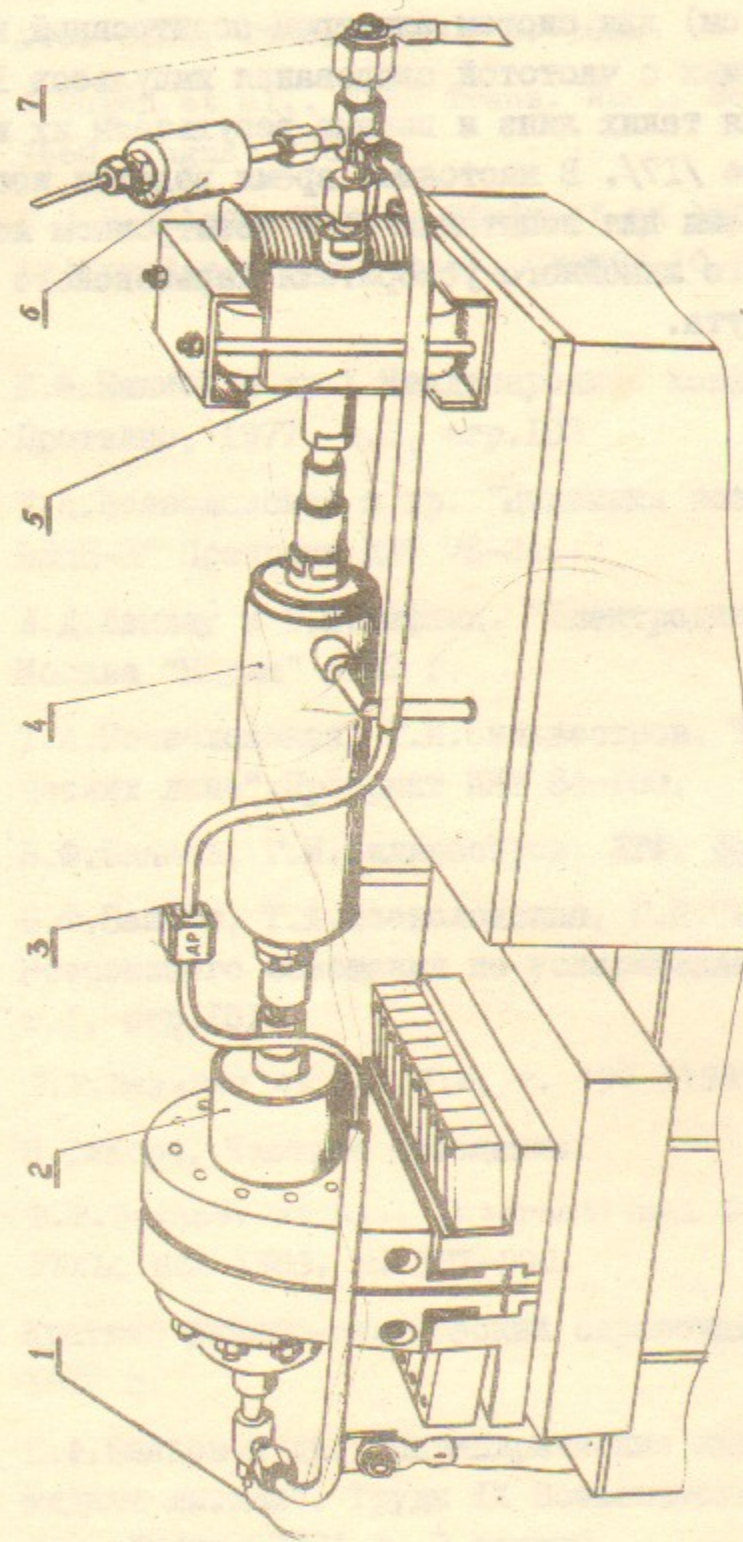


Рис.10. Цилиндрическая линза с системой прокачки жидкого лития на экспериментальной стенде. 1 - вывод термопары, 2 - линза с токоподводами и согласующим трансформатором, 3 - расходомер, 4 - теплообменник, 5 - насос, 6 - устройство контроля давления в литии, 7 - подвода тока для подогрева соединительных трубок.

соединительными трубками длиной ~ 4 м с размещением на этом расстоянии всей контрольно-измерительной и обслуживающей аппаратуры.

Вторым направлением использования прокачиваемого жидкого лития является разработка коротких линз малого диаметра ($l \approx 1$ см, $d \approx 1$ см) для систем электрон-позитронной конверсии на низких энергиях с частотой следования импульсов 100 Гц и более. Конструкция таких линз и первые результаты их испытаний описаны в работе /17/. В настоящее время ведется изготовление подобной системы для испытания ее в позитронном источнике ДУЭ-2 - 2-х Гэвного линейного ускорителя Харьковского физико-технического института.

Л и т е р а т у р а

1. Т.А.Всеволожская и др. ЖТФ, 45, 2494 (1975).
2. В.Н.Гаркуша и др. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям. Дубна, 1978 г. т.2, стр.162.
3. В.Ф.Баянов et al. Proc. of 11 Intern. Conf. on High Energy Acc. CERN, Geneva 1980, p. 362.
4. G.Dugan et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-30, N°4, 3660 (August 1983).
5. E.J.N.Wilson "Design Study of an Antiproton Collector for the Antiproton Accumulator". CERN83-10 PSD 23 October 1983.
6. Б.Ф.Баянов и др. X Международная конференция по ускорителям Протвино, 1977, т. II, стр.103
7. Т.А.Всеволожская и др. "Инжекция позитронов в накопитель ВЭШ-3" Препринт ИЯФ 76-24.
8. Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц. "Электродинамика сплошных сред" Москва "Наука" 1982 г.
9. Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров. Тепловой режим цилиндрических линз". Препринт ИЯФ 84-100.
10. Б.Ф.Баянов, Г.И.Сильвестров. ЖТФ, 48, 160 (1978).
11. Б.Ф.Баянов, Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям". Дубна, 1978 г., т. I, стр.181.
12. В.Ф.Баянов et al. NIM, v. 190 (1981) p. 9-14.
13. П.Сиверс. Частное сообщение.
14. В.Ф.Баянов et al., International Conf. on High Energy Acc. FNAL, USA 1983, p. 587-590.
15. Краткий физико-технический справочник, т. III, Москва, ФМ, 1962 г.
16. Б.Ф.Баянов и др. "Цилиндрические линзы большого диаметра с жидким литием". Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям. Дубна, 1984 г. В печати.
17. Б.Ф.Баянов и др. "Многогерцевые конусные линзы с жидким литием для фокусировки позитронов низких энергий". Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям. Дубна, 1984 г. В печати.

Б.Ф.Баянов, Т.А.Всеволожская,
Г.И.Сильвестров

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И КОНСТРУКТИВНОЕ
РАЗВИТИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЛИТИЕВЫХ ЛИНЗ

Препринт
№ 84-168

Работа поступила -

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 29.12.84г. МН 06544

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.2,0 печ.л., 1,6 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 168.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90