

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

621.384.62

ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ — НОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**Ю. П. Вахрушин, И. М. Матора****СОДЕРЖАНИЕ**

1. Введение	117
2. Принцип работы	117
3. Вихревое электрическое поле	120
4. Ускоряющая система	123
5. Удержание поперечных размеров пучка	128
6. Параметры ускорителей. Конструкция основных систем	131
7. Заключение	136
Цитированная литература	136

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие исследований в области управляемого термоядерного синтеза¹ и новых методов ускорения² привело к созданию в начале 60-х годов новых линейных ускорителей мощных пучков релятивистских электронов³⁻⁵, принцип работы которых был предложен Боверси⁶ еще в конце 30-х годов.

Использование этих так называемых *линейных индукционных ускорителей* (ЛИУ) уже позволило провести исследования по программе «Астрон»⁷ в США, а в СССР — известные дубненские эксперименты по отработке коллективного метода ускорения⁸⁻¹¹.

Эксплуатация первых двух действующих ЛИУ (рис. 1 и 2) показала, что этот весьма простой метод ускорения является перспективным, так как он позволяет при к. п. д. в десятки процентов получать релятивистские пучки в сотни и тысячи ампер при хорошей надежности и повторяемости результатов. В ряде лабораторий уже ведутся интенсивные разработки ЛИУ¹²⁻¹⁸, развивается их теория, методы расчета, происходит совершенствование конструкции. Ведутся исследования безжелезных и плазменных ускорителей этого типа¹⁹⁻²³.

В обзоре систематизируются и обобщаются результаты известных авторам работ в области этого нового направления ускорительной техники.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

На рис. 3 приведена конструктивная схема индукционной системы ЛИУ, поясняющая принцип действия ускорителя. При изменении в сердечниках магнитного потока в ускорительной трубке в соответствии с законом электромагнитной индукции возбуждается вихревое электрическое

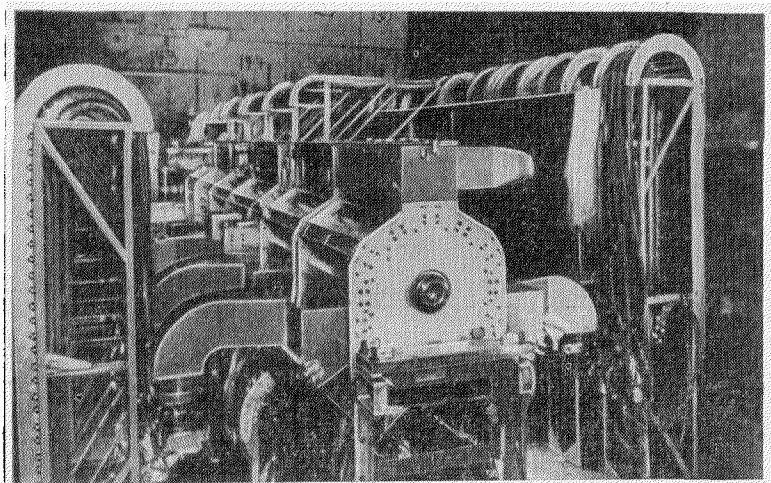


Рис. 1. Инжектор установки «Астрон».
Энергия пучка 3,7 Мэв, ток 350 а.

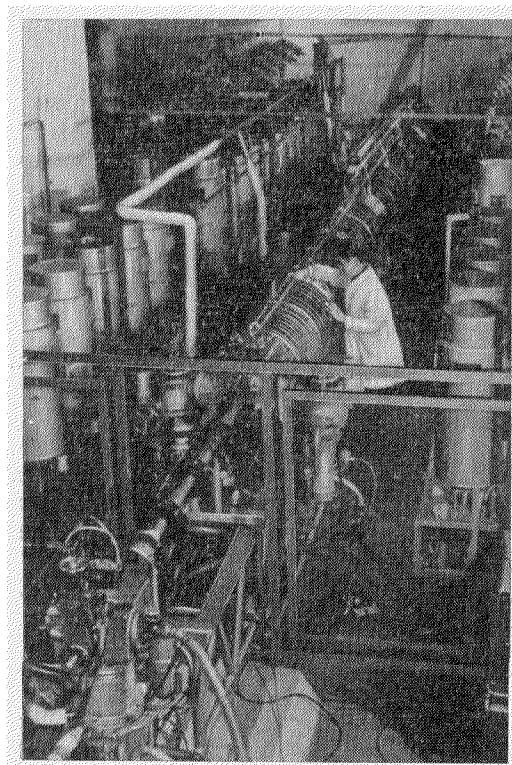


Рис. 2. Ускоритель ЛИУ-3000.
Энергия пучка 3 Мэв, ток 200 а.

поле. При достаточной протяженности системы среднее значение напряженности поля E_0 на оси системы можно записать в виде

$$E_0 = -(N/\mathcal{L}) S \partial B/\partial t, \quad (1)$$

или

$$E_0 = N U_1 / \mathcal{L}, \quad (2)$$

где N — число сердечников, S — сечение одного сердечника, B — среднее по сечению значение индукции в сердечнике, U_1 — прикладываемое к первичной обмотке напряжение, \mathcal{L} — длина системы, $\partial B/\partial t$ — скорость изменения индукции в сердечнике.

Требование моноэнергетичности пучка электронов ведет к необходимости поддержания линейного изменения индукции в течение рабочей части времени τ_i импульса.

В этом случае (1) принимает вид

$$E_0 = -(N/\mathcal{L}) S \Delta B / \tau_i, \quad (3)$$

где ΔB — приращение индукции за время импульса τ_i .

Можно показать, что энергия, передаваемая пучку электронов за время импульса, определяется выражением

$$W_1 = I_n \Delta B S N,$$

где I_n — ток пучка.

Видно, что эта энергия пропорциональна изменению потока в сердечнике индуктора и не зависит от длительности импульса. Для полного использования материала сердечника следует перед подачей импульса напряжения на первичную обмотку перевести сердечник в область отрицательного насыщения, что почти всегда и делается^{4,5}. Этот процесс обычно называется *размагничиванием*. Максимально возможная величина тока ускоряемых электронов при наличии фокусировки, достаточной для компенсации расталкивающего действия сил пространственного заряда, определяется в основном мощностью коммутирующего элемента в первичной цепи системы, и в настоящее время ускорение пучка с током в десяток килоампер представляется реальным.

Длительность импульса ускоряющего напряжения в ЛИУ принципиально может быть любой. Однако рост поперечного сечения сердечника индуктора при увеличении длительности импульса свыше нескольких микросекунд в соответствии с (3) приводит к таким размерам индукционной системы, при которых вес ферромагнитного материала сердечников становится неприемлемо большим. При длительности импульса меньше нескольких десятков наносекунд потери энергии на перемагничивание сердечника достигают величины, при которой использование ферромагнетика в ускорителе становится малоэффективным. Для этой области длительности импульсов могут быть применены безжелезные линейные индукционные ускорители²². Можно полагать, что диапазон

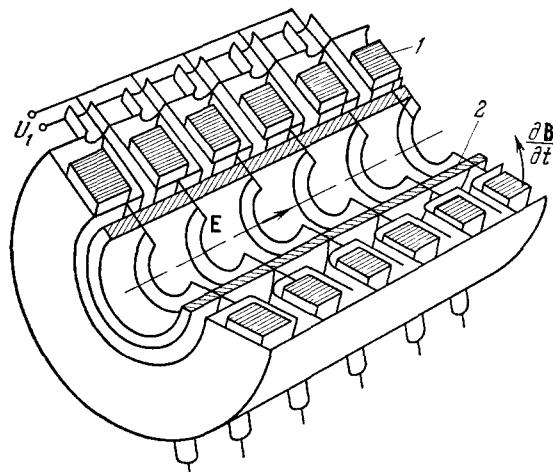


Рис. 3. Схема индукционной системы ЛИУ.
1 — ферромагнитный сердечник, 2 — ускорительная трубка.

