

24

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

В.Л.Ауслендер, И.Л.Черток

ВЫПУСК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
ЧЕРЕЗ ФОЛЬГУ

ПРЕПРИНТ 82 - 31



Новосибирск

ВЫПУСК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ФОЛЬГУ

В.Л.Ауслендер, И.Л.Черток

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе рассмотрен ряд вопросов, связанных с разработкой систем выпуска пучка через окно, перекрытое вакуумно-плотной фольгой, для мощных электронных ускорителей, применяемых в промышленных радиационных установках; даны способы расчета выпускных окон при двух способах охлаждения фольги; проведена сравнительная оценка ряда материалов, используемых для изготовления фольги, дана оценка возможных предельных параметров указанных систем выпуска пучка.

Введение

В последние годы все большее применение в различных отраслях народного хозяйства находят ускорители электронов — мощные и удобные в эксплуатации источники радиации. Как показал опыт эксплуатации в промышленных и опытно-промышленных условиях, их применение дает весьма значительный экономический эффект, а в ряде случаев позволяет осуществить технологические процессы, недостижимые иными способами.

Для использования в радиационно-технологическом процессе электронный пучок, как правило, выводится в атмосферу при помощи системы выпуска пучка.

Наиболее распространенным является выпуск пучка, развернутого в линию, через окно, перекрытое тонкой вакуумноплотной фольгой; облучаемый объект движется поперек окна. В этом случае распределение плотности тока пучка вдоль окна задается развертывающим устройством в зависимости от требований технологии; распределение плотности тока в поперечном направлении зависит, в основном, от рассеяния электронов на фольге выпускного окна и в воздухе, т.е. от материала и толщины фольги выпускного окна, расстояния от фольги до объекта и энергии электронов. Типичное распределение плотности тока пучка в поперечном направлении приведено на рис. I. Доза, получаемая объектом, движущимся под выпускным окном, составляет (при энергии электронов 0,5-4 МэВ), ориентировочно,

$$D \approx 3000 \frac{j_n}{V}, \text{ где}$$

D — доза в Мрад, j_n — линейная плотность тока пучка в А/см, V — скорость движения объекта в м/сек.

В настоящее время увеличение единичной мощности ускорителей (разработаны ускорители на мощность 100 и более кВт, проектируются на единицы МВт), а также разработка ряда высокотемпературных радиационных процессов, требующих высокой мощности дозы, делает существенным создание выпускных устройств с предельными плотностями тока пучка.

В данной работе рассматривается ряд вопросов, связанных с разработкой систем выпуска пучка через окно, перекрытое фольгой.

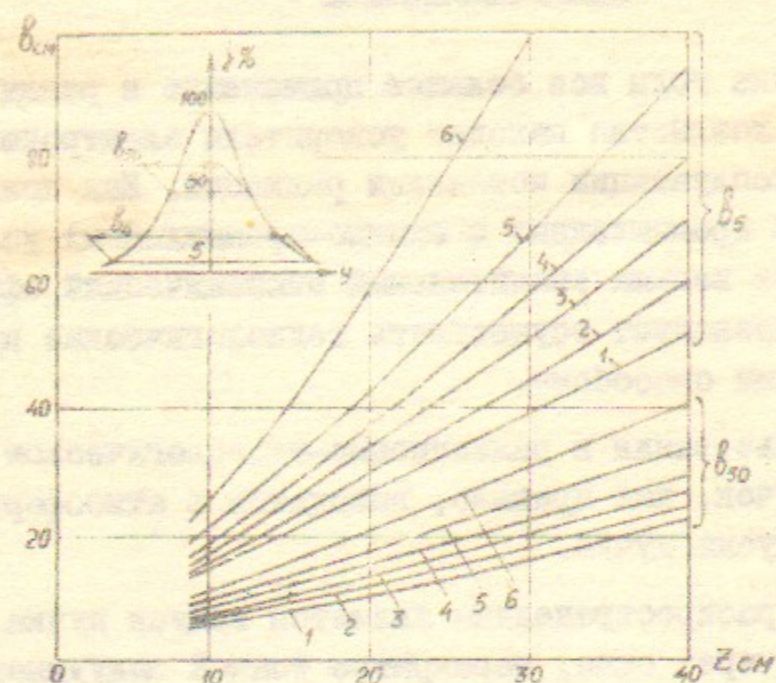


Рис.1. Распределение плотности тока пучка поперек выпускного окна (титан 0,05 мм).

