ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Общеинститутское научно-методическое отделение
Алексахин Ю.И., Молодоженцев А.Ю.

Формирование и транспортировка релятивистского потока в пушках с полупрозрачной анодной сеткой.

г.Дубна, 1989 год.

Решается задача синтеза источников бриллюэновских потоков с компенсированными аберрациями. Один из возможных путей решения задачи рассмотрен в работе /1/, в которой сформулирован негеометризованный способ описания безвихревых релятивистских потоков и на его основе развита параксиальная теория высшего порядка.

Описанный в работах /1,2/ подход к синтезу источников сплошных осесимметричных релятивистских пучков с незамагниченным катодом дает возможность решить задачу формирования безвихревого релятивистского потока.

Как указывалось в работе /2/ одна из особенностей используемого метода состоит в привлечении ортогональной системы координат q_i, $i = 1,2,3$, не связанной, в принципе, с трубками тока, но в которой обязательно поверхность катода является одной из координатных поверхностей (выберем ее в качестве поверхности $q_1 = 0$). Через q_2 обозначим поперечную координату, отсчитываемую от оси системы ($q_2 = 0$), а через q_3 – азимут, так что соответствующая функция Ламе есть радиус: $h_3 = r(q_1, q_2)$. Функции Ламе h_i $i = 1,2,3$, должны удовлетворять всего двум соотношениям /1/, вытекающим из требований евклидовости пространства и ортогональности координатной сетки:

$$\frac{\partial}{\partial q_1}\left(\frac{1}{h_1}\frac{\partial h_2}{\partial q_1}\right) + \frac{\partial}{\partial q_2}\left(\frac{1}{h_2}\frac{\partial h_1}{\partial q_2}\right) = 0,$$

$$\left(\frac{1}{h_1}\frac{\partial h_3}{\partial q_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{h_2}\frac{\partial h_3}{\partial q_2}\right)^2 = 1. \qquad (1)$$

Координатные линии $q_1 = const$ (в том числе сечение катода) на плоскости цилиндрических координат (r, z) определяются уравнениями

$$z = q_1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n(q_1)\, r^{2n} \quad , \tag{2}$$

коэффициенты в котором, с учётом равенств $r = h_3$ и (I), выражаются через осевые значения функций Ламе и их производных:

$$a_n(q_1) = -\frac{1}{(2n)!}\left[\left(\frac{1}{\frac{\partial h_3}{\partial q_2}}\cdot\frac{\partial}{\partial q_2}\right)^{2n-1} \cdot \frac{\frac{1}{h_1}\cdot\frac{\partial h_3}{\partial q_1}}{\sqrt{1-\left(\frac{1}{h_1}\frac{\partial h_3}{\partial q_1}\right)^2}}\right]_{q_2=0} . \tag{3}$$

Следуя параксиальному методу, представим функции Ламе в виде рядов по степеням поперечной координаты q_2 :

$$h_i = \sum_{n=0}^{\infty} h_{in}(q_1)\, q_2^{2n} \quad , \qquad i = 1,2$$

$$h_3 = \sum_{n=0}^{\infty} h_{3n}(q_1)\, q_2^{2n+1} \quad . \tag{4}$$

Равенства (I) приводят к соотношениям /I/ :

$$h_{20} = h_{30} = \lambda \quad , \quad h_{11} = -\frac{1}{2}\lambda\lambda' \quad ,$$
$$h_{21} = 3h_{31} + \frac{1}{2}\lambda\lambda'^2 \quad , \quad \ldots \tag{5}$$

где штрихом обозначено дифференцирование по q_1 .

Ограничиваясь параксиальной теорией второго порядка, в рядах (4) следует удерживать по два члена; соотношения (5) уменьшают число независимых коэффициентов до двух (λ и h_{31}). Линии $q_1 = const$ в этом случае есть параболы четвертого порядка с коэффициентами

$$a_1 = -\lambda'/2\lambda \quad ,$$
$$a_2 = -\frac{1}{4\lambda^3}\left[\lambda\left(\frac{h_{31}}{\lambda}\right)' + \frac{1}{4}\lambda'(\lambda^2)''\right] \quad . \tag{6}$$

Форму катода будем задавать с помощью двух параметров - радиуса кривизны на оси R_c и фактора g, характеризующего отклонение поверхности катода от параболоида вращения ($g = 0$) и равного единице для сферы, так что

$$a_1^{(0)} = \frac{1}{2R_c} \quad , \qquad a_2^{(0)} = g\, a_1^{(0)3} \quad , \tag{7}$$

где верхний индекс "о" указывает значение величин на катоде ($q_1 = 0$), а нижний - на оси системы ($q_2 = 0$). При заданной форме катода функции $\lambda(q_1)$, $h_{31}(q_1)$ должны обеспечивать выполнение равенств $a_{1,2}\big|_{q_1\to 0} = a_{1,2}^{(0)}$, а в остальном их выбор произволен. В частности, можно потребовать $\lambda'\big|_{q_1\to\infty} = h_{31}\big|_{q_1\to\infty} = 0$. Переход от криволинейной системы координат к цилиндрической в рассматриваемом приближении осуществляются по формулам:

$$r(q_1, q_2) = h_3(q_1, q_2) = q_2\left(\lambda + h_{31} q_2^2\right) ,$$

$$z(q_1, q_2) = q_1 + a_1 \lambda^2 q_2^2 + \tag{8}$$

$$+ \lambda\left(\lambda^3 a_2 + 2 h_{31} a_1\right) q_2^4 .$$

I.2. Нормализованные переменные.

В данной работе рассматривается не только задача формирования безвихревых релятивистских потоков в катод - анодном зазоре, но и задача транспортировки пучка в трубе дрейфа, торцевая сетка которой является анодом. Сетка имеет конечную толщину, прозрачность ее будем характеризовать коэффициентом $\rho_a \leq 1$.

Основными характеристиками, используемыми для описания безвихревых потоков, являются /1/: безразмерный импульс $\vec{\eta} = \vec{p}/mc$, m - масса покоя частиц, c - скорость света ; релятивистский фактор масс $\gamma = \sqrt{1+\vec{\eta}^2}$; локальное значение плазменной частоты $\varkappa c = \sqrt{4\pi e\rho/m\gamma}$, где ρ - плотность заряда, а также функция тока

$$\psi(q_1, q_2) = \frac{1}{2}\int_0^{q_2} \eta_1 \varkappa^2 h_2 h_3 \, dq_2 \; , \tag{9}$$

равная отнесенному к $I_0 = mc^3/e$ ($I_0 = 17\,кA$ для электронов) полному току через поверхность, ограниченную контуром $q_1 = const$, $q_2 = const$.

Единицей измерения длины выберем величину

$$X_0 = \left(8\pi j_{э0}/I_0\right)^{-1/2} \; , \tag{10}$$

связанную со значением плотности тока эмиссии в центре катода $j_{э0}$, исключая тем самым это значение из числа задаваемых параметров. Под q_1 , $h_{2,3}$ будем далее подразумевать отношения соответствующих размерных величин к X_0 . Не ограничивая общности, положим $\lambda^{(0)} = 1$. Требуя аналитичность характеристик потока вблизи оси получаем, что параксиальное разложение поперечных компонент импульса содержит только нечетные степени q_2

$$\eta_i = \sum_n \eta_{in} q_2^{2n+1} \; , \quad i = 2,3$$

а величин η_1 , γ , ψ , $\varkappa$ - только четные :

$$\eta_1 = \sum_n \eta_{1n} q_2^{2n} \; , \; \gamma = \sum_n \gamma_n q_2^{2n} \; , \; \psi = \sum \psi_n q_2^{2n+2} \; .$$

Вводя функции $\Theta(q_1)$, $\tau(q_1)$, первая из которых пропорциональна приведенному радиусу пучка /3/, а вторая характеризует отклонение от параксиальности, т.е. аберрации системы, разложение $\varkappa$ представим в виде

$$\varkappa = \frac{1}{\sqrt{2}\, X_0 \Theta}\left(1 + \tau q_2^2\right)\sqrt{P_a} \; . \tag{11}$$

Безразмерную индукцию магнитного поля определим как

$$b \equiv -\frac{e B_1 X_0}{mc^2} = \frac{1}{h_2 h_3}\frac{\partial}{\partial q_2}\left(h_3 \eta_3\right) \; . \tag{12}$$

I.3. Уравнения потока в катод - анодном зазоре.