длительностей импульсов для ЛИУ с ферромагнитными сердечниками лежит в интервале 20—700 нсек.

В ЛИУ, как и в высокочастотных линейных ускорителях, ускоряющее поле распределено вдоль всего ускорителя и нет зазора, к которому прикладывалось бы полное напряжение, соответствующее полной энергии ускоренного пучка. Это позволяет обходиться без громоздкого и опасного в эксплуатации газового хозяйства, увеличивать конечную энергию простым наращиванием числа ускорительных элементов. С другой стороны, в ЛИУ сохраняются достоинства трансформаторных установок, дающих возможность ускорять пучки с током в сотни и тысячи ампер при высоком к. п. д., что недоступно высокочастотным линейным ускорителям. Кроме того, как следует из (2), в ЛИУ может быть обеспечено получение пучка как с постоянной в течение импульса энергией, так и с изменяющейся по наперед заданному закону путем задания надлежащей формы импульса первичного напряжения.

3. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Известно, что уравнения Максвелла для вихревого электрического поля \mathbf{E} и создаваемого постоянными токами магнитного поля \mathbf{H} аналогичны.

Поэтому для определения ускоряющего электрического поля можно воспользоваться известными решениями для магнитного поля постоянных токов, заменив в них вектор плотности \mathbf{j} на $\partial\mathbf{B}/\partial t$ ^{24,25}. Однако в рабочей области ЛИУ всегда имеются электропроводящие элементы (первичная обмотка, электроды ускорительной трубы и т. п.), вследствие чего для точного расчета распределения \mathbf{E} следует решать уравнение Лапласа с соответствующими граничными условиями, задаваемыми конструкцией индукционной системы^{4,25}.

В индукционной системе ЛИУ-3000⁵ может поддерживаться вакуум без применения ускорительной трубы, а свое-

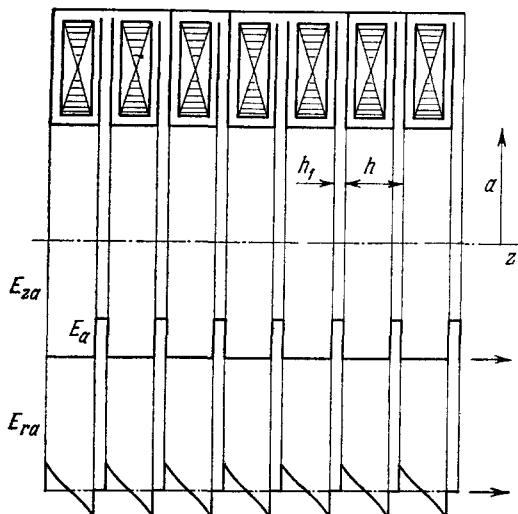


Рис. 4. Схема и граничные условия индукционной системы ЛИУ-3000.

образными электродами являются первичные обмотки. Схема такой системы и распределение поля на внутренней ее границе даны на рис. 4. В этом случае решение уравнений Лапласа для составляющих поля будет иметь вид²⁶

$$E_z = A_1 I_0 (k_1 r) [B_1 \cos (k_1 z) + C_1 \sin (k_1 z)], \quad (4)$$

$$E_r = A_2 I_1 (k_2 r) [B_2 \cos (k_2 z) + C_2 \sin (k_2 z)]; \quad (5)$$

здесь $I_0 (k_1 r)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $I_1 (k_2 r)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка, $A_{1,2}$, $B_{1,2}$, $C_{1,2}$, $k_{1,2}$ — постоянные, определяемые граничными условиями.

Граничные условия представляют собой периодическую функцию, которую можно разложить в ряд Фурье и, следовательно, записать в виде

$$E_{z,a} = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^m \alpha_n \cos \left(n \frac{2\pi}{T} z \right) + \sum_{n=1}^m \beta_n \sin \left(n \frac{2\pi}{T} z \right), \quad (6)$$

$$E_{r,a} = \frac{\gamma_0}{2} + \sum_{n=1}^m \gamma_n \cos \left(n \frac{2\pi}{T} z \right) + \sum_{n=1}^m \delta_n \sin \left(n \frac{2\pi}{T} z \right). \quad (7)$$

Для граничных условий имеем

$$E_{z,a} = 0 \quad \text{при } 0 \leq z < (h - h_1)/2, \quad (8)$$

$$E_{z,a} = E_a \quad \text{при } (h - h_1)/2 < z \leq h/2. \quad (9)$$

Определив с помощью (6) — (9) постоянные в (4), получаем выражение для E_z

$$E_z = \eta E_a \left[1 + \sum_{n=1}^m E_n I_0 \left(n \frac{2\pi}{h} r \right) \cos \left(n \frac{2\pi}{h} z \right) \right], \quad (10)$$

где

$$E_n = (-1)^n 4 \cos \left(n \frac{\pi}{2} \eta \right) \sin \left(n \frac{\pi}{2} \eta \right) / \pi \eta n I_0 \left(n \frac{2\pi}{h} a \right),$$

$$\eta = h_1/h.$$

Нетрудно видеть, что

$$\eta E_a = U_1/h = E_0.$$

Тогда (10) запишется в виде

$$E_z = E_0 \left[1 + \sum_{n=1}^m E_n I_0 \left(n \frac{2\pi}{h} r \right) \cos \left(n \frac{2\pi}{h} z \right) \right]. \quad (11)$$

Член $I_0(n \cdot 2\pi a/h)$ очень быстро растет с увеличением n , и поэтому в достаточно большой, наиболее интересной области с достаточной точностью можно ограничиться первым членом ряда.

Для иллюстрации отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей показано на рис. 5, а для нескольких значений a/h и h_1/h . Видно, что основное значение имеет величина отношения a/h и для достаточно однородного поля необходимо иметь $a/h > 1$. Исходя из условий, что граничная функция для радиальной составляющей нечетная, а в области, где $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ (что имеет место внутри системы),

$$\partial E_z / \partial r = \partial E_r / \partial z,$$

из уравнений (5) и (7) получаем выражение для радиальной составляющей

$$E_r = E_0 \sum_{n=1}^m E_n I_1 \left(n \frac{2\pi}{h} r \right) \sin \left(n \frac{2\pi}{h} z \right). \quad (12)$$

Отношение первой гармоники E_{r1} к E_0 показано на рис. 5, б.

Приведенные выражения получены без учета искажения поля на краю системы. Анализ ослабления поля вблизи края системы²⁷ показывает, что уже на расстоянии от края, равном трем диаметрам отверстия ($\sim 6a$), поле на оси с достаточной для практики точностью равно E_0 .

Анализ системы с ускорительной трубкой и электродами в виде дисков (см. рис. 3) дает выражения для поля вида^{4,25}

$$E_z = E_0 \left\{ 1 + \sum_{n=1}^m \alpha_n \left[I_0 \left(n \frac{2\pi}{h} r \right) / I_0 \left(n \frac{2\pi}{h} a \right) \right] \cos \left(n \frac{2\pi}{h} z \right) \right\}, \quad (11a)$$

$$E_r = \sum_{n=1}^m \delta_n \left[I_1 \left(n \frac{2\pi}{h} r \right) / I_1 \left(n \frac{2\pi}{h} a \right) \right] \sin \left(n \frac{2\pi}{h} z \right), \quad (12a)$$

где α_n и δ_n определяются условиями на границе. Как и в предыдущем случае, однородность поля в значительной степени определяется величиной отношения a/h , если a — диаметр отверстия в электродах, а h — расстояние между ними.