Энергия электронов, МэВ: 1-1.8; 2-1.5; 3-1.2; 4-1.0; 5-0.8; 6-0.5

I. Материал фольги

Важнейшим элементом систем выпуска пучка является фольга, перекрывающая выпускное окно. От материала фольги зависят потери энергии пучка (следовательно коэффициент полезного действия системы) и максимальная плотность тока выпускаемого пучка (соответственно и габариты выпускного устройства при заданном токе пучка). Фольга должна обеспечивать возможность длительной (не менее 1000 часов) работы установки без нарушения вакуумной плотности. В связи с изложенным, на материал фольги накладываются следующие основные требования:

а) высокая радиационная стойкость; материал должен выдерживать дозу более 10^8 Мрад без существенных ухудшений механических свойств;

б) возможно малые потери энергии электронного пучка при проходе через фольгу;

в) высокая прочность и температуростойкость, обеспечивающие возможность применения фольги малой толщины для снижения потери

энергии пучка и значительный теплоперепад для облегчения охлаждения или повышения допустимой плотности тока электронного пучка;

г) высокая теплопроводность (при охлаждении фольги теплопередачей к холодным краям);

д) возможность получения промышленных партий вакуумноплотной фольги необходимой толщины и площади.

В связи с требованием высокой радиационной стойкости применение в системах выпуска пучка промышленных ускорителей фольг (пленок) из полимерных материалов (типа лавсан), используемых в некоторых лабораторных установках, невозможно, и основным материалом для изготовления фольг являются металлы. В наибольшей степени перечисленным выше требованиям соответствует следующие материалы: а) бериллий, б) алюминий и его сплавы; в) титан. Эти материалы обладают весьма высокой прочностью, радиационной стойкостью; их применение приводит к сравнительно малым потерям энергии пучка.

Потери энергии пучка при прохождении сквозь вещество определяются по соотношению

$$\Delta E = - \frac{dT}{d\delta}$$

где: dT - потери энергии на приращении пути,
 δ - толщина материала.

В свою очередь /1/

$$-\frac{dT}{d\delta} = - \frac{2\pi e^4 z N}{m_0 v^2} \left[\frac{e_n m_0 v^2 T}{2I^2(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + (1-\beta^2) + \frac{1}{8} (1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right]$$

где: $\frac{dT}{d\delta}$ - в эВ/см; N - число атомов в 1 см^3 вещества;
 z - заряд ядра; m_0 и v - масса покоя и скорость электрона; I - средний потенциал возбуждения.

На графике рис.2 приведена зависимость потери энергии пучка через рассматриваемые материалы от энергии электронов; из графика следует, что в интересующем нас диапазоне энергий электронов 0,5-4 МэВ потери энергии можно считать постоянными (с точностью 4%).

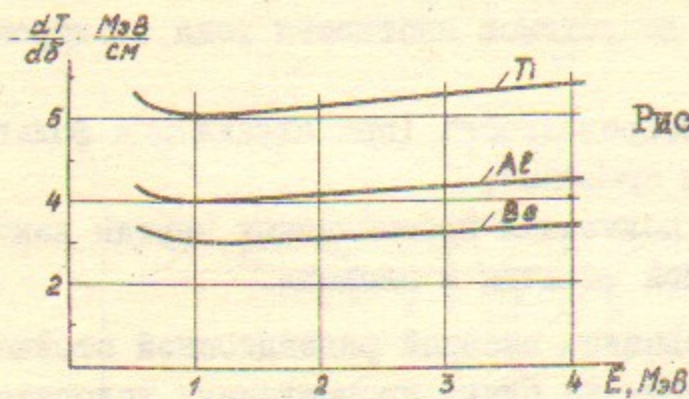


Рис.2. Потери энергии электроном

Усредненные значения удельных потерь энергии электронного пучка при прохождении через перечисленные материалы (ΔE) приведены в таблице I, при этом потери энергии в алюминиевых сплавах приняты равными потерям в чистом алюминии. В этой же таблице приведены основные теплофизические свойства этих материалов. При этом предельная рабочая температура фольги рассматри-