Из определений γ и ψ следуют соотношения из первых коэффициентов :

$$\gamma_0^2 = 1 + \eta_{10}^2 \quad , \qquad \psi_0 = \frac{\eta_{10}\lambda^2}{8\Theta^2} p_a \quad . \tag{I3}$$

Подстановка параксиальных разложений в уравнения безвихревого ламинарного потока приводит к уравнению огибающей (при выполнении требования $I_b \ll I_A$, I_A - ток Альфвена, $I_A = \gamma\beta mc^3/e$)

$$\eta_{10}'^2 \frac{(3+\eta_{10}^2)}{(1+\eta_{10}^2)} = \frac{1}{\Theta^2} - b_0^2 - 4\eta_{10}^2 \frac{\Theta''}{\Theta} \quad . \tag{I4}$$

которое связывает осевые значения импульса, магнитного поля и приведенный радиус пучка, а также к выражениям для коэффициентов высших порядков /I/ с учетом прозрачности анодной сетки p_a :

$$\gamma_1 = \frac{1}{4}\left[\frac{\lambda^2\gamma_0 p_a}{2\Theta^2} - (\lambda^2\gamma_0')'\right] ,$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{16}\left[\frac{\lambda^2\gamma_1 p_a}{2\Theta^2} - (\lambda^2\gamma_1')'\right] + \frac{1}{4}\gamma_1\left(\frac{3h_{21}-h_{31}}{\lambda} - \right.$$

$$\left. - 3h_{11}\right) + \frac{\lambda^2\gamma_0 p_a}{16\Theta^2}(\tau + h_{11}) - \frac{\lambda^2\gamma_0'}{16}\left(\frac{h_{21}+h_{31}}{\lambda} - h_{11}\right)' ,$$

$$\eta_{11} = -\eta_{10}h_{11} + \psi_0 - 2\,\frac{(\Theta^2\psi_0')'}{p_a} , \tag{I5}$$

$$\frac{2\psi_1}{\psi_0} = 2\tau + \frac{h_{21}+h_{31}}{\lambda} + \frac{\eta_{11}}{\eta_{10}} ,$$

$$\eta_{31} = \frac{1}{8}\left[\frac{\eta_{30}\lambda^2 p_a}{2\Theta^2} - \lambda(\lambda\eta_{30})''\right] -$$

$$-\frac{1}{2}\eta_{30}\left(h_{11} + \frac{h_{31}-h_{21}}{\lambda}\right) ,$$

и к дифференциальному уравнению для аберрационной функции:

$$\eta_{10}^2\psi_0 \varkappa_0^2\left[\frac{1}{\varkappa_0^2}\left(\frac{\tau}{\psi_0}\right)'\right]' + (\varkappa_0^2 + f^2)\tau = -\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_1}{\mu_0} + \frac{\eta_{11}}{\eta_{10}}\right)f^2 +$$

$$+\frac{1}{4}\lambda'(\lambda' - \lambda\chi)f^2 + \frac{1}{8}\lambda^2\varkappa_0^2(\beta - f)^2(1 - \mu_0^2\varkappa_0^2) +$$

$$+\frac{1}{8}\left[\lambda^2\beta'(\beta' - f') - \beta(\lambda^2\beta')'\right] - \gamma_0'(\gamma_1' - \gamma_0' h_{11}) - \frac{2\gamma_1^2}{\lambda^2} +$$

$$+\eta_{10}(\eta_{11} - \eta_{10}h_{11})\left[2\varkappa_0\left(\frac{1}{\varkappa_0}\right)'' + \sigma\chi\right] + \eta_{10}^2\sigma(h_{11}' - \chi h_{11}) + \qquad (16)$$

$$+\frac{2}{\lambda^2}\left(\eta_{11} + \frac{1}{4}\lambda\lambda'\eta_{10}\chi\right)^2 + \frac{3}{2}\eta_{10}'(\eta_{11}' - \eta_{10}'h_{11} - \eta_{10}h_{11}\chi) +$$

$$+\frac{2}{\lambda^2}\left(\eta_{11} + \frac{1}{4}\lambda\lambda'\eta_{10}\chi - \psi_0 - \frac{1}{4}\mu_0\varkappa_0^2\lambda^2(\beta - f)\right)^2,$$

$$\mu_1 = \mathrm{const}\cdot\psi_0,$$

где $f = \mu_0\varkappa_0^2\eta_{10} = \beta - 2\eta_{30}/\lambda$, $\lambda = h_{20}$, $\beta = eB_{10}/mc^2$, B_{10} - продольная компонента магнитного поля, $\varkappa_0^2 \simeq 4I/(I_0\eta_{10}R^2)$, I - ток пучка, R - радиус пучка, $\chi = \psi_0'/\psi_0$, $\sigma = \varkappa_0'/\varkappa_0$. В рассматриваемом втором порядке параксиальной теории соотношения (I2) - (I6) дают полное описание потока.

I.4. Алгоритм решения внутренней задачи в катод - анодном зазоре.

В качестве условий на катоде рассмотрим режим ограничения тока эмиссии пространственным зарядом, при котором $\vec{\eta}^{(0)} = 0$, $\gamma^{(0)} = 1$, $\gamma'^{(0)} = 0$. Совместно с требованием конечности ψ эти условия приводят к равенству $\psi'^{(0)} = 0$, что означает отсутствие тангенциальной составляющей плотности тока на катоде /I/.

Данная совокупность условий позволяет установить функциональный вид характеристик потока вблизи катода. Соответствующие асимптотические выражения можно использовать, чтобы описать поведение потока в катод - анодном зазоре.

Известно /7/, что характеристики потока являются аналитическими функциями агрегата

$$u=\left(\frac{3}{2}q_1\right)^{1/3} . \qquad (17)$$

Учитывая требования $\gamma_0^{(0)}=1$, $\gamma_0^{\prime(0)}=0$, будем искать функции $\eta_{10}(q_1)$, $\Theta(q_1)$ в виде рядов

$$\eta_{10}=\sum_{n=0}^{\infty} e_n u^{n+2}, \quad \Theta=\sum_{n=0}^{\infty} t_n u^{n+1} . \qquad (18)$$

Как указывается в работе /2/ подстановка разложений (18) в уравнение (14) и приравнивание членов с одинаковыми степенями u дает по одной связи для каждой пары коэффициентов e_n, t_n. Из условий $\gamma_k^{(0)}=\gamma_k^{\prime(0)}=0$ следует вторая связь для коэффициентов с $6k-4 \le n < 6k$. Поскольку в выражение для γ_k входит коэффициент разложения плазменной частоты $\varkappa_{k-1}$, в рассматриваемом порядке теории могут быть определены коэффициенты с $n <$ 12. Для $n=6k-6$, $6k-5$ получаемые таким образом пары уравнений линейно - зависимы. Из требования $\psi_{k-1}^{\prime(0)}=0$ определяется второе независимое соотношение для $n=6k-5$. Неопределены остаются только коэффициенты t_{6k}, k = 1,2, ...

На ЭВМ ЕС-1061 с помощью системы программирования REDUCE (версия 3.2), которая относится к универсальной системе для аналитических вычислений (САВ) /8/, все характеристики потока представлены в виде рядов (18). Свободными в них являются коэффициенты a_1, a_2 которые связаны с формой катода (7), и t_6, t_{12}. В приложении I выписаны соответствующие выражения. Выбор радиуса кривизны катода R_c однозначно определяет величину коэффициента a_1. Значения коэффициентов a_2, t_6, t_{12} должны удовлетворять на аноде требованиям

$$\gamma_1(x_a)=\gamma_2(x_a)=0 ,$$

$$(\psi_0^{\prime}/\psi_0)^{\prime}_{x_a}=A=const .$$

2. Транспортировка пучка в трубе дрейфа.

В данной работе рассматривается важный для практики случай формирования бриллюэновского потока в продольном магнитном поле, монотонно стремящемся при $q_1 \to \infty$ к конечному значению b_f. Для согласования транспортируемого пучка с внешним магнитным полем b_f необходимо, чтобы пучок в трубе дрейфа имел строго определенный бриллюэновский радиус, при котором пульсации границы пучка отсутствуют. Как известно из анализа пучка Бриллюэна /9/ ток пучка I, радиус a и потенциал ϕ_0 на оси пучка связаны индукцией внешнего магнитного поля B соотношением:

$$I = 1{,}46 \times 10^{6} (Ba)^2 \phi_0^{1/2} ,$$

или в безразмерных величинах :

$$r_{corr.}/X_0 = \frac{1}{b_f}\sqrt{\frac{8I}{I_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_{10f}\, P_a}} , \qquad (19)$$

где X_0 - единица измерения длины (10), I - ток пучка в трубе дрейфа, P_a - прозрачность анодной сетки, η_{10f} - величина безразмерного импульса на оси пучка, $I_0 = m_0 c^3/e = 17\,\kappa A$ для электронов. Как известно, для учета собственного заряда пучка, находящегося в цилиндрической камере длины L и радиуса R, необходимо найти точное решение уравнения Пуассона через соответствующую функцию Грин Для аксиально - симметричного распределения заряда в камере, стенки которой находятся под нулевым потенциалом, имеем /4/

$$\varphi(r, x) = \int_0^R dr'\, r' \int_0^L dx'\, G(r', x'; r, x)\, \rho(r', x') , \qquad (20)$$

где X отсчитывается от края трубы дрейфа, ρ - плотность заряда, деленная на ε_0 и /5/ :

$$G(r', x'; r, x) = \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n r/R)\, J_0(\lambda_n r'/R)}{\lambda_n J_1^2(\lambda_n)} \times$$

$$\times \frac{sh\{\lambda_n [L - max(x, x')]/R\}\; sh[\lambda_n\, min(x, x')/R]}{sh(\lambda_n L/R)} \qquad (21)$$

здесь J_0, J_1 - функции Бесселя первого рода и λ_n $(n=1,2\ldots)$ - нули J_0 $(J_0(\lambda_n)=0)$. Если камера достаточно длинная $\lambda_1 L/R \gg 1$, т.е. $L/R \gg 1/2,4$, то множитель с гиперболическими синусами в (I7) упрощается до вида

$$\left(\exp[-\lambda_n|x+x'|/R] - \exp[-\lambda_n|x-x'|/R]\right)/2 \,. \qquad (22)$$