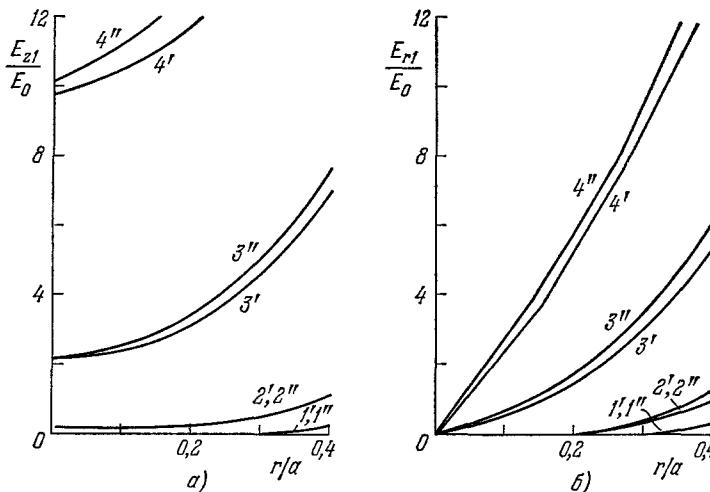


Рис. 5. Отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей (%).
а) осевая составляющая; б) радиальная составляющая. $a/h = 2$ (1), 1,5 (2), 1 (3) и 0,75 (4); $h_1/h = 1/4$ (1'—4') и $1/8$ (1''—4'').

При необходимости однородность поля может быть улучшена, если в рабочую область ввести электропроводящий цилиндр^{28,29}. Во время импульса по цилиндру будет протекать ток

$$\mathbf{j}_a = \varepsilon \partial \mathbf{E}_a / \partial t + \sigma \mathbf{E}_a$$

при $|\varepsilon \partial \mathbf{E}_a / \partial t| \ll |\sigma \mathbf{E}_a|$, что хорошо выполняется в диапазоне длительностей импульсов, характерных для ЛИУ,

$$j_a = \sigma E_a. \quad (13)$$

Из⁷ (13) и уравнения непрерывности заряда следует, что при $\sigma = \text{const}$ $E_a = \text{const}$. Этому условию удовлетворяет требование $\eta = 1$ в уравнении (10), откуда следует, что амплитуда гармоник равна нулю во всей области внутри цилиндра. Величина электропроводности выбирается исходя из целого ряда условий²⁹, и, например, для проектируемой установки ЛИУ-30/250¹² электропроводность квадрата поверхности лежит в диапазоне 10^{-4} — 10^{-3} ом⁻¹. Проводящий цилиндр может быть выполнен из вакуумно-плотной керамики с нанесенным на внутреннюю поверхность проводящим слоем и заменяет собой секционированную ускорительную трубку действующих ускорителей^{4,5}.

4. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Под ускоряющей системой ЛИУ понимается индукционная система в совокупности с системой формирования прямоугольного импульса ускоряющего напряжения. Иногда под ускоряющей системой понимают только индукционную. Однако это не совсем точно, поскольку индукционная система является одним из элементов единого сильноточного контура, все элементы которого влияют на форму и величину импульса ускоряющего напряжения, особенно в наносекундном диапазоне. На рис. 6 приведена упрощенная схема ускоряющей системы, которая условно

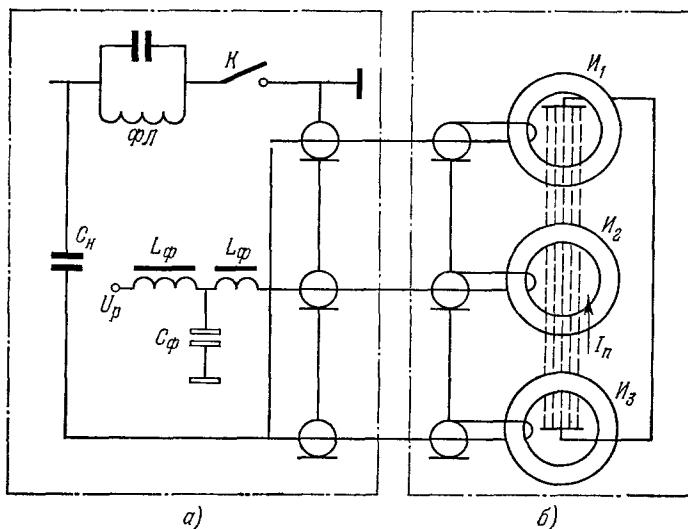


Рис. 6. Упрощенная схема ускоряющей системы.

а) Импульсная система; б) индукционная система; $\Phi\text{Л}$ — формирующая линия, K — ключ, C_H — накопительная емкость, U_p — напряжение размагничивания, C_ϕ — емкость фильтра, L_ϕ — индуктивность фильтра, $U_{1,2,3}$ — индукторы.

разделена на индукционную систему и систему формирования импульса, или, иначе, — импульсную систему.

Хотя качественно индукционная система ЛИУ и представляет собой набор одновитковых импульсных трансформаторов, применение метода расчета, используемого при проектировании импульсных трансформаторов, работающих в микросекундном диапазоне ³⁰⁻³², оказывается неудовлетворительным, особенно при использовании ферромагнетика с прямоугольной петлей гистерезиса ППГ ^{33,34}. Это вызвано следующим.

Во-первых, в теории импульсных трансформаторов рассматриваются процессы в сердечниках, выполненных из электротехнической стали, для которой характерна близкая к прямолинейной зависимость ΔB от H ³⁰. Сравнительные же эксперименты показали, что более высокий к. п. д. в ЛИУ можно получить при использовании прецизионных магнитомягких сплавов с узкой, близкой к прямоугольной петлей гистерезиса. В частности, в действующих ускорителях ^{4,5} применен железо-никелевый сплав 50НП. Процессы перемагничивания для этих сплавов имеют свои особенности ³⁵. При длительности импульса ускоряющего напряжения в десятки наносекунд возможно использование магнитомягких ферритов ^{23,28}. Исследование их характеристик перемагничивания показало, что ферриты марганец-цинковой группы имеют характеристики, по форме близкие к характеристикам сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ).

Во-вторых, при характерных для ЛИУ длительностях импульсов в десятки и сотни наносекунд толщина ленты, из которой изготавливаются сердечники, выбирается в интервале 10—20 мкм. При такой толщине действие вихревых токов соизмеримо с действием магнитной вязкости³⁵, что не учитывается в теории импульсных трансформаторов. Перемагничивание сердечника из ферромагнетика с ППГ с учетом вихревых токов и магнитной вязкости изложено в ряде работ, например³⁵⁻³⁷, и с достаточной для практики точностью описывается уравнением

$$H(t) = H_0 + g(B) dB/dt; \quad (14)$$

здесь H_0 — поле старта, величина которого зависит от марки материала и в несколько раз превышает коэрцитивную силу

$$g(B) = (\sigma d^2/8B_r)(B + B_r) + [R_m(1 - B^2 B_s^2)]^{-1}, \quad (15)$$

где B_r , B_s — остаточная индукция и индукция насыщения, d — толщина ленты, из которой навит сердечник, σ — электропроводность ферромагнетика, R_m — постоянная, имеющая размерность ом/м, величина; R_m зависит от марки материала. Первый член в правой части характеризует действие вихревых токов, для ферритов он равен нулю. Второй член обусловлен магнитной вязкостью и имеет место как для ферритов, так и для металлических ферромагнетиков.

Расчеты и эксперименты показывают, что для металлических сердечников первым членом можно пренебречь при толщине ленты меньше 5 мкм, а вторым — при толщине ленты больше 30—40 мкм. В ЛИУ используются ленты толщиной 10—20 мкм; так как применение ленты тоньше 5 мкм встречает технологические трудности, а стоимость ее сравнительно высока. При толщине же ленты больше 20 мкм падает к. п. д. и ухудшается использование материала³⁸.