Таблица I. Характеристики материалов

Характеристика	Бериллий	Алюминий	Алюм. сплавы	Титан
$\Delta E \frac{\text{эВ}}{\text{см}}$	$3,5 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$
$\sigma_s \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	25	7+9	20	57+60
$\lambda \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	1,8	2	1,3	0,15
$c \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{град}}$	2,1	0,98	0,95	0,54
$\gamma \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	1,85	2,7	2,8	4,5
$t_p \text{ } ^\circ\text{C}$	450	100	200	450
$K_1 = \frac{\lambda (t_p - t_0)}{\Delta E}$	$216 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$49 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
$K_2 = \frac{\sigma_s (t_p - t_0)}{\Delta E}$	$3000 \cdot 10^{-6}$	$180 \cdot 10^{-6}$	$900 \cdot 10^{-6}$	$4000 \cdot 10^{-6}$

вается с учетом того, что фольга должна длительно работать в атмосфере, содержащей водяные пары, без следов окисления и без существенного снижения прочностных характеристик материалов. Помимо характеристик материалов в таблице I приведены коэффициенты $K_1 = \frac{\lambda (t_p - t_0)}{\Delta E}$ и $K_2 = \frac{\sigma_s (t_p - t_0)}{\Delta E}$, характеризующие возможности фольг из рассматриваемых материалов при различных способах охлаждения, при этом температура охлаждающей среды принята $t_0 = 30^\circ\text{C}$. Подробнее о коэффициентах K_1 и K_2 будет сказано ниже.

Характеристики материалов приведены, в основном, по [2,3]. Предел прочности фольг из титана и алюминия экспериментально проверен.

2. Охлаждение фольги

Энергия, теряемая электронным пучком при проходе через фольгу выпускного окна, расходуется, в основном, на нагрев фольги. Так как на нагрев фольги расходуется, в зависимости от материала, толщины фольги и энергии электронов, 2-6% общей мощности пучка, необходимо охлаждение фольги, осуществляемое тремя способами: теплопередачей к холодным краям окна за счет теплопроводности фольги, поверхностным охлаждением путем обдува фольги струей воздуха или иного газа и излучением.

Вопрос охлаждения фольги становится особенно острым при выпуске пучка с большой плотностью тока, поэтому ниже рассматривается охлаждение фольги при выпуске пучка с точки зрения получения максимальной плотности; ограничением при этом является максимальная рабочая температура материала фольги (табл. I).

Охлаждение теплопередачей к холодным краям окна

В этом случае, так как и потери энергии пучка и теплопроводность фольги пропорциональны ее толщине, толщина фольги не влияет на ее нагрев и, в общем случае, может быть записано следующее соотношение:

$$J_n \sim \frac{\lambda}{\Delta E} (t_p - t_0) = K_1$$

Значение K_1 для применяющихся материалов приведены в табл. I. Данные таблицы показывают, что наилучшими материалами в этом

случае являются бериллий и алюминиевые сплавы. Рассмотрим далее два типа выпускных окон: круглое и прямоугольное, предполагая, что через них проходит пучок электронов с постоянной плотностью, заполняющий всю площадь окна.

Если взять круглое окно радиуса R (рис.3а), то исходя из уравнения теплопроводности, можно записать следующее соотношение

$$q \cdot \pi z^2 = \lambda \cdot 2\pi z \left(-\frac{dt}{dz}\right)$$

где: z - текущая координата, $q = \frac{J_n \cdot \Delta E}{\pi R^2}$ - удельная мощность потерь в фольге единичной толщины;

И далее: $q z dz = \lambda \cdot 2 dt$

Интегрируя обе части в пределах от 0 до R и от t_p до t_0 получим: $q \frac{R^2}{2} = -2\lambda(t_0 - t_p)$ и, подставляя значение q :

$$J_n = \frac{4\pi\lambda}{\Delta E} (t_p - t_0) \quad \text{или} \quad J_n = 4\pi K_1 \quad (I)$$

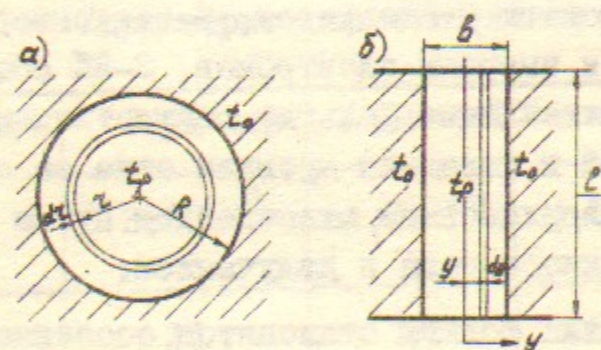


Рис.3. Охлаждение фольги теплопередачей к кромкам окна

Таким образом, максимальный допустимый ток пучка в этом случае не зависит от радиуса окна, а лишь от характеристики материала фольги. При применении окна из бериллия ток пучка может достигать $2,7 \cdot 10^{-3}$ А; использование фольги из алюминиевого сплава снижает ток пучка более, чем в 5 раз (табл. I).