В решаемой здесь задаче удовлетворяется требование $L/R \gg 1/2,4$, поэтому интегрируя уравнение (I7) с учетом конкретного вида функции Грина для безразмерной энергии осевого электрона получаем зависимость от продольной координаты X вида

$$\gamma_0(x) = \gamma_{0f} + \frac{8I_b}{I_0}\,\frac{R}{r(x)}\,\frac{1}{\beta(x)}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{\lambda_n^3}\,\frac{J_1\left(\lambda_n \frac{r(x)}{R}\right)}{J_1^2(\lambda_n)} \,\cdot \qquad (23)$$

$$\times \exp\left(-\lambda_n x/R\right) ,$$

$$\gamma_{0f} = \gamma_0(x=0) - \frac{I_b}{I_0}\,\frac{1}{\beta_f}\left[1 + 2\ln\left(\frac{R}{r_f}\right)\right] , \qquad (24)$$

здесь I_b - ток пучка в трубе дрейфа ; R - радиус трубы дрейфа $r(x)$ - радиус пучка ; $\beta(x) = v/c = \sqrt{\gamma_0^2 - 1}\,/\gamma_0 = \eta_{10}/\gamma_0$ - безразмерная скорость ; γ_{0f}, β_f, r_f - величины на расстоянии $x_f \gg R/\lambda_1$ от анода.

Очевидно, что в связи с "провисанием потенциала" внутри заряженного потока частиц существует предел для тока, транспортируемого по трубе радиуса R /6/ :

$$I_{lim} \simeq I_0\,\frac{\left(\gamma_0^{2/3} - 1\right)^{3/2}}{2\ln(R/r_b)} \,, \qquad (25)$$

здесь r_b - радиус пучка , γ_0 - безразмерная энергия заряженных частиц до влета в трубу дрейфа.

Так, при $\gamma_0 = 1.4$, $R/r_b = 2$ предельный ток $I_{lim} \simeq 0{,}091\, I_0 \simeq 1{,}55\,кA$. Если стремиться получить хорошую компрессию пучка в трубе дрейфа, то нужно помнить об уменьшении величины предельного тока пучка по мере сжатия его в трубе с постоянным радиусом. Особенно это важно для низкоэнергетичных пучков.

Таким образом, условия согласования пучка с внешним магнитным полем (19) и "запирания" пучка собственным зарядом (25) фактически полностью определяют параметры пучка, внешнего магнитного поля и радиус трубы дрейфа .

Для согласования пучка с ведущим магнитным полем, создаваемым соленоидом, может быть использована магнитная линза конечной длины, расположенная на некотором расстоянии от торца трубы дрейфа с анодной сеткой . Поток частиц в катод - анодном зазоре считается безвихревым, поэтому это расстояние должно быть достаточно большим. Магнитное поле такой линзы на оси получается интегрированием магнитного поля витка с током по длине линзы, тогда

$$b_0(x) = b_0^{max} \frac{\sqrt{(2R)^2 + b^2}}{2b} \left[\frac{(b-2x)}{\sqrt{(2R)^2 + (b-2x)^2}} + \frac{(b+2x)}{\sqrt{(2R)^2 + (b+2x)^2}} \right], \tag{26}$$

где x отсчитывается от середины магнитной линзы ; b - ее длина, R - внутренний радиус магнитной линзы , равный радиусу трубы дрейфа : $b_0^{max} = b_0(x=0)$ - максимальное значение магнитного поля линзы

$$b_0^{max} = -\frac{e B_{max} X_0}{m_0 c^2},$$

$$B_{max} = 4\pi \frac{IN}{c\sqrt{(2R)^2 + b^2}}, \tag{27}$$

где I – ток в обмотке, N – число витков, c – скорость света.

С помощью короткой магнитной линзы и соленоида можно осуществить и компрессию транспортируемого в трубе дрейфа пучка, если ток и радиус пучка при этом не превышают некоторого предельного значения (25).

Для описания магнитного поля соленоида используется некоторое модельное представление.

3. Анализ аберраций пучка.

Введем некоторую функцию $Q = \tau/\psi_0$. Полученное уравнение (I6) относится к классу дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами типа: $y'' + a(x)y' + b(x)y = c(x)$.

Рассматриваемое дифференциальное уравнение можно решить методом Рунге – Кутта, но тогда возможно экспоненциальное накопление ошибок счета. В работе использован другой способ решения уравнения, основанный на его гамильтоновой форме, т.е. сводится к системе дифференциальных уравнений типа:

$$p = mQ' \quad , \quad p' = f(Q) \quad .$$

Используя описанный алгоритм можно проанализировать аберрации (Q) как в катод – анодной области, где необходим учет геометрии, так и в области трубы дрейфа, где $\lambda = 1$, $h_{11} = 0$. При переходе через анодную сетку необходимо выполнить условия сшивки решений, которые получены из требований эквипотенциальности сетки, непрерывности компонент импульса $\vec{\eta}$, непрерывности тока с учетом конечной прозрачности сетки и из соответствующих параксиальных разложений. Значком "–" обозначим величины до сетки, значком "+" величины после сетки. Условия непрерывности следующие:

$$\eta_{10}^{-} = \eta_{10}^{+} \; ; \; (\tau/\lambda_a^2)^{-} = \tau^{+} \; ; \; (\eta_{11}/\lambda_a^2)^{-} = \eta_{11}^{+} \; ;$$
$$(\psi_0'/\psi_0)^{-} = (\psi_0'/\psi_0)^{+} \; ; \quad \Theta^{-} = \Theta^{+} \; ; \qquad (28)$$
$$(\psi_0/\lambda_a^2)^{-} = \psi_0^{+} \; ; \; (\psi_1/\lambda_a^2\psi_0)^{-} \simeq (\psi_1/\psi_0)^{+} \; ,$$

если считать, что в трубе дрейфа всюду цилиндрическая система координат, а также

$$Q^- = P_a Q^+ ,$$

$$(Q')^+ = (Q')^- + \left(\frac{\eta_{11}^-}{2\psi_0^- \eta_{10}^-}\right)' - \left(\frac{\eta_{11}^+}{2\psi_0^+ \eta_{10}^+}\right)' , \qquad (29)$$

необходимые для решения аберрационного уравнения.

4. Алгоритм программы " FOIL " .

4.I. Особенности построения программы.

Программа " FOIL " состоит из двух программ " CAT " и " TUBE " , связанных через процедуру OVERLAY , что позволяет существенно сократить требуемую программой память, т.к. сначала загружается программа " CAT " , затем вместо " CAT " подсоединяется " TUBE ". Программы " CAT " и " TUBE " связаны только шестью значениями общих параметров. Программы работают в интерактивном режиме, что позволяет активно влиять на их работу во время счета, придает программе гибкость. На рис.I показано дерево построения программы " FOIL " .

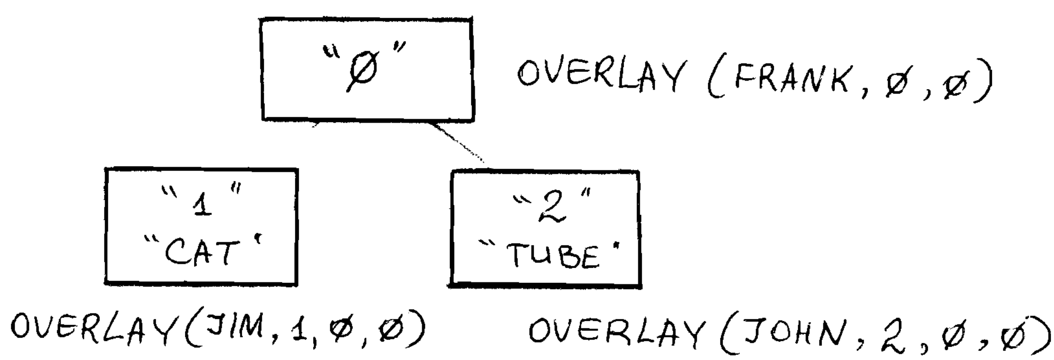


Рис.I.

4.2. Программа " CAT " .

На рис.2 изображена блок - схема программы " CAT " .

Основные идентификаторы:

$AL(I)$, $I = 1$, 4 - массив, содержащий коэффициенты разложения $\lambda(x)$ (5) в ряд Тейлора, т.е. $\lambda(x) \simeq 1 + \sum_{n=1}^{4} AL_n x^n / n!$;

$COT(I)$, $I = 1,10$ – массив, содержащий значения коэффициентов t_{i+2} ($i = 1,10$), причем $t_1 = t_2 = 0$;

GMF – энергия осевых электронов на сетке ;

BK – величина магнитного поля на катоде ;

$BK = 0$ в данной программе ;

PQ – прозрачность сетки ;

XIN – величина анод – катодного зазора ;

$A1 \equiv a_1$, $A2 \equiv a_2$ – коэффициенты, определяющие геометрию катода (7) ;

$PLX \equiv (\psi_0'/\psi_0)\Big|_{x_a}$ – является задаваемой величиной ;

$THA \equiv \Theta_a$ – значение огибающей пучка на анодной сетке ;

$ET(I)$, $I = 1,12$ – коэффициенты разложения η_{10} , определяемые по формулам (24) и (П.1) ;

$TET(I)$, $I = 1,12$ – коэффициенты разложения θ , определяемые по формулам (24) и (П.2) ; $EE(I) = \eta_{10}(x)$ в катод – анодном зазоре ; $GX\emptyset(I) \equiv \gamma_0(x)$, $GX1(I) = \gamma_0'(x)$, $GX2(I) \equiv \gamma_0''(x)$;

$PS(I)$, $I = 1,9$ – коэффициенты разложения ψ , определенные по формулам (П.3) ; $RADCAT$ – радиус катода , является задаваемой величиной;

$CURCAT$ – ток, снимаемый с катода ;

$VX\emptyset$ – единица измерения длины.