Проинтегрировав (14) по времени, получаем

$$\int_0^t [H(t) - H_0] dt = \int_{B_{\text{нач}}}^{B(t)} g(B) dB. \quad (16)$$

Интеграл в левой части называется импульсом поля, и при полном перемагничивании его значение не зависит от длительности и формы перемагничивающего напряжения и тока, так как

$$\int_0^\tau [H(t) - H_0] dt = \int_{-B_s}^{+B_s} g(B) dB = g_1(+B_s) - g_1(-B_s) = S_0,$$

где τ — длительность импульса при полном перемагничивании. Импульс поля при полном перемагничивании называется *коэффициентом переключения* и представляет собой количество электричества, отнесенное к единице длины сердечника и необходимое для его полного перемагничивания.

После интегрирования (16) с учетом (15) получаем выражение для импульса поля

$$\int_{B_{\text{нач}}=-B_r}^{B(t)} g(B) dB = \frac{\sigma d^2}{16B_r} [B(t) + B_r]^2 + \frac{B_s}{R_m} \left[\operatorname{arcth} \frac{B_r}{B_s} + \operatorname{arcth} \frac{B(t)}{B_s} \right]. \quad (17)$$

Наклон кривых перемагничивания резко изменяется при $B > 0,75B_s$. Поэтому обычно нецелесообразно перемагничивать сердечник до $B > B_r$. Принимая во внимание то, что в интервале $-B_r \leq B \leq B_r$ функцию arcth можно приближенно представить линейной функцией, из (17) получаем импульс поля

$$Q(\lambda) \approx (B_r \sigma d^2/4) \lambda^2 + (2B_s/R_m) \operatorname{arcth} (B_r/B_s) \cdot \lambda,$$

где $\lambda = \Delta B(t)/2B_r$. При $\lambda = 1$ из (17) следует

$$S_{\Theta} = S_{\Theta e} + S_{\Theta \theta}.$$

где $S_{\omega e}$ — составляющая коэффициента переключения, обусловленная действием вихревых токов, а $S_{\omega 0}$ — обусловленная действием вязкости. Далее,

$$Q(\lambda) = S_{\omega e} \lambda^2 + S_{\omega 0} \lambda. \quad (18)$$

Продифференцировав (18) по t , с учетом того, что при прямоугольном импульсе напряжения $d\lambda/dt = 1/\tau$, получаем

$$H(t) = H_0 + (S_{\omega 0}/\tau) + (S_{\omega e}/B_r) (\Delta B(t)/\tau). \quad (19)$$

Видно, что с точностью до принятых допущений динамическая петля гистерезиса расширяется за счет поля старта и магнитной вязкости и имеет наклон, обусловленный вихревыми токами. В табл. I приведены расчет-

Таблица I

Значение коэффициента переключения $S_{\text{пер}}$ (мккул/м) для ряда сплавов

	Э, ЭА, ЭАА	65НП	45НП, 50НП	79НМ, 79НМА	80НХС	42НС	38НС, 50НХС	Карбо- ниль- ное железо	
Электропро- водность, $10^{-6} \text{ } \text{1/ом} \cdot \text{м}$	10	4	2,22	1,8	1,58	1,17	1,17	0,18	
Перепад ин- дукции, тл	4	2,5	2,8	1,4	1,3	1,8	1,8	0,5	
Толщина ленты, мкм	3 5 10 20 30 50 100	50 130 500 2 000 4 500 12 500 50 000	10 30 130 500 1 130 3 120 12 500	10 20 80 310 700 1940 7780	— 10 30 130 280 790 3150	— 10 30 100 230 640 2550	— 10 30 110 240 660 2630	— 10 30 100 230 630 2500	S_{ω}

Таблица II

Характеристики наиболее употребительных магнитомягких материалов

Марка сплава	Толщина ленты $d, \text{мкм}$	Остаточная индукция $B_r, \text{тл}$	Коэрцитивная сила $H_c, \text{а/м}$	Поле старта $H_0, \text{а/м}$	Полный коэффициент переключения $S_{(0)}, \text{мккул/м}$
50НП	5	1,4	40	110 — 120	110
	10	1,4	28	75 — 100	160
	20	1,3	20	55	330
	5	1,5	24	145	80
34НКМП	10	1,45	16	130	145
	5	—	—	—	—
79НМ	3	0,7	12	24	32
	5	0,8	8	20	48
	10	—	—	40	40
	—	—	—	—	—

ные значения $S_{\omega e}$ для наиболее употребительных материалов ³⁹. В табл. II указаны также измеренные значения полного коэффициента переключения ³⁵.

Реальная кривая перемагничивания несколько отличается от (19), и точные значения перемагничивающего поля должны находиться по экспериментальным характеристикам^{40,41}. Нелинейный вид характеристики перемагничивания усложняет аналитическое рассмотрение процессов в индукционной системе. Эквивалентная схема элемента индукционной

системы (индуктора) показана на рис. 7³⁴. Схема содержит генератор тока намагничивания i_m

$$i_m(t) = \pi D_{cp} H(t). \quad (20)$$

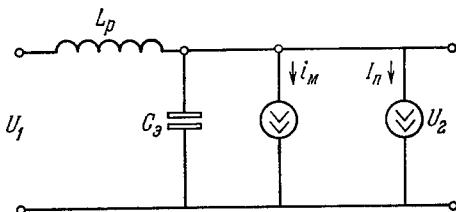


Рис. 7. Эквивалентная схема индуктора.

схему эквивалентной емкости C_3 . Наличие потока рассеяния между обмотками учитывается введением в схему индуктивности рассеяния L_p . Влиянием активного сопротивления обмоток в ЛИУ, как правило, можно пренебречь, и в схеме оно не учитывается. Ток пучка заряженных частиц может быть представлен генератором тока I_n , величина которого в общем случае постоянна только на плоской части импульса и меняется на фронте и спаде. Для ориентировочных расчетов при длительности импульса $\tau_i \geq 0,5 \text{ мксек}$ возможно использование метода построения эквивалентной схемы, принятого для импульсных трансформаторов^{42,43}.

Потери энергии в сердечнике определяются

$$W_m = \int_0^t u i_m dt. \quad (21)$$

Из (21) с учетом (14) и (20) получаем

$$W_m = VH_0 \Delta B + (2VB_s/\tau_i) (S_{\omega 0} \lambda^2 + S_{\omega e} \lambda^3).$$

Величина

$$W_{m,0} = VH_0 \Delta B$$

пропорциональна накапливаемой в сердечнике энергии, которая, вообще говоря, может быть использована вторично, но в ЛИУ это пока не делается. Здесь V — объем сердечника; предполагается, что материал с ППГ и $B_r \approx B_s$.

Второе слагаемое

$$W_{m,d} = (2VB_s/\tau_i) (S_{\omega 0} \lambda^2 + S_{\omega e} \lambda^3)$$

представляет динамические потери на вихревые токи и вязкость. При $\tau_i < 0,3 \text{ мксек}$ для обычно используемых в ЛИУ материалов величиной $W_{m,0}$ можно пренебречь по сравнению с $W_{m,d}$.

Величина $W_{m,d}$ всегда пропорциональна объему сердечника и обратно пропорциональна времени его перемагничивания. Зависимость от перепада индукции ΔB носит более сложный характер и определяется соотношением между $S_{\omega 0}$ и $S_{\omega e}$. Величина $S_{\omega 0}$ является характеристикой самого материала и не зависит от толщины проката. Величина же $S_{\omega e}$ пропорциональна квадрату толщины ленты. При малой толщине ленты ($S_{\omega e} \ll S_{\omega 0}$), а также для ферритов величина $W_{m,d}$ пропорциональна ΔB^2 . Если же преобладают потери на вихревые токи ($S_{\omega e} \gg S_{\omega 0}$), то энергия потерь пропорциональна ΔB^3 .

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

535.343

Двухфотонное поглощение и спектроскопия. Бредихин В. И., Галанин М. Д., Генкин В. Н. «Успехи физических наук», 1973 г., т. 110, вып. 1, 3—43.