Рассмотрим далее выпускное окно в виде щели шириной b и длиной l , причем примем $l \gg b$, что позволяет пренебречь охлаждением фольги торцевыми стенками окна (рис.3б). Общее уравнение теплопроводности в этом случае имеет вид

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = -\lambda q(y) \quad (2)$$

где q - удельные потери в фольге единичной толщины. Ниже приводится решение для четырех наиболее интересных вариантов распределение плотности тока пучка по выпускному окну:

1) Плотность тока пучка постоянна по всей площади окна, т.е. $q(y) = \text{Const} = \frac{J_n \cdot \Delta E}{b l}$. Решение уравнения (2):

$$t_0 - t_y = -\frac{q}{2\lambda} y^2 \quad \text{и, для } y = b/2, \text{ учитывая значение } q:$$

$$J_n = \frac{8\lambda l}{b \Delta E} (t_p - t_0) \quad \text{или} \quad J_n = 8K_1 \frac{l}{b} \quad (3)$$

2) Пучок круглого сечения диаметром $D = b$ при постоянной плотности тока по сечению пучка, развертываемый вдоль выпускного окна, т.е. $q(y) = q_0 \frac{\sqrt{(b/2)^2 - y^2}}{(b/2)^2}$ при $q_0 = \frac{4}{\pi} \frac{J_n \cdot \Delta E}{b l}$

Решение уравнения (2):

$$(t_0 - t_y) = -\frac{\lambda q_0}{(b/2)^2} \left[\frac{b^2}{4} \arcsin^2 \frac{y}{b} + \frac{b^2}{4} \sqrt{\frac{b^2}{4} - y^2} - \frac{1}{3} \left(\frac{b^2}{4} - y^2\right)^{3/2} \right] + \frac{\lambda q_0 \left(\frac{b}{2}\right)^2 \pi}{4}$$

и, для $y = b/2$, учитывая значение q_0 :

$$J_n = \frac{6,9\lambda l}{b \Delta E} (t_p - t_0) \quad \text{или} \quad J_n = 6,9K_1 \frac{l}{b} \quad (4)$$

3) Распределение плотности тока поперек выпускного окна соответствует нормальному распределению, т.е.

$$q(y) = q_0 \frac{1}{2\pi} e^{-y^2/2}$$

Численное решение уравнения (2) при $y = b/2 = 2$ (т.е. 95% тока пучка приходится на выпускное окно; при этом $q_0 = 1,6 \frac{J_n \cdot \Delta E}{b l}$) дает

$$J_n = 6,5K_1 \frac{l}{b} \quad (5)$$

4) Пучок круглого сечения с нормальным распределением плотности по сечению разворачивается вдоль выпускного окна, тогда

$$q(y) = q_0 \frac{1}{2\pi} e^{-y^2/2} \cdot \frac{\sqrt{(b/2)^2 - y^2}}{(b/2)^2}$$

Численное решение уравнения (2) при $y = b/2 = 2$ (при этом $q_0 = 1,9 \frac{J_n \cdot \Delta E}{bL}$) дает:

$$J_n = 5,6 K_1 \frac{L}{b} \quad (6)$$

Следовательно, допустимый ток пучка в этих случаях зависит как от материала фольги, так и от размеров окна. Из (3-6) видно, что, чем меньше ширина окна, тем больше допустимый ток на единицу его длины.

Поверхностное охлаждение

При поверхностном охлаждении фольги обдувом уравнение теплового баланса для единицы поверхности может быть записано следующим образом:

$$j \cdot \Delta E \cdot \delta = \alpha_M (t_P - t_0) \quad (7)$$

где: j - плотность тока пучка, α_M - местный коэффициент теплопередачи, δ - толщина фольги.

Рассмотрим выпускное окно определенной ширины b . В этом случае толщина фольги, определяемая из условий сохранения прочности (фольга должна выдерживать атмосферное давление), будет обратно пропорциональна пределу прочности материала на разрыв (σ_B , табл. I) и, учитывая (7), можно записать следующее соотношение:

$$j \sim \frac{\sigma_B (t_P - t_0)}{\Delta E} = K_2 \quad (8)$$

Коэффициент K_2 , характеризующий качество материала фольги при поверхностном охлаждении приведен в табл. I. Согласно таблице, лучшими качествами в этом случае обладает титан, что и определяет его широкое применение как материала для изготовления фольги для выпускных систем промышленных ускорителей.

Критерием работоспособности фольги выпускного окна, исходя из (7), является:

$$t = \frac{j \Delta E \delta}{\alpha_M} + t_0 \leq t_P \quad (9)$$

где: t - температура фольги, t_P - максимальная рабочая температура фольги (табл. I) и, следовательно, для оценки макси-

мальной допустимой плотности тока электронного пучка необходимо найти местный коэффициент теплопередачи α_M . Расчет ведется по местному коэффициенту теплопередачи, так как при обдуве фольги при помощи щелевого сопла коэффициент теплопередачи изменяется в зависимости от расстояния от выходного конца сопла и расчет необходимо вести по наиболее опасной зоне впускного окна (при $j = \text{const}$ - по зоне, наиболее удаленной от выходного конца сопла).

Расчет коэффициента теплопередачи при обдуве плоской пластины щелевым соплом приведен в [4] и, учитывая параметры воздуха при $t = 30^\circ\text{C}$ ($Pr = 0,72$; $\lambda = 2,67 \cdot 10^{-2}$ Вт/м.град; $\nu = 1,6 \cdot 10^{-5}$ м²/сек), можно принять

$$\alpha_M = 18,8 \frac{S^{0,4} W_s^{0,8}}{y^{0,6}} \quad (10)$$

где α_M - Вт/м².град; S - м; W_s - м/сек; y - м.

Уравнение справедливо при $16 < \frac{y}{S} < 400$, $Re_s = \frac{W_s \cdot S}{\nu} > 50$.

На рис. 4. приведен график местного коэффициента теплоотдачи и допустимой плотности тока пучка (фольга-титан, 50 мк), рассчитанные по (10).

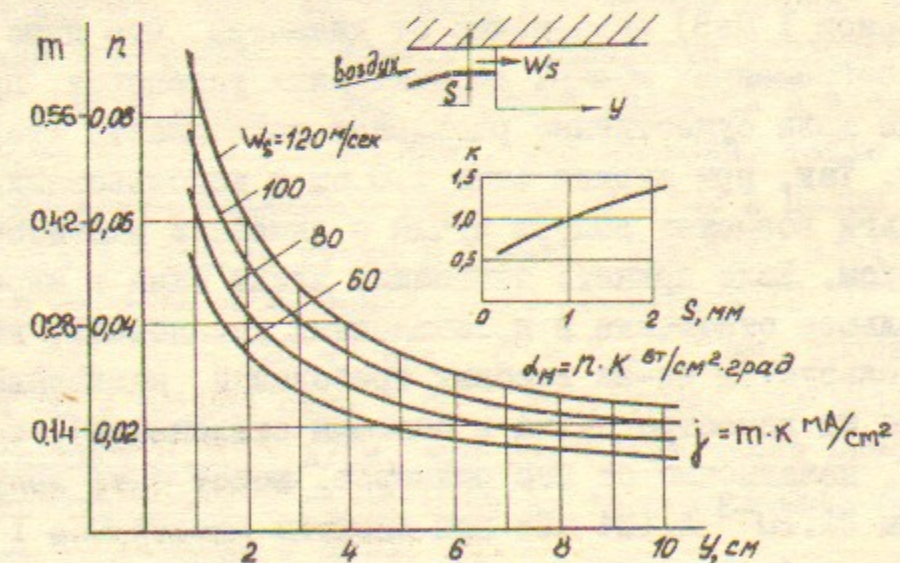


Рис. 4. α_M - местный коэффициент теплоотдачи и j - допустимая плотность тока пучка (фольга-титан, 0,05 мм) при обдуве фольги щелевым соплом.

Охлаждение излучением

При температуре $300+500^{\circ}\text{C}$ коэффициент черноты титана и бериллия составляет около $0,2 + 0,3$, следовательно при рабочей температуре фольги 450°C и температуре окружающей среды 30°C излучением может быть обеспечен теплосъем $0,3+0,45 \text{ Вт/см}^2$, что обеспечивает, при толщине фольги 50 мк , выпуск пучка с плотностью $(10+15) \cdot 10^{-6} \text{ А}$ для титана и, соответственно, $(18+27) \cdot 10^{-6} \text{ А}$ для бериллия. Для фольг из алюминия и его сплавов, учитывая пониженные коэффициент черноты и рабочую температуру, допустимая плотность пучка существенно снижается.

В связи с весьма низкой допустимой плотностью тока пучка охлаждение фольги излучением не находит применения в современных мощных электронных ускорителях в качестве самостоятельного способа охлаждения, и может быть учтено при организации охлаждения фольги двумя выше рассмотренными методами.

Применение рассматриваемых методов охлаждения

Рассмотрим возможности использования окон с охлаждением фольги путем теплопередачи к охлаждаемым кройкам. Окно круглой формы обеспечивает, как было сказано выше, при применении бериллиевой фольги выпуск пучка с током $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ ($2,7 \text{ кВт}$ при энергии электронов 1 МэВ) независимо от диаметра, что явно недостаточно для современных мощных промышленных установок. Применение окна в виде щели существенно расширяет возможности этого вида охлаждения. Так, при ширине окна $1,0 \text{ см}$ и использовании бериллиевой фольги возможен выпуск пучка с линейной плотностью $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}$. Если принять отношение длины окна к ширине равное 20 (большее отношение в промышленных установках, как правило, не используется из-за высоких требований, накладываемых в этом случае на качество пучка и системы отклонения), то через такое окно, независимо от его размеров, может быть выпущен пучок с током $34 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ (34 кВт при энергии электронов 1 МэВ), следовательно подобное окно может быть применено с большинством существующих промышленных ускорителей.

Все сказанное выше относится к окнам из бериллиевой фольги и $q = \text{const}$. Применение другого материала фольги и много распределение плотности тока пучка приводит к снижению допустимой

мощности пучка (в соответствии с изменением коэффициента K , и соотношениями (4), (5), (6)).

Применение поверхностного охлаждения фольги обдувом струей воздуха позволяет иметь весьма весьма высокие как плотность тока пучка, так и линейную его плотность. Лучшим материалом при этом, как рассматривалось выше, является титан.

На действующих в настоящее время ускорителях типа ИЛУ-6 и ЗЛВ устойчиво работают окна из титановой фольги толщиной $0,05 \text{ мм}$ при плотности тока пучка порядка $0,1 \text{ МА/см}^2$ (ширина окна 7 см , скорость воздушного потока 80 м/сек). Расчетная предельнодопустимая плотность тока в этом случае составляет около $0,15 \text{ МА/см}^2$, коэффициент запаса $1,5$ гарантирует защиту окна от случайных изменений рабочих параметров ускорителей.

В принципе, при применении титановой фольги могут быть достигнуты плотности тока пучка более $3 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$ (например, при $W_s = 120 \text{ м/сек}$; $\delta = 2 \text{ мм}$; $y = 2 \text{ см}$ и $\delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$; $j = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$).

Линейная плотность тока пучка, если не учитывать изменение местного коэффициента теплопередачи в зависимости от изменения ширины окна, не зависит от толщины фольги, так как изменение толщины фольги и, следовательно, изменение тепловой нагрузки на нее компенсируется соответственным изменением ширины окна. Однако, учитывая увеличение среднего коэффициента теплопередачи при уменьшении ширины окна, более выгодным является применение более тонкой фольги и более узкого окна, что приводит также и к повышению коэффициента полезного действия системы в целом за счет снижения потери энергии пучка в фольге. Линейная плотность пучка при этом способе охлаждения может достигать $10 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}$ (например, при $W_s = 120 \text{ м/сек}$; $\delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$; среднем значении $y = 4 \text{ см}$ и ширине окна 4 см — допустимая линейная плотность пучка составляет $8 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}$, что позволяет через окно длиной 80 см выпустить пучок с током $0,64 \text{ А}$, то есть мощностью 640 кВт при энергии электронов 1 МэВ).

Л и т е р а т у р а

1. Радиационная дозиметрия. Под ред. Д.Хайна и Г.Браунелла. Иностранная литература, Москва, 1958.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. Физматгиз, Москва, 1959.
3. Финлянд М.А., Семенова Е.И. Свойства редких элементов. Металлургия, Москва, 1964.
4. Волчков Э.П., Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Взаимодействие затопленной турбулентной струи с твердой стенкой. ПМТФ № 2, 1965, с.50.

В.Л.Ауслендер, И.Л.Черток

ВЫПУСК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ФОЛГУ

Препринт

№ 81-31

Работа поступила - 19 февраля 1982 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 15.03-1982 г. МН 03155

Формат бумаги 60x90 1/16. Усл. 1,0 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Заказ № 31. Бесплатно

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90