Описание действия программы " CAT " :

1. задаются некоторые значения расстояния между анодом и катодом и радиус кривизны катода, т.е. определяются величины XIN и $A1$; $A2$, $COT(4)$, $COT(10)$ считаются для начала нулевыми ;

2. задается некоторое значение ψ_0'/ψ_0 на анодной сетке (значение PLX) ;

3. как указывалось в разделе 2 , для определения неизвестных A2 , COT (4) , COT (10) необходимо решить систему алгебраических уравнений:

$$\gamma_1(XIN) = 0 , \quad \gamma_2(XIN) = 0 , \quad (\psi_0'/\psi_0)\Big|_{XIN} = PLX ,$$

где γ_1, γ_2, ψ_0'/ψ_0 представлены в виде соответствующих рядов по степеням $u=(\frac{3}{2}x/N)^{1/3}$; данная процедура выделена в подпрограмму "MOUSE";

4. вблизи катода задача некорректна из-за бесконечной плотности заряда на его поверхности, поэтому в программе определяется величина отхода от поверхности катода (N/N) ; определяется количество отрезков разбиения катод - анодного промежутка (NCA) ;

5. с учетом найденных значений коэффициентов a_2, t_6, t_{12} вычисляются коэффициенты разложения η_{10} в ряд по степеням и (П.I) по заданным значениям a_1 и x_{in} (расстояние между катодом и анодом) определяется геометрия катод - анодного пространства, причем при $x = x_{in}$ ортогональная криволинейная координатная сетка катод - анодного зазора переходит в цилиндрическую ;

6. по найденному значению $\eta_{10}(x_{in})$ вычисляется значение безразмерной энергии электрона на аноде γ_{0a}, причем должно выполняться условие $\gamma_{0a}=\gamma_0$, где γ_0 заданная энергия электронов на аноде; если условие не выполняется, то изменяется расстояние между катодом и анодом x_{in} и повторяются П.I ... П.6 ;

7. определяются коэффициенты разложения в ряд по степеням u огибающей пучка $\theta(u)$ и значения θ, θ', θ'' в точках катод - анодного промежутка ;

8. проверяется выполнение условия $\gamma_1(x_{in})=0$, где все величины (I5) представлены в виде соответствующих рядов ;

9. как указывалось в работе /I/ характеристики потока являются аналитическими функциями агрегата $u=(\frac{3}{2}q_1)^{1/3}$ только вблизи катода, поэтому необходимо проверить правильность вычисленных характеристик потока; для этого решается дифференциальное уравнение на огибающую, считая, что магнитное поле отсутствует, огибающая $\theta(x)$ пучка

представлена в виде ряда ;

10. определив характер $\eta_{10}(x)$ через решение уравнения огибающей, где $\Theta(x)$ – в виде ряда, вычисляется значение $\gamma_1(x_{in})$ (15); если $\gamma_1(x_{in}) \neq 0$, необходимо скорректировать значения коэффициентов a_1, a_2, t_6, t_{12}; наиболее сильным для γ_1 коэффициентом является t_6 ;

11. изменив t_6 необходимо переопределить t_9 и t_{10}, содержащие t_6, а также величину катод – анодного зазора x_{in} для удовлетворения условия $\gamma_0(x_{in}) = \gamma_0$;

12. определив таким образом x_{in}, используя значения коэффициентов a_1, a_2, t_{12} и новое значение t_6 повторяются процедуры 7 ÷ 11 до тех пор, пока не выполнится условие $\gamma_1(x_{in}) = 0$.

13. для сшивки решений со стороны катод – анодного зазора определяются значения $\psi_0(x_{in})$, $(\psi_0'/\psi_0)_{x_{in}}$, $\Theta(x_{in})$, где x_{in} – – координата нахождения сетки по оси симметрии системы ;

14. просчет аберраций в катод – анодном зазоре.

4.3. Программа "TUBE".

Программа учитывает собственный заряд пучка, транспортируемого в трубе дрейфа. Первый член ряда в уравнении (24) является определяющим, поэтому можно записать более удобную формулу для определения осевой энергии электрона в трубе:

$$\gamma_0(x) \simeq \gamma_0(x=0) - \frac{I_b}{I_0}\frac{1}{\beta(x)}\left[1 + 2\ln\left(\frac{R_{тр}}{r(x)}\right)\right] \cdot \left(1 - \exp\left(-\lambda_1 x / R_{тр}\right)\right), \qquad (30)$$

где λ_1 – нуль функции Бесселя $J_0(\lambda_1) = 0$; $\gamma_0(x=0)$ – энергия электронов на сетке, т.е. $\gamma_0(x=0) = \gamma_a$; $\beta(x) = v/c$ – безразмерная скорость электронов ; $R_{тр.}$ – радиус трубы дрейфа ; $r(x)$ – радиус транспортируемого пучка ; I_b – ток пучка, $I_b = I_c/p_a$, I_c – ток снимаемый с катода, p_a – прозрачность сетки ; $I_0 = m_0 c^3/e$.

Магнитное поле на оси трубы дрейфа формируется соленоидом и магнитной линзой. Если магнитное поле линзы взято реальное (26) – (27), то магнитное поле соленоида – модельное.

В работе рассматривается важный для практики случай формирования бриллюэновского потока в продольном магнитном поле, монотонно стремящемся при $q_1 \to \infty$ $(x \to \infty)$ к конечному значению b_f. Представим внешнее магнитное поле на оси трубы дрейфа без учета диамагнетизма в виде:

$$b_0(x) = b_f \, th\left[a(x)\left(1 - \frac{x_B}{x_B + R_c} e^{-2x/x_B}\right)\right],$$

$$a(x) = x^2 / \left((x + x_2)\, x_B\right), \tag{31}$$

где x_2 – длина квадратичного роста магнитного поля; x_B – длина фронта; R_c – радиус катода; x – некоторая переменная, причем $b_0(x \le 0) = 0$; $b_f \equiv b_0(x \to \infty)$.

В программе "TUBE" решается с учетом собственного поля пучка, транспортируемого в трубе дрейфа, уравнение огибающей (14), причем можно вводить и ненулевую величину нормализованного эмиттанса $\mathcal{E}_n$. В этом случае уравнение огибающей будет иметь вид:

$$\eta_{10}'^{\,2}\frac{(3+\eta_{10})^2}{(1+\eta_{10})^2} = \frac{1}{\Theta^2} - b_0^2 - 4\eta_{10}^2\frac{\Theta''}{\Theta} + \frac{4\eta_{10}^2}{(r_0\Theta)^4}\, x_0^2 \mathcal{E}_n^2, \tag{32}$$

где r_0 – некоторый характерный радиус.

Уравнение (14) решается относительно огибающей Θ при некоторых $\eta_{10}(x)$, $\eta_{10}'(x)$, $b_0(x)$, поэтому необходимо определить начальные значения Θ_0, Θ_0'.

Программа "TUBE" построена таким образом, что можно организовать решение уравнения огибающей либо в направлении движения пучка в трубе дрейфа, что удобно при исследовании воздействия пучка на образцы различных материалов, т.к. не требуется согласования с ведущим магнитным полем, либо в обратном направлении, что позволяет формировать транспортировать пучок, согласованный с внешним магнитным полем.

Опишем часть программы " TUBE ", связанную с формированием согласованного пучка. Для магнитного поля $b_0(x)$ вида (32) нетрудно записать асимптотику при $x > x_f$, вводя новую переменную $y = x - x_f$:

$$b_0^{ad}(y) = b_f \left[1 - \varepsilon e^{-\alpha y} \right] , \tag{33}$$

где $\varepsilon = 2 e^{-2x_f/x_B}$; $\alpha = 2/x_B$; x_f - конечная точка , $b_0(x_f) = b_f$.

Из уравнения огибающей (I4) при постоянном импульсе осевого электрона $\eta_{10} = \eta_{10f}$ для магнитного поля $b_0^{ac}(y)$ получается асимптотический вид огибающей пучка:

$$\theta^{ad}(y) \simeq \frac{1}{b_f} \left[1 + \frac{\varepsilon}{1 + 2\left(\frac{\alpha \eta_{10f}}{b_f}\right)} e^{-\alpha y} \right] , \tag{34}$$

где $\eta_{10f} = \sqrt{\gamma_{0f}^2 - 1}$, откуда нетрудно определить и вид $\theta'^{ad}(y)$

Параметрами программы " TUBE " являются :

PQ - прозрачность анодной сетки ;

GMF - релятивистский фактор, определяющий энергию электронов на анодной сетке ;

NST - число шагов с длиной шага ;

RT - радиус трубы дрейфа ;

CTC - ток пучка, снимаемый с катода.

На рис.3 изображены параметры магнитного поля.

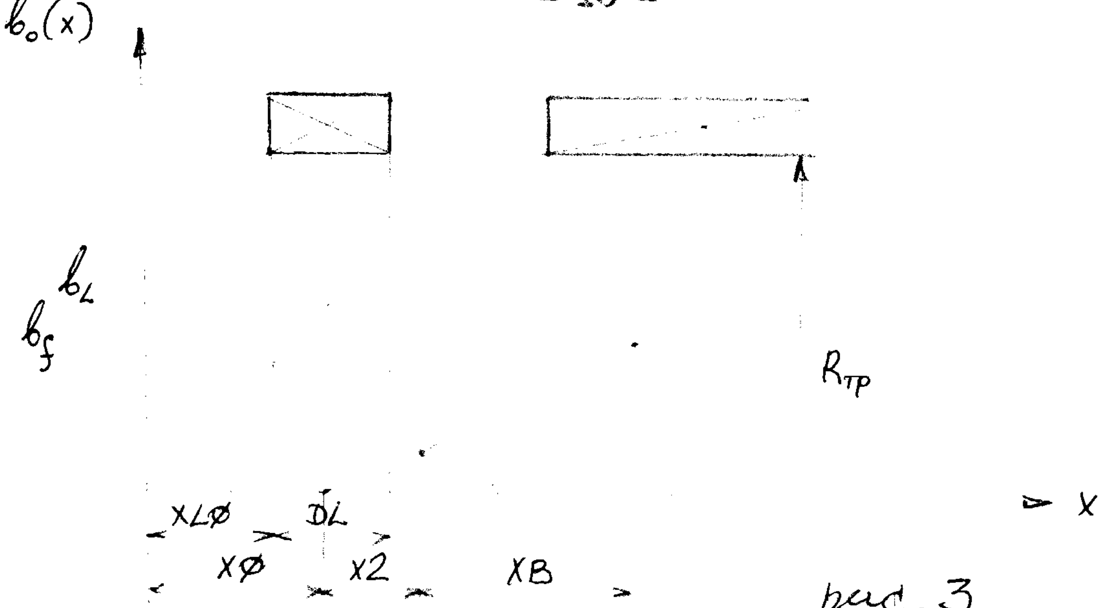


рис. 3

Действия программы " TUBE " :

1. по величине тока пучка, транспортируемого в трубе дрейфа, по энергии электронов, по радиусу трубы дрейфа и величине внешнего магнитного поля определяется значение согласованного радиуса пучка r_f (19) ; при этом организуется итерация по энергии осевых электронов, т.к. необходимо учесть собственный заряд пучка ;

2. определяется энергия осевых электронов на расстоянии, где торец трубы дрейфа не влияет на пучок (34), полагая $\beta_f \simeq 1$; очевидно, что транспортировка электронов в трубе дрейфа возможна, если $\gamma_{0_f} > 1$

3. организуется итерационный поиск зависимости радиуса пучка от продольной координаты ; в качестве первого приближения полагаем, что радиус пучка в трубе дрейфа постоянен и равен согласованному значению $r(x) = r_f$, а энергия осевого электрона есть

$$\gamma_0(x) \simeq \gamma_0(x=0) - \frac{I_b}{I_0} \frac{1}{\beta(x)} \left[1 + 2\ln\left(\frac{R_{тр}}{r_f}\right)\right]\left(1 - e^{-\lambda_1 x / R_{тр}}\right),$$

где λ_1 - нуль функции Бесселя $J_0(\lambda_1) = 0$; $\gamma_0(x=0) = \gamma_a$ - энергия осевых электронов на анодной сетке ; $\beta(x) \simeq \sqrt{\gamma_a^2 - 1} / \gamma_a$;

4. определив таким образом $\gamma_0(x)$, а значит $\eta_{10}(x)$, $\eta_{10}'(x)$, решается уравнение огибающей относительно Θ , начальные условия выражаются согласно асимптотическому виду огибающей (34) ;

5. определив $\theta(x)$ вычисляется зависимость $r(x)$, используя соотношение $\theta(x)=\sqrt{\eta_{10}}\,\frac{r(x)}{R}$, где R – радиус катода ;
6. для нового вида зависимости $r(x)$ определяется $\gamma_0(x)$ и вновь решается уравнение огибающей относительно θ при прежних начальных условиях ; так итерации повторяются пока $\gamma_0(x_f)_{i+1} \simeq \gamma_0(x_f)_i$ где x_f – конечная точка ; i – номер итерации ;
7. рассматривается удовлетворение условий сшивки (30) ; если эти условия не выполнены, то меняются параметры, связанные с внешним магнитным полем.

Блок – схема работы этой части программы " TUBE " показана на рис.4.I. В качестве начальных условий при решении уравнения огибающей относительно θ можно использовать значения θ и θ' на сетке. Тогда изменяя параметры, связанные с внешним магнитным полем, можно добиться желаемого размера пучка на некотором расстоянии от сетки, но без согласования с магнитным полем.

5. Результаты счета программы " FOIL ".

Рассмотрим следующую задачу. Необходимо получить согласованный с внешним магнитным полем соленоида. Распределение плотности заряда по сечению пучка желательно иметь постоянным. Энергия электронов на сетке γ_a = I.4 . Ток пучка, снимаемый с катода I_c = I кА . Радиус катода R_K = I см. Прозрачность анодной сетки P_Q = 0,6 .

Для получения пучка с требуемой энергией электронов на аноде и с заданным током, снимаемым с катода необходимо обеспечить выполнение следующих требований:

I. катод выпуклый с радиусом кривизны

R_c = 5 см (a_1 = - 0.I) ;

2. расстояние между катодом и анодом

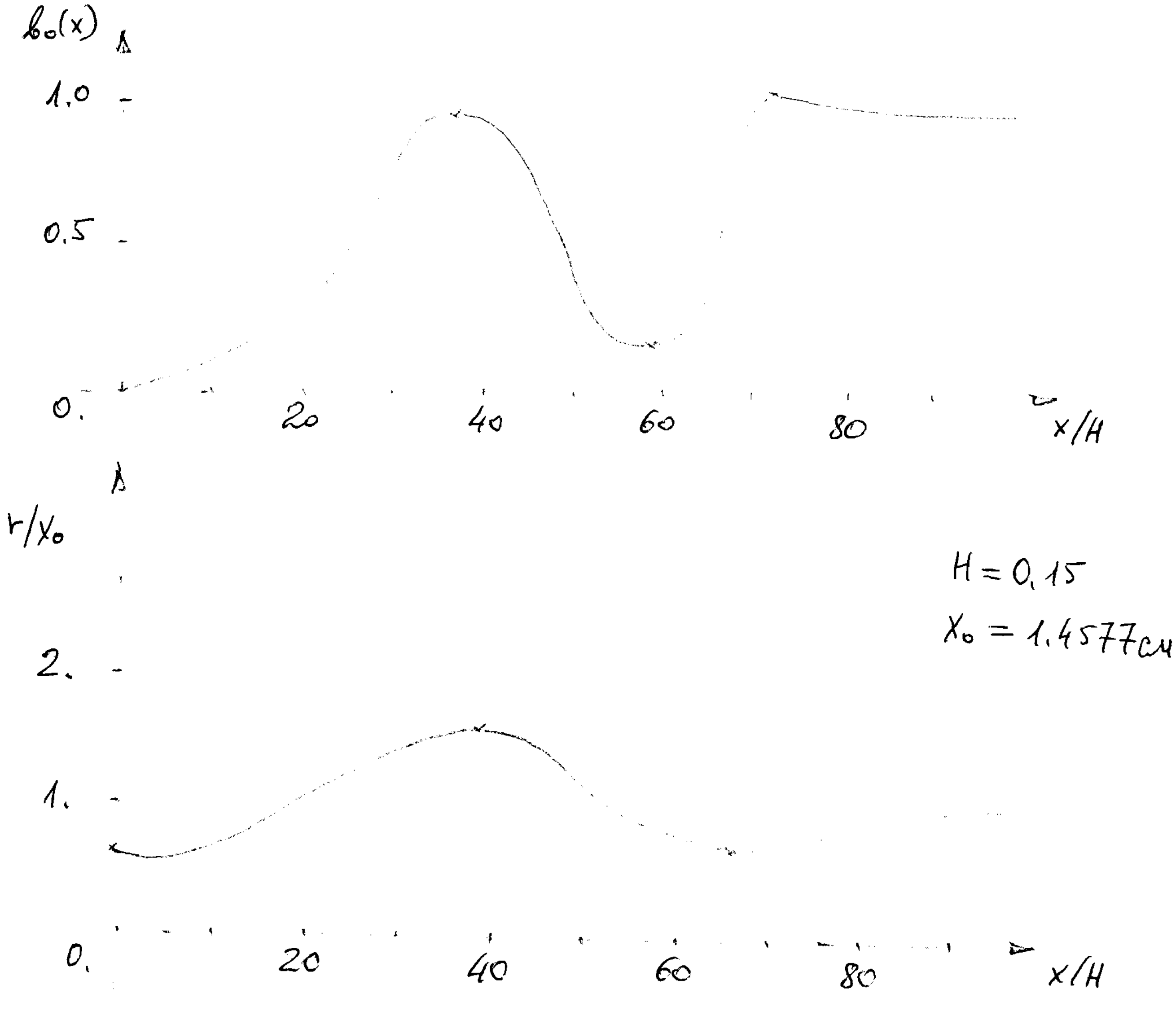
x_a = 0.85 см .

Согласуем полученный пучок с внешним магнитным полем в трубе дрейфа радиуса $R_{тр}$ = 2.9 см. Пусть поле соленоида на оси симметрии B_0 = 1.017 кГс, $X_0 \simeq 12$ см, X_B = 0.73 см, X_2 = 0.28 см. Тогда для получения согласованного пучка необходимо использовать магнитную линзу с параметрами:

B_{z1} = 0.958 кГс, X_{01} = 4,66 см, L = 4,37 см.

При этом радиус согласованного пучка r_s = 1.33 см, энергия осевого электрона на расстоянии $L \gg \lambda_1 R_{тр}$ γ_{0f} = 1.2465.

На рис.4 показаны зависимости $b_0(x)$ и $r(x)$, полученные при указанных параметрах.



$x_{реал.} = (x/H) \times H \times X_0$

рис. 4

Приложение I.

Представление характеристик потока в виде аналитических функций агрегата $u=\left(\frac{3}{2}q_1\right)^{1/3}$.

$$
\begin{aligned}
\eta_{10} = {} & u^2 + \frac{32}{45}a_1u^5 + \frac{19}{126}u^6 + \left(-\frac{8}{5}t_6 + \frac{4292}{10125}a_1^2\right)u^8 + \\
& + \frac{4336}{14175}a_1u^9 + \left(-\frac{19}{34650}b_k^2 + \frac{4507}{2182950}\right)u^{10} + \\
& + \left(-\frac{8312}{2475}t_6a_1 + \frac{8101744}{15035625}a_1^3 - \frac{4736}{13365}a_2\right)u^{11} + \\
& + \left(-\frac{916}{1365}t_6 + \frac{1072454}{2764125}a_1^2\right)u^{12} + \\
& + a_1\left(-\frac{104528}{70945875}b_k^2 + \frac{222064}{212837625}\right)u^{13} + \qquad \text{(П.I)} \\
& + \left(\frac{32731}{20738025}b_k^2 - \frac{67}{19}t_{12} + \frac{281}{950}t_6^2 - \right. \\
& - \frac{30536024}{10580625}t_6a_1^2 + \frac{25129898704}{64277296875}a_1^4 - \frac{120320}{457083}a_1a_2 + \\
& \left. + \frac{17705981}{10451964600}\right)u^{14} = u^2 + u^4\sum_{i=1}^{10}e_iu^i ,
\end{aligned}
$$

здесь b_k – величина магнитного поля на катоде ;

$$
\begin{aligned}
\theta = {} & u + \left(-\frac{44}{45}\right)a_1u^4 + \left(-\frac{1}{126}\right)u^5 + t_6u^7 + \\
& + \frac{22}{1575}a_1u^8 + \left(-\frac{257}{34650}b_k^2 - \frac{4511}{1455300}\right)u^9 + \\
& + \left(\frac{392}{495}t_6a_1 - \frac{286904}{3007125}a_1^3 + \frac{1856}{13365}a_2\right)u^{10} +
\end{aligned}
$$

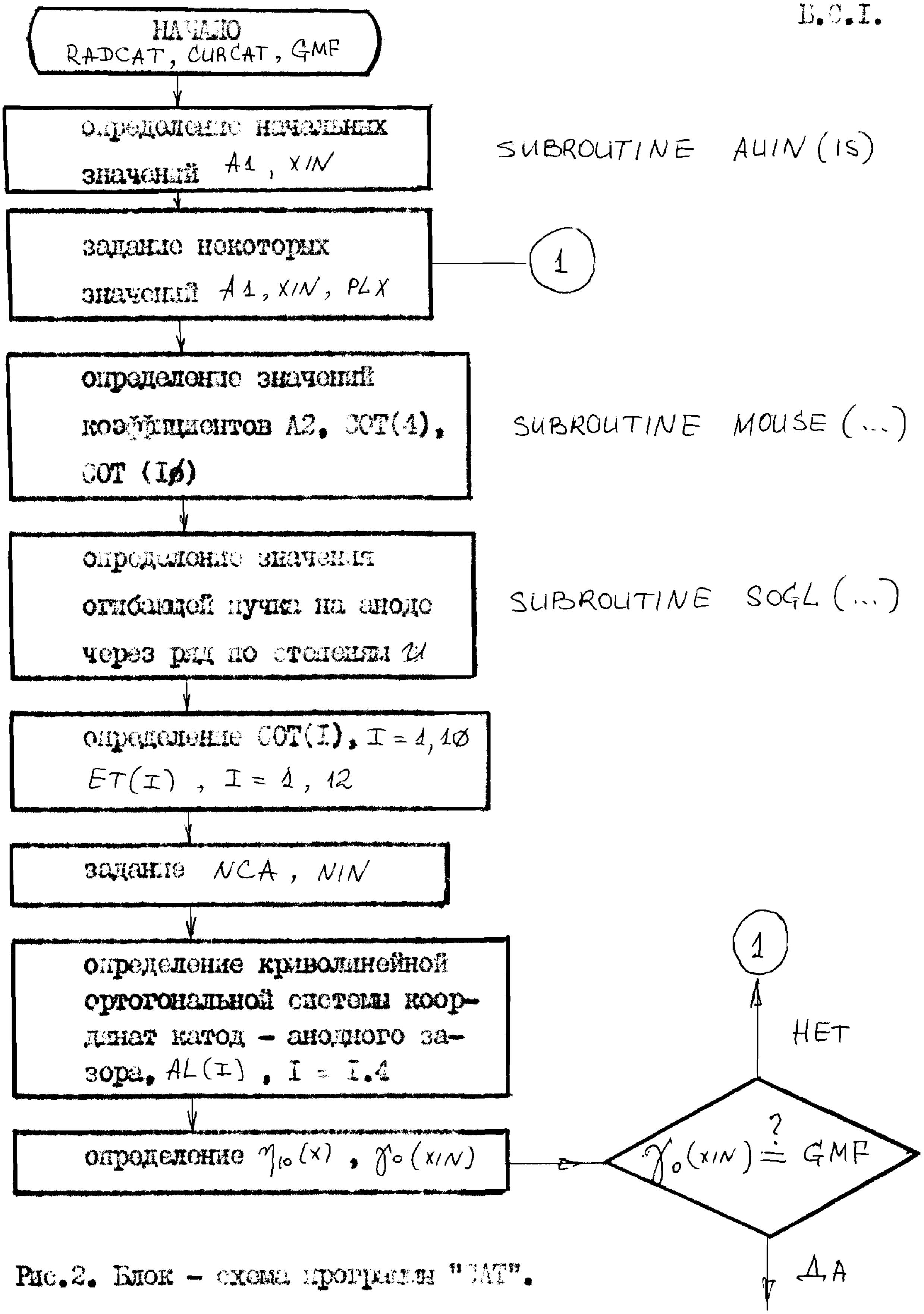
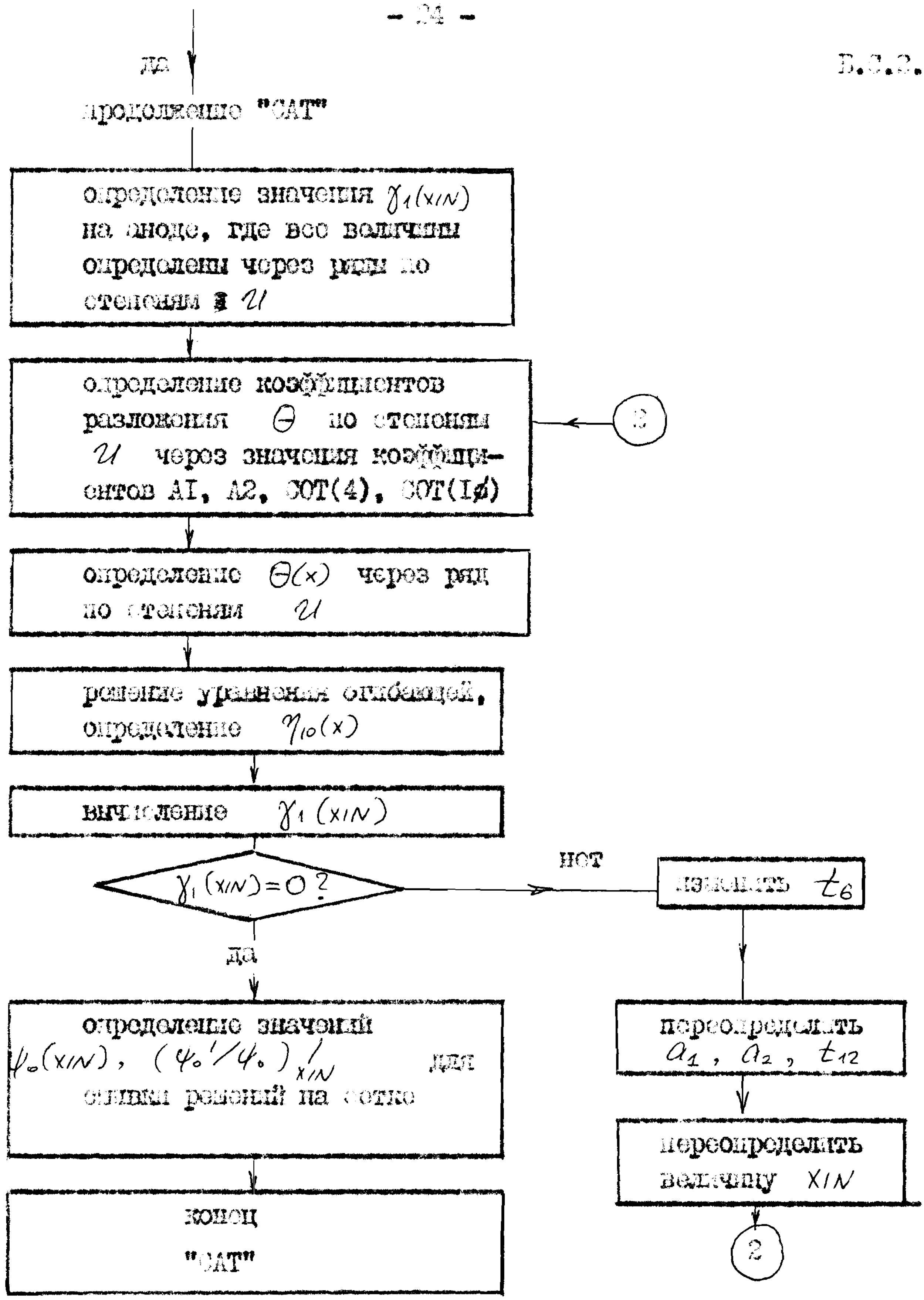


Рис.2. Блок - схема программы "КАТ".


да
продолжение "САТ"
определение значения $\gamma_1(x_{IN})$ на аноде, где все величины определены через ряды по степеням u
определение коэффициентов разложения Θ по степеням u через значения коэффициентов A1, A2, COT(4), COT(1Ø)
2
определение $\Theta(x)$ через ряд по степеням u
решение уравнения огибающей, определение $\eta_{10}(x)$
вычисление $\gamma_1(x_{IN})$
$\gamma_1(x_{IN})=0$?
нет
изменить t_6
да
определение значений $\psi_0(x_{IN})$, $(\psi_0'/\psi_0)|_{x_{IN}}$ для сшивки решений на сетке
переопределить a_1, a_2, t_{12}
переопределить величину x_{IN}
конец "САТ"
2

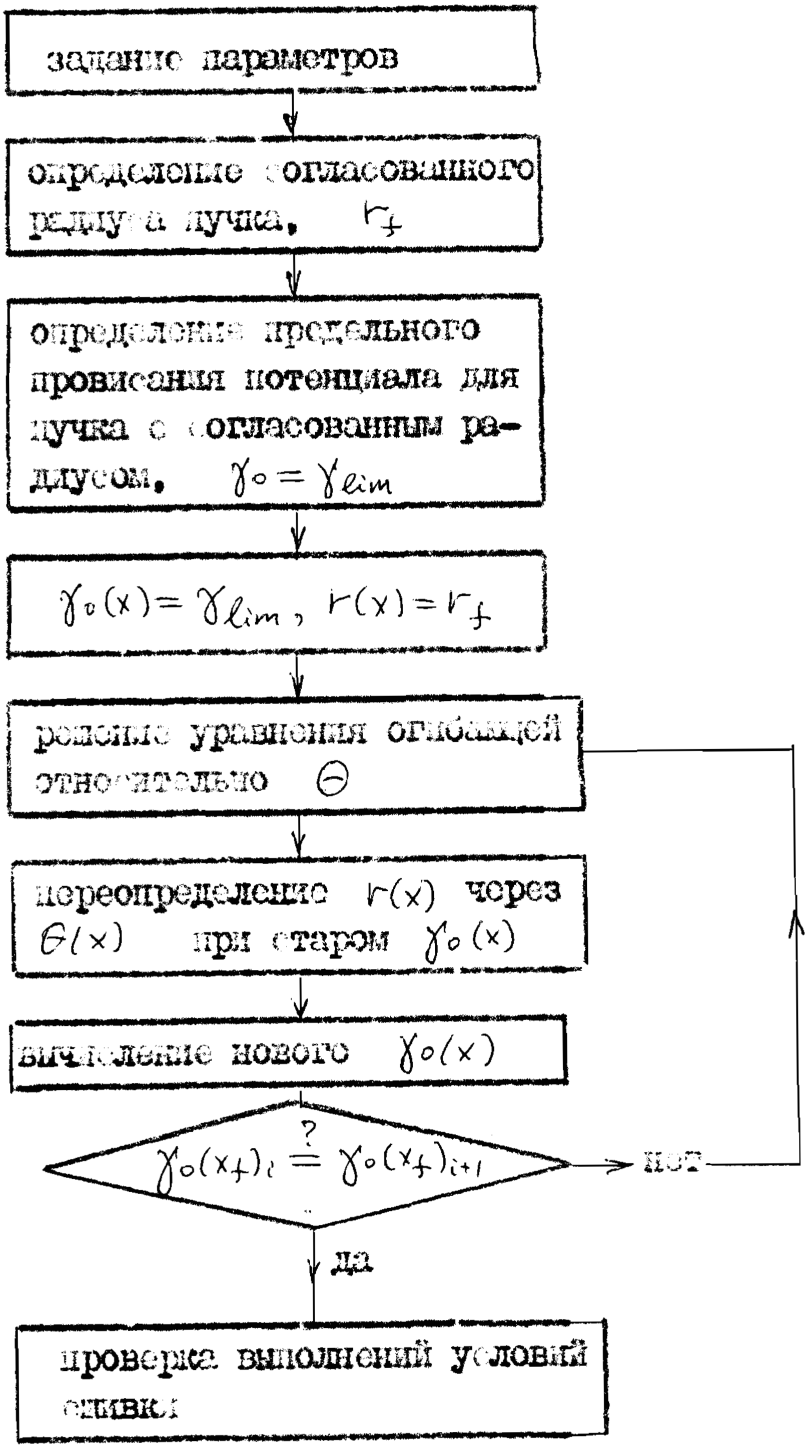

задание параметров
определение согласованного радиуса пучка, r_f
определение предельного провисания потенциала для пучка с согласованным радиусом, $\gamma_0 = \gamma_{lim}$
$\gamma_0(x) = \gamma_{lim}$, $r(x) = r_f$
решение уравнения огибающей относительно Θ
переопределение $r(x)$ через $\Theta(x)$ при старом $\gamma_0(x)$
вычисление нового $\gamma_0(x)$
$\gamma_0(x_f)_i \overset{?}{=} \gamma_0(x_f)_{i+1}$
нет
да
проверка выполнений условий сшивки

Рис.4.I.

Литература.

I. Алексахин Ю.И. ОИЯИ Р9-85-271, Дубна, 1985.

2. Алексахин Ю.И. ОИЯИ Р9-85-941, Дубна, 1985.

3. Алексахин Ю.И. ОИЯИ Р9-84-619, Дубна, 1984.

4. Александер К., Хинтце Э. – ЭЧАЯ , т.13 , в.2 , 1982.

5. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы математической физики. М., Изд-во иностранной литературы, 1960.

6. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М., "Мир", 1984 .

7. Сыровой В.А. РЭ, 1985, т.30 , №4 , с.793.

8. Гердт В.П., Тарасов О.В., Ширков Д.В., УФН, 130 , №1 (1981).

9. Кирштейн П.Т., Кайно Г.С., Уотерс У.Е. Формирование электронных пучков. М., "Мир" , 1970.

10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. "Электродинамика сплошных сред". ГИТТЛ , М., 1957.

```
      [illegible](T[illegible]HT,[illegible])
      [illegible]//[illegible]
      [illegible]
      [illegible]AT([illegible]DS AM[illegible]*)
C*************************************************************
      [illegible](  UI[illegible])
C-------------------------------------------------------
      [illegible]( [illegible])
C*************************************************************
      [illegible]
      [illegible]( [illegible]<L([illegible]X.[illegible])=*)
      [illegible]
      [illegible]( [illegible] )
      [illegible]
      [illegible]( [illegible])
      [illegible] TO [illegible]
C
C++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      [illegible]( J[illegible])
C++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
```

[illegible]

```
/ 89
*41*
*3+
ROW (1X,I5),MIN (1X,I
)*,/)
A(I)=
*X**2/2.+AL( )*X**
3/6.
(X-X( )).LT. . ) GO TO 33
```

[illegible]

```
                                                          *IXD
                                                           (I)
                                       PAC *./)
                          (I)*,          (I)/X0*,
                                                      /)
          Z.        A(I),   X(I),  NCA(I), I=1,NNMAX)
          AT(

                                                    (I)/TETA(
                                                           I)
          AT(    (R W)     T (  W)      T  ( IF.EQ.)
                                       (  IF.EQ.)*)
                   (I),   X(I),       (I),    X(I),I=1,NNM
                                                        AX)
          AT(
                     (I+ )-        )/(
             X X(  )   *   XX(   )+   XX(  )
                                      )+ EXX
                                      (NCA-3)
     ( I)     T(  +   (I)**  )
                (I)/   X  ( )
             )**   +   (I)*   XX(I)-3X (I)**2)/G
                                        X (I)
            (NCA)**  *  Q/TETA(NCA)**  -  (NCA)
                 (NCA),GA,TETA(NCA)
          AT(   A(L  FT)  E1 .    *GA(   )=*E12.5
                                                   ,
   .*  TA(L    )  *
                    T( ), OT(  )
          AT(     A         2.5.*  A  =  12.5.*   OT(4)=*E1
                                                    2.5,
   ,*          )       2. )
          AT(       (L   T)=    E1 .5)
          AT(     (L  FT)      T      FROM  EQUAT.  W
                                          TETA(X)*,
   ,*      .  X,        FROM  EQUAT.  OF  GTH.*)
     KL
          AT(           KL  (IX,I )  IF  KL=     ---  REDEF
                                                IN      .*)
          AT(
          AT(          OT(4)=*    .5)
          AT(       IT        OT(4)   (IX,FR,  )*)
          AT(
C-----------------------------------------------------------
C                                  FOR               ,T    OLD
C-------                                 -------------
     (  )=-           *COT(  )*COT(4)-  .       *A  **3+
   +
     (4)=            *A**3-  .     8*COT(4)
```

[illegible]

```
[illegible] 789
[illegible] ( [illegible] K( [illegible] ) , IF K[illegible] --- ABER
                                                    R*)
[illegible] ( [illegible] )
[illegible] T [illegible]
[illegible] ( [illegible] )
[illegible] ( [illegible] ) [illegible] 10 [illegible]
[illegible]
[illegible] ( [illegible] IS=[illegible] )
[illegible] ( [illegible] ( [illegible] ) . IF [illegible] DRI
                                         [illegible] TUB[illegible]*)
[illegible] ( [illegible] )
[illegible] ( [illegible] ) [illegible] ( [illegible] )
```

```
C-----      [illegible] SQUARE EQUATION FOR DOT(+)      ---
                                                        ---
C     ------------------------------------------
      [illegible])*Z9
      [illegible]T+Z62
      [illegible]T+([illegible]1*Z[illegible])*Z9/
      [illegible]T+Z61
      [illegible]1+([illegible]1*Z[illegible]-Z1[illegible])*Z9/
      [illegible]T-Z12
      [illegible]
      [illegible]DOT(+)[illegible]
      [illegible]Z41*
      [illegible])/DET+
     +([illegible])/DET
      [illegible]*(Z41*Z2
      [illegible])/DET+
     +([illegible])/DET
      DOT(+)[illegible]
      [illegible]+DOT([illegible])*DP)/
      [illegible]X+D1
```

```
[illegible]
```

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```
[illegible] DOT(1)*DOT
                     (4) -
[illegible] T( )**2
[illegible] +1. [illegible]
[illegible] DOT( )+ [illegible] ./95
                      [illegible].*
[illegible] **+-.2
                     [illegible]23*
[illegible]
[illegible] Y=*(12
                     .5)
[illegible]
[illegible] +AL( )**[illegible]3/6
                     .
[illegible]
[illegible] /5
[illegible] FORMUL [illegible] 12.5)
```

```
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]

1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
1 [illegible]
```

```
[illegible] (XTN)
[illegible]
[illegible] (4), [illegible] A(9),[illegible](9), [illegible](9)
[illegible]
[illegible]
[illegible] *A1*
[illegible] 177-
[illegible] )*A1
**2
[illegible] +1?./ [illegible] )- [illegible] SQT(
4)
[illegible] (+,*3K**?+1.)
[illegible] ,*AL( )
[illegible] ,*AL
( )*A1
[illegible]
[illegible] +1.)/ [illegible]
[illegible] -A1(3)/ [illegible]
[illegible]
[illegible] )*A1*[illegible]
[illegible] )*77+51
[illegible] 112.
5)
[illegible] )+51./[illegible] .*A1**
2
[illegible]
[illegible] *AL(3)- [illegible] .*
AL( )*A1-
[illegible]
[illegible] SQT(4)- [illegible]./ 78.*AL( )+ [illegible]/3
1. [illegible] *A1**2
[illegible] 3K** [illegible] ./4 [illegible].)
[illegible] 3K**2+ [illegible] ./7 [illegible] SQT(1[illegible])-
7[illegible].+19/
/ [illegible] T( [illegible] SQT(4)*AL( )-9 [illegible] .53/ [illegible] 5.62
*SQT(4)*
[illegible] *AL( )* [illegible] ./.7.*AL(2
)**2-
[illegible] ./115.
[illegible] *A1*
[illegible]
[illegible] (7) [illegible]
[illegible]
CONTINUE
[illegible]
[illegible] (2,0 [illegible] ROW . [illegible],/
)
[illegible]
```

```
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]

1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]

1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
1[illegible]
```

[illegible] /83

```
[illegible] ,FDN2
[illegible] ,NST,
H
[illegible]
[illegible] .SPACE [illegible]
[illegible] STOP
[illegible]
[illegible] (1Y, 5,4)=[illegible])
[illegible]
[illegible] (X,L)
[illegible]
[illegible] (X,L)
[illegible]
[illegible] (X,L)
[illegible]
[illegible] (X,L)
[illegible] 10
```

```
[illegible] (T[illegible])
[illegible] ([illegible]).[illegible] ([illegible]).[illegible] ([illegible]).[illegible](12)
[illegible]
[illegible]
[illegible] ([illegible]).T([illegible]).T([illegible]).[illegible]A,F7
[illegible]
[illegible] ([illegible],I1
)*)
[illegible] STOP
[illegible] ([illegible]):*)
[illegible] DOT(4)**[illegible]12.
5,
[illegible]
[illegible] L([illegible])/[illegible]A
[illegible]
[illegible] DOT(4)**[illegible]
[illegible] T(4)+.[illegible]
[illegible]
[illegible] (NCA)-[illegible]
```

```
 [illegible]
                                                   *,*
                                          [illegible]*7,3)
 [illegible]
      [illegible] (1X,F[illegible])........FOR MAG[illegible]NS,
                                                  *,
     **[illegible].........[illegible]  AND SOURCE[illegible],/)
 [illegible]
      [illegible] (1X,[illegible])
 [illegible]
      [illegible]AT(1X,[illegible]K[illegible]=1X,F[illegible])
 [illegible]
C....  [illegible]  AND  [illegible]  ......
 [illegible]
C------------------------------------------
C     [illegible]
C----------------------
C....  [illegible] WITHOUT [illegible]...........
C------------------------------------------
 [illegible]
      [illegible]AT(1X,*[illegible]=*F[illegible],[illegible]=*F[illegible])
      [illegible]AT([illegible])
      [illegible]*X2=*F8.4,*X[illegible]=*F8.4,*X3=*F8.4,*X2=
                                          *F8.4)
      [illegible]AT(1X,*[illegible])
      [illegible]AT(*[illegible]F(1X,F8.4),PU(1X,F8.4)*,/)
 [illegible]
 7    [illegible](1X,F8.4),X2(1X,F8.4),X3(1
                                       X,F8.4),*,
     *[illegible](1X,F8.4)*,/)
      [illegible]AT(1X,F[illegible](1X,F8.4))
      [illegible]AT(*[illegible](1X,F8.4),XL[illegible](1X,F8.4),[illegible]L(1X
                                       ,F8.4)*,/)
      [illegible](1X,F8.4))
      FORMAT(*[illegible](1X,F8.4),[illegible](1X,F8.4)*)
      FORMAT([illegible])
 [illegible]
C------------------------------------------
C     WRITE [illegible]
C-----------------------------------------------------
```

```
C------------------------------------------------------------
      [illegible] (*[illegible] ),BLIK
     [illegible] GS(1X,[illegible])*,/)
      [illegible] (C[illegible])*)
C------------------------------------------------------------
      [illegible] BL1,BL3
      [illegible]
      [illegible] KLP=1 , IF CONS[illegible] SOLENOID
     *)
      [illegible] PARA[illegible] OF SOL[illegible] *,/
     )
      [illegible] (KG) (1X,F[illegible]) [illegible]
      [illegible] KLP=1 , IF CONTIN[illegible] *)
      [illegible]
C------------------------------------------------------------
C.....      [illegible]Y    [illegible] DRIFT TUBE  .......
      [illegible] (1X,F[illegible].4) CATHODE CURRENT ( K
     A )*)
      [illegible] (1X,F[illegible].4) RADIUS OF DRIFT TUBE
     , RADCAT (CM)*)
      [illegible] GO TO [illegible]
```

```
...IF YOU WANT TO CHANGE
```

/89

```
[illegible] (5.*P
**3*
[illegible] J(Y )
[illegible] YY* ( )/ [illegible]
[illegible] (YY [illegible]
[illegible] ( ) [illegible] T/(YY [illegible] X)
[illegible]
[illegible] ( )/ [illegible] (I)
[illegible]
[illegible] J=(X)
[illegible]
( )=.
( )=.
( )=-.
[illegible]
( )=.
( )=.
( )=.
( )=-.
```