Обзор посвящен теоретическим и экспериментальным исследованиям двухфотонного поглощения в различных средах и его роли в спектроскопии молекул, молекулярных кристаллов и полупроводников. В гл. 2 проведен общий анализ приближенного описания (при учете двух или нескольких уровней или зон) двухквантовых переходов. Показано, что при рассмотрении двухквантового поглощения удобнее пользоваться энергией взаимодействия с полем E в виде (dE) , где d — дипольный момент. В гл. 3 описана экспериментальная методика, применяемая при измерениях величины и спектров двухфотонного поглощения, и проанализированы особенности эксперимента по двухфотонному поглощению в разных средах. В гл. 4 обсуждается характер двухфотонных спектров молекул и молекулярных кристаллов. Показано, что двухквантовые переходы имеют электронно-колебательную природу. Проведено детальное сравнение излагаемой теории с имеющимся в литературе экспериментом. В последней главе обсуждается двухфотонное поглощение в полупроводниковых и ионных кристаллах. Проводится сравнение теории с экспериментом. Показано на основе экспериментальных данных, что двухфотонное поглощение в полупроводниках $Al_{1-x}Ga_x$, Al_xGa_{1-x} и Al_xIn_{1-x} может быть в основных чертах описано единным образом в двухзонной модели.

Таблица 1, иллюстраций 14, библиографических ссылок 182 (195 назв.).

539.12.01

Электродинамические процессы во встречных пучках частиц высоких энергий. Горшков В. Г. «Успехи физических наук», 1973 г., т. 110, вып. 1, 45—75.

В статье дана классификация процессов квантовой электродинамики при высокой энергии. Классификация основана не на теории возмущений, а на характере асимптотического поведения амплитуд и сечений при высокой энергии. Описан простой рецепт для нахождения асимптотики амплитуд различных процессов по виду промежуточных состояний в перекрестном канале. Приведен обзор теоретических результатов для процессов с сечениями, не падающими с ростом энергии. Путем суммирования главных членов рядов теории возмущений получены дважды логарифмические асимптотики процессов с сечениями, падающими с ростом энергии.

Таблица 2, иллюстраций 15, библиографических ссылок 57 (72 назв.).

[539.125/128.004+517.391] (023)

Применение тяжелых заряженных частиц высокой энергии в медицине. Гольдин Л. И., Джелев В. П., Ломанов М. Ф., Савченко О. В., Хоропшко В. С. «Успехи физических наук», 1973 г., т. 110, вып. 1, 77—99.

В статье рассматривается биологическое действие излучения, методы и техника облучения тяжелыми заряженными частицами, преимущества, которые могут быть получены при использовании тяжелых заряженных частиц в лучевой терапии и радионефрохирургии. Обсуждаются особенности дозного распределения и биологического действия различных излучений. Приводятся оценки перспектив использования тяжелых частиц в медицине и сводка мировых данных по выполненным исследованиям.

Таблица 4, иллюстраций 15, библиографических ссылок 48.

621.384.62

Линейные индукционные ускорители — новые генераторы мощных пучков релятивистических электронов. Вахрушин Ю. П., Матора И. М. «Успехи физических наук», 1973 г., т. 110, вып. 1, 117—137.

Эксплуатация первых действующих линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) в США и СССР показала, что метод, на котором основывается работа этих ускорителей, позволяет при к. и. д. в десятки процентов получать релятивистские пучки электронов в сотни и тысячи ампер при хорошей надежности и повторяемости результатов. В ряде лабораторий ведутся интенсивные разработки ускорителей этого типа, развивается их теория, методы расчета, происходит совершенствование конструкции. В данном обзоре систематизируются и обобщаются результаты опубликованных работ в этой области. Рассматривается теория ЛИУ, форма ускоряющего поля, удержание попечерных размеров сильноточного пучка. Приводятся параметры действующих и сооружаемых ускорителей и кратко описывается конструкция основных узлов.

Таблица 3, иллюстраций 12, библиографических ссылок 67.

539.184

Рассеяние и излучение квантовой системы в сильной электромагнитной волне. Зельдович Я. Б. «Успехи физических наук», 1973 г., т. 110, вып. 1, 139—151.

Рассмотрен способ последовательного рассмотрения квантовомеханической системы, находящейся в периодически зависящем от времени потенциале, например в поле сильной классической электромагнитной волны. Рассмотрено излучение такой системы, в частности смещение основной частоты ω' и появление сателлитов $\omega' \pm \hbar \omega$.

Иллюстрация 1, библиографических ссылок 18 (28 назв.).

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В июльском номере «Успехов физических наук» (том 110, вып. 3) будут опубликованы статьи:

Монографические обзоры

- А. В. Тимофеев, Циклотронные колебания плазмы в неоднородном магнитном поле.
Б. Л. Иоффе, Слабые взаимодействия на малых расстояниях.

Физика наших дней

- Дж. Никс, Сверхтяжелые ядра.
Д. Киф, Ускорители коллективного действия.

В августовском номере УФН (том 110, вып. 4) предполагается опубликовать статьи:

Монографические обзоры

- Д. И. Блохинцев, Геометрия и физика.
В. И. Кляцкин, В. И. Татарский, Приближение диффузионного случайного процесса в некоторых нестационарных статистических задачах физики.
Ю. Л. Климонтович, Кинетические уравнения для неидеального газа и неидеальной плазмы.
Г. Б. Жданов, Поиски трансуранных элементов (Методы, результаты и перспективы).

Физика наших дней

- Г. Шноппер, Ж. Делвай, Рентгеновское небо.

Новые приборы и методы измерений

- А. Е. Лукьянов, Г. В. Спивак, Р. С. Гоздовер, Зеркальная электронная микроскопия.

Июльский (августовский) выпуск журнала УФН можно приобрести, подписавшись на него до 1 июня (соответственно до 1 июля) в любом отделении связи или оставив лично заказ до 20 июня (до 20 июля) в магазинах «Академкнига» по адресу: Москва, № 1 — ул. Горького, 8, № 2 — ул. Вавилова, 55/7; Ленинград, Литейный просп., 57; Новосибирск, Красный просп., 51; Киев, ул. Ленина, 42; Баку, ул. Джапаридзе, 13; Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97.

Ввиду того, что потери в сердечнике пропорциональны его объему, а сообщаемое частицам ускорение — площади его поперечного сечения, при необходимости получить большой к. п. д. ускорителя при малом весе выгодно снижать до минимума диаметр сердечников, а их осевой размер соответственно увеличивать²⁴.

Величина $W_{\text{п}}/(W_{\text{п}} + W_{\text{м.0}} + W_{\text{м.д}})$, представляющая собой отношение энергии, передаваемой пучку, к полной энергии, затрачиваемой на перемагничивание сердечников, является основной составляющей общего к. п. д. ускорителя. Полученные экспериментальные данные^{40,41} позволяют оценить эту величину. Она имеет значения 0,12; 0,6 и 0,95 при длительности импульса 500 нсек и токах пучка 100, 1000 и 10 000 а соответственно и при использовании ленты из сплава 50НП толщиной 0,01 мм. При длительности импульса 50 нсек и тех же значениях тока пучка величина отношения составляет 0,02; 0,15 и 0,6.

К. п. д. ЛИУ растет с увеличением длительности импульса и увеличением тока ускоряемого пучка. Последнее обстоятельство позволяет сохранять высокий к. п. д. даже при малых значениях длительности импульса.

Следует обратить внимание на то, что средняя мощность в пучке ЛИУ достигает сотен киловатт и для сохранения высокого к. п. д., обеспечивающего индукционной системой, необходимо стремиться к полной передаче энергии, запасенной в накопителе, в индукционную систему. Исключение составляют лабораторные установки²³. С целью оптимальной передачи энергии в импульсной системе используют либо неоднородные искусственные линии^{13,44}, теория которых разработана⁴⁵, либо однородные линии в совокупности с системой коррекции⁴⁶. Надежность этих систем в значительной степени определяется качеством входящих в систему конденсаторов. Хорошо зарекомендовали себя бумаго-пленочные импульсные конденсаторы, обладающие высокой надежностью при работе в формирующих линиях.

В качестве коммутаторов используют разрядники^{15,22} и импульсные водородные тиатратроны^{13,44,46}. Основным недостатком разрядника является его ограниченный срок службы. Обычно разрядники теряют работоспособность после 10^4 — 10^6 рабочих циклов. Систему с разрядником можно использовать в лабораторных установках, работающих в режиме одиночных посылок. Импульсные водородные тиатратроны являются надежным, долговечным прибором, обладают высокой стабильностью параметров, позволяют коммутировать токи 10—15 ка при высокой частоте посылок. Они предпочтительны в ускорителях с длительностью импульса больше 100 нсек. При длительности импульса в десятки наносекунд следует иметь в виду, что, как показали эксперименты, время коммутации водородных тиатратронов составляет 30—50 нсек и в импульсной системе необходимо предусматривать элементы для обострения импульса. Одно из возможных решений основано на использовании свойств ударных электромагнитных волн^{23,47}. Ударные волны возникают при распространении электромагнитных волн в среде, магнитные свойства которой и, в частности, магнитная проницаемость зависят от напряженности поля H распространяющейся волны. Подходящей для этого средой является феррит, в котором магнитная проницаемость убывает с ростом H и, следовательно, вершина импульса распространяется с большей скоростью, чем основание. Таким способом фронт импульса может быть сделан меньшим 10^{-9} сек, но такие короткие фронты трудно реализовать, так как наличие паразитных L_p и C_s в индукционной системе не позволяет сделать их короче 5—10 нсек³⁴.

Как указывалось выше, с помощью системы размагничивания сердечники переводятся в состояние отрицательного насыщения. Для материалов с ППГ размагничивающее поле после перевода сердечника в состояние

насыщения может быть уменьшено до нуля. Этому случаю соответствует использование для размагничивания импульсов тока обратной полярности⁴.

В частности, это может быть и полуволна синусоиды⁵. При использовании материалов с малой прямоугольностью, например ферритов никель-цинковой группы, перед подачей рабочего импульса сердечник должен находиться под действием размагничивающего поля, чтобы иметь наибольшее приращение индукции.

5. УДЕРЖАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ПУЧКА

Без эффективного решения проблемы удержания радиального размера пучка надежная работа ЛИУ, особенно при частоте следования импульсов в несколько герц и выше, невозможна.

Так, в ЛИУ-30¹³ энергия пучка каждого импульса будет составлять 4 кДж, и естественно, что при частоте 50 Гц потери пучка даже в несколько процентов не только способны вызвать разрушение прилежащих к пучку узлов ускорителя, но и будут вызывать недопустимо интенсивное их активирование (энергия электронов на выходе—30 МэВ).

Основная трудность удержания состоит в сильном кулоновском расталкивании интенсивного пучка электронов. На рис. 8 показано соотношение между током пучка и его начальной энергией, при которых пучок диаметром 3 см увеличивает свой размер в 1,5 раза на длине 100 см⁴⁸.

Помимо сил пространственного заряда на пучок оказывают воздействие поля рассеяния земли, которые имеют место в промежутках между элементами индукционной системы⁴⁹, и поля рассеяния.

В ускорителе для «Астрона» задача удержания размеров и положения пучка решается применением коротких магнитных соленоидов, размещенных между ускорительными секциями и имеющих срав- (от 150 до 500 мм) в сочетании с системой⁵⁰. В этой системе наилучшее прохождение пучка составляло 90%, а хорошим считалось 75%.

нительно большую апертуру корректирующих катушек⁵⁰. В работе⁵² показывается, что интенсивные пучки возбуждают электромагнитное поле, которое имеет поперечную

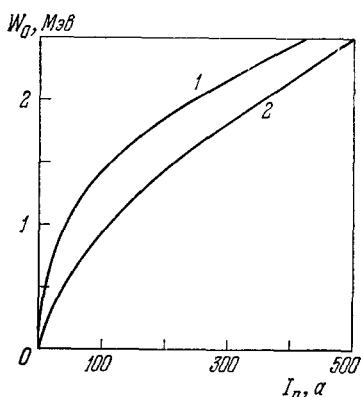


Рис. 8. Соотношение между током и начальной энергией пучка электронов, при которых пучок увеличивает свой диаметр в 1,5 раза на длине 100 см.

$r_p = 1,5$ см; 1 — ускоряющего поля нет, 2 — ускоряющее поле равно 10 кВ/см.

При реконструкции ускорителя с целью доведения тока ускоряемого пучка до 1000 а предусмотрено сокращение длины ускорительных секций вдвое, т. е. до 50 см, и установка вдоль тракта пучка 29 фокусирующих соленоидов и 9 корректирующих магнитов. Установлены также датчики положения и тока пучка. Место установки соленоидов и корректирующих магнитов определялось путем расчета на вычислительной машине. При расчете было принято, что вдоль тракта ускорения существует магнитное поле с индукцией $0,45 \cdot 10^{-4}$ Тл⁵¹. Однако при запуске этого ускорителя выяснилось, что ток пучка не может быть получен большим 500 а из-за возникающей нестабильности¹⁷. В этой связи рассмотрена возможность появления нестабильностей, обусловленных генерацией высокочастотного электромагнитного поля и взаимодействием пучка с зарядами и токами изображения. В работе⁵² показывается, что интенсивные электронные

пучки возбуждают электромагнитное поле, которое имеет поперечную

к оси составляющую магнитного поля. Под его действием пучок отклоняется от оси ускорителя и попадает на стенки камеры. В работе ⁵³ разрабатывается теория взаимодействия сильноточного электронного пучка с зарядами и токами изображения. Сила изображения имеет вид

$$F_{из} = q (2I_{п}/\beta^2 a) r,$$

где $q = [1 - (a/a_*)^2 \beta^2]$, a — внутренний радиус электродов трубы, a_* — внутренний радиус сердечника индуктора.

Учет силы изображения при расчете динамики сильноточного пучка приводит к дополнительным условиям, накладываемым на расстояние между линзами, соотношение между размерами пучка и индукционной системы. В частности, в работе ⁵³ указывается, что апертура трубы должна в 4–8 раз превышать размеры пучка.

Задача удержания размеров пучка облегчается при использовании непрерывного осесимметричного магнитного поля ⁵⁴. Действительно, под действием магнитного поля, перпендикулярного оси, пучок отклоняется на величину Δr_1 , определяемую выражением ²⁹

$$\Delta r_1 = B \mathcal{L}^2 / m_0 c \gamma, \quad (22)$$

где \mathcal{L} — расстояние, на котором определяется отклонение пучка, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$. В случае же прохождения пучка в непрерывном продольном магнитном поле наличие перпендикулярной оси составляющей поля приводит к наклону оси и отклонение пучка от оси ускорителя будет определяться выражением

$$\Delta r_2 = B \mathcal{L} / B \Phi, \quad (23)$$

где B_Φ — поле, необходимое для фокусировки пучка ⁵⁴:

$$B_\Phi = (m_0 / r_{п}) (2I_{п} / \pi \epsilon_0 e p)^{1/2}, \quad (24)$$

здесь p — импульс электронов пучка, $r_{п}$ — равновесный радиус пучка. Из (22) — (24) получаем

$$\Delta r_2 / \Delta r_1 = 46 (r_{п} / \mathcal{L}) \gamma^{3/2} / I_{п}^{1/2}. \quad (25)$$

Анализ (25) показывает, что в начальной части ускорения, наиболее тяжелой с точки зрения удержания размеров пучка, предельный ток в системе с непрерывным полем в 5–10 раз больше, чем при использовании коротких соленоидов. Оценки показывают также, что в случае продольного магнитного поля уменьшается отклонение пучка под действием заряда и тока изображения.

Уравнение, определяющее форму ускоряемого осесимметричного пучка в продольном магнитном поле во время следования рабочей части импульса, имеет вид ⁵⁴

$$p (m_0^2 c^2 + p^2) \frac{d^2 r}{dp^2} + p^2 \frac{dr}{dp} + \frac{1}{2} r \left(\frac{Bc}{E} \right)^2 p = \frac{I_{п} m_0^2 c^2}{2 \pi \epsilon_0 e E^2} \frac{1}{r}. \quad (26)$$

При выводе этого уравнения предполагается, что потенциал, обусловленный пространственным зарядом пучка, не влияет на продольное движение частиц, ускоряющее поле имеет лишь продольную составляющую, магнитное поле на катоде равно нулю (поток Бриллюэна), пучок ламинарен, выполняются условия параксиальности, а эффекты, имеющие место на фронте и спаде импульса, игнорируются. Если поле на катоде не равно нулю, то в (26) входит член, обусловленный начальным замагничиванием пучка ⁵⁵. В ЛИУ обычно магнитное поле на катоде равно нулю. Поскольку в этом случае величина его наименьшая, в дальнейшем будем пользоваться уравнением в форме (26). Член в правой части (26) соответствует расталкивающей силе, а последний член в левой части — силе,

стягивающей пучок к оси. Поскольку сила, вызывающая расплывание пучка, обратно пропорциональна, а сила, стягивающая пучок, прямо пропорциональна радиусу, для каждого $r(z)$ должно существовать равновесное значение $r = r_1(p)$, при котором сила, действующая на периферийную частицу пучка, равна нулю. Из (26) имеем следующее уравнение этой равновесной траектории:

$$r_1(p) = (m_0/B_\Phi) (2I_\pi/\pi e_0 r)^{1/2}.$$

Если периферийный электрон находится на равновесной траектории, то радиус его монотонно убывает обратно пропорционально корню квадратному из p . При небольших отклонениях начальных условий от равновесных пучок испытывает пульсации, период которых увеличивается по мере роста энергии. Для того чтобы величина пульсаций оставалась малой, необходимо выполнение условия

$$2(Bc/E)^2 \gg 1.$$

Так как расталкивающая сила пространственного заряда убывает как $1/\gamma^2$, при энергии пучка 3—5 МэВ можно отказаться от использования непрерывного магнитного поля и удержание радиальных размеров пучка возможно с помощью коротких магнитных соленоидов, расположенных между секциями индукционной системы⁵⁶. Местоположение соленоидов определяется путем численного решения уравнения (26) на участках между двумя соседними соленоидами при различных значениях сходимости пучка. С помощью такого расчета выбирается траектория с отношением r_{\max}/r_{\min} , соответствующим устойчивому движению пучка по отношению к отклонениям его начальных параметров от равновесных⁵⁷. Анализ поведения пучка при отклонениях параметров фокусирующей системы от номинальных показывает, что допуски на отклонение параметров не являются жесткими⁵⁶.

Как отмечалось выше, в перечисленных работах анализ динамики пучка ведется в предположении ламинарности электронного потока и выполнения условий параксиальности. Это предположение в достаточной степени справедливо при равномерном распределении плотности заряда по сечению пучка. Экспериментальное исследование параметров электронного пучка, ускоряемого в ЛИУ, показывает, что распределение плотности заряда по сечению может быть неравномерным⁵⁸. Сила кулоновского расталкивания и суммарная сила, действующие на электроны, в этом случае существенно нелинейны. Эта нелинейность приводит к пересечению траекторий и к образованию неламинарной (многоскоростной) структуры потока электронов. Анализ неламинарного электронного потока показывает, что распределение плотности заряда по сечению пучка не остается постоянным в различных сечениях и максимальная плотность заряда может иметь место на границе пучка⁵⁹.

Возможным путем уменьшения действия пространственного заряда ускоряемого в ЛИУ пучка является его компенсация ионами остаточного газа. При давлении остаточного газа меньше 10^{-3} тор время компенсации больше длительности импульса ускоряющего напряжения, что ведет к необходимости предварительной ионизации остаточного газа, например, электронным пучком²⁸ или высокочастотным полем¹⁹.

Последние исследования плазменного бетатрона⁶⁰ показывают, что при ускорении возникают пучково-плазменные взаимодействия, которые приводят к потере трети энергии пучка и расширению энергетического спектра ускоренных электронов. Однако привлекательно то, что величина тока даже при небольшой энергии 40 кэВ достигает 1000 а. Использование плазмы со спадом ее плотности по длине ускорителя приводит к резкому уменьшению эффективности пучково-плазменного взаимодействия. Потери пучка уменьшаются, а спектр энергий электронов становится уже.

6. ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ. КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ

Основные параметры действующих или сооружаемых ЛИУ приведены в табл. III. В скобках указаны значения параметров, при которых

Таблица III

Параметры линейных индукционных ускорителей

Наименование ускорителя	Место сооружения	Энергия пучка, Мэв	Ток пучка, а	Длительность плоской части импульса, μ сек	Частота посылок, имп/сек	Разброс по энергии, %	Эмиттанс, см·мрад
Инжектор «Астрона» (до реконструкции) ^{4, 17} ЛИУ-3000 ⁵	Ливермор, США	3,7	350	300	0—60 (5)	<3	50
	Дубна, СССР	3 (1,8)	200	350	0—25 (<1)	—	—
Инжектор «Астрона» (после реконструкции) ^{17, 51}	Ливермор, США	4,2	800	300	0—60 (5)	<2	25
ЛИУ-30/250 (сооружается) ^{12, 13}	Дубна, СССР	30	250	500	0—50	<3	—
Инжектор ERA ^{14, 15, 61}	Беркли, США	4,25	500	45	<1	<0,5	<70
СИЛУНД (сооружается) ²³	Дубна, СССР	3	2000	20	0—50	<2	—
Плазменный бетатрон ^{19, 20, 60}	Харьков, СССР	0,05—0,1	500—1000	—	Одиночные	Широкий спектр	—
Безжелезный ЛИУ ²²	Москва, СССР	2	2000	70 (полусинусоиды)	»	—	—

обычно работает ускоритель. Кроме этих, несколько установок находится в стадии проектирования. Все установки, за исключением плазменного бетатрона, служат инжекторами, и качество пучка для них имеет первостепенное значение. Плазменный бетатрон является исследовательской лабораторной установкой, предназначеннной для изучения ускорения электронного пучка в плазме. Все установки, перечисленные в табл. III, характеризуются импульсным током пучка, на 2—3 порядка превышающим ток в линейных электронных ускорителях на бегущей волне⁶². При существующем уровне техники можно полагать, что ускоренный ток в ЛИУ может быть доведен до десятков килоампер. Большинство существующих ЛИУ предназначено для изучения нового коллективного метода ускорения, их энергия определяется этой задачей.

Однако вполне реальны ускорители на значительно большие энергии. Так, находится в стадии сооружения ускоритель на 30 Мэв¹³. Рассматривается проект ЛИУ для ускорения до энергии 1,6 Гэв электронного кольца. Средняя напряженность ускоряющего поля 5 Мэв/м, а длина 320 м¹⁵. Максимальная частота посылок импульсов пока невелика. Она определяется качеством проведения пучка вдоль ускорителя и характеристиками коммутирующих элементов в импульсной системе питания. При использовании современных импульсных водородных тиратронов, в принципе, можно достигать 1000 имп/сек.

Достоинством ЛИУ является возможность получения пучков с хорошим качеством. Разброс по энергии может быть сделан менее 0,5%, что обусловлено видеоимпульсным режимом работы ускорителя. При этом пучок имеет малый эмиттанс. Высокий к. п. д. в сочетании с простотой эксплуатации, надежностью в широком диапазоне изменений параметров

внешней среды делает весьма перспективным использование этих ускорителей также в промышленности и геологии.

В индукционной системе, как правило, используются сердечники из ферромагнитного материала, что позволяет значительно уменьшить ток в первичной обмотке индукторов по сравнению с так называемым «безжелезным» вариантом ускорителя. Так, например, для сердечников, выполненных из ленты сплава 50НП толщиной 20 и 10 μm , среднее значение $\mu = \Delta B / \mu_0 H$ составляет соответственно 2000 и 4000 при длительности импульса $\tau_{0.95} = 0,5 \text{ мксек}^{63}$. Это в свою очередь дает возможность довести к. п. д. ускорителя до столь высоких значений, указанных выше.

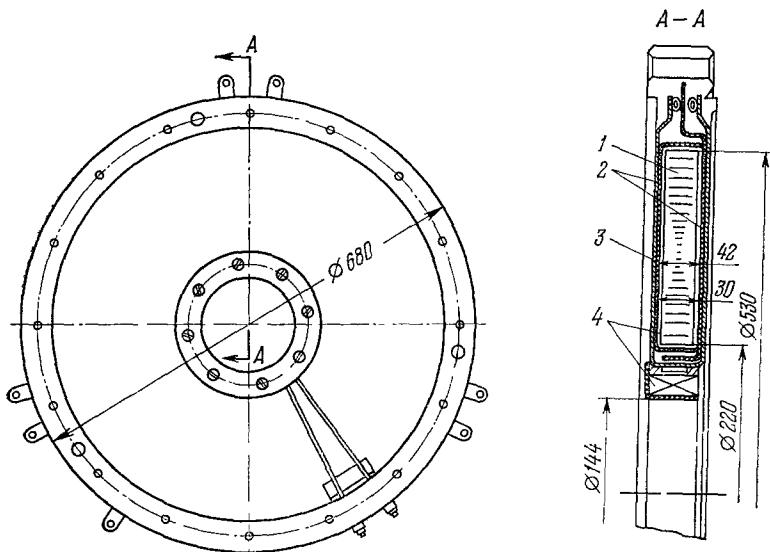


Рис. 9. Конструкция индуктора ЛИУ-3000 (размеры — в мм).

1 — сердечник, 2 — изоляционные шайбы, 3 — первичная обмотка, 4 — фокусирующая катушка.

Индукционная система выполняется из секций, размеры которых определяются требованиями к фокусирующей системе, вакуумной системе и чисто конструктивными соображениями. В интервалах между секциями устанавливаются фокусирующие линзы, патрубки для подсоединения вакуумных насосов и размещения диагностической аппаратуры.

Секции в свою очередь состоят из ряда одинаковых элементов (индукторов). На рис. 9 показана конструкция индуктора ускорителя ЛИУ-3000⁵. Сердечник индуктора наматывается на специальном станке, причем одновременно с намоткой методом катофореза наносится изоляция из окиси магния. После намотки сердечник отжигается в вакуумной печи и затем помещается в изоляционные шайбы, выполненные из слюдотерма. Изоляционные шайбы и слой каучука обеспечивают необходимую электрическую изоляцию сердечника, а также предохраняют его от механических и тепловых напряжений, что способствует сохранению магнитных характеристик в процессе изготовления, транспортировки и эксплуатации индуктора.

Возбуждающая обмотка выполнена в виде тора прямоугольного сечения (по форме сердечника). Все детали индуктора скреплены эпоксидным компаундом, состав которого специально подобран. Конструкция индукторов дает возможность осуществить вариант ускорителя без вакуумной трубы⁶⁴. Несколько отличную конструкцию индуктора

предполагается применить в ускорителе ЛИУ-30/250. Фотография этого индуктора приведена на рис. 10¹³. Этот индуктор должен работать в условиях сильной нейтронной радиации, и он выполняется без применения эпоксидного компаунда, а используется только слюдотерм, обладающий высокой радиационной стойкостью. Кроме того, сердечник выполнен из двух половин, размещенных в изоляционных шайбах из слюдотерма. Обе половинки поджимаются к охлаждаемому водой корпусу. Этим достигается уменьшение напряжения между витками первичной обмотки и сердечником до половины первичного напряжения, что, очевидно, ослабляет требования к изоляции, и тепловой поток от сердечника направляется прямо к корпусу, минуя изоляцию, что также облегчает условия ее работы.

На рис. 11 показано поперечное сечение секции инжектора «Астрона» после реконструкции¹⁷. Она представляет собой набор сердечников, охватываемых первичными и вторичными витками. Внутри секции монтируется секционированная ускорительная трубка, между электродами которой существует ускоряющее электрическое поле, и во внутренней ее полости поддерживается необходимый для существования пучка вакуум, обычно 10^{-6} — 10^{-5} тор.

В связи с относительно короткой длительностью импульса ускоряющего напряжения в ускорителе СИЛУНД нашли возможным использовать для сердечников феррит типа 300НН²³. В этом случае секция также набирается из индукторов но, поскольку феррит является диэлектриком, отпадает необходимость в специальной изоляции витков от сердечника.

С использованием специально подобранных ферритов выполнены также секции инжектора ERA, но конструкция этих секций существенно отличается⁶¹. Поперечное сечение этой секции показано на рис. 12. По существу, секция в этом случае представляет собой один индуктор с напряжением на ускоряющем зазоре 250 кэв. Внутренняя полость его заполнена ферритом и трансформаторным маслом, с помощью которого обеспечивается необходимая электрическая прочность. Непосредственно с секцией стыкуется формирующая линия. При такой конструкции отпадает необходимость в специальной ускорительной трубке и существенно повышается значение импеданса системы, что облегчает формирование импульса.

Однако возрастают трудности, обусловленные повышенным напряжением, и, естественно, снижается надежность работы индукционной системы. Кроме того, в качестве коммутирующего элемента в импульсной системе не может быть применен импульсный водородный тиатрон, ибо у разработанных тиатронов анодное напряжение не превышает 80 кэв и приходится использовать разрядник и, следовательно, ограничиваться одиночными посылками импульсов. Импульсная система представляет собой двойную формирующую линию типа «Блюмляйн» с воздушным разрядником в качестве коммутирующего элемента. Внутренняя полость

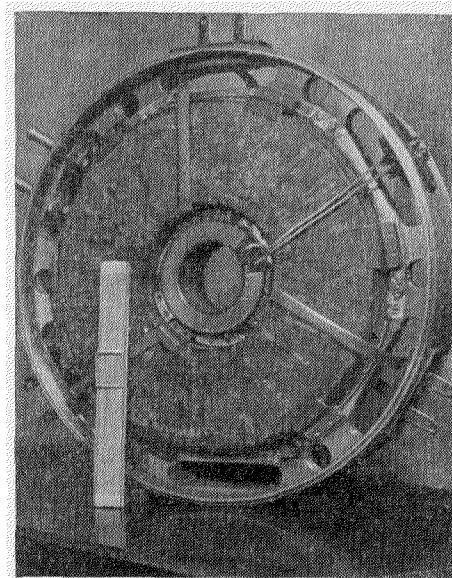


Рис. 10. Фотография макета индуктора ЛИУ-30/250.

формирующей линии заполнена трансформаторным маслом. Проходные изоляторы между воздушным разрядником (давление 10 атм) и масляной формирующей линией выполнены из эпоксидного компаунда. Заряд формирующей линии осуществляется от генератора Маркса на время 330 нсек. Причем напряжение линии близко к пробойному для разрядника, и если разрядник не поджигается специально, то спустя 100 нсек он пробивается самопроизвольно. Такой режим работы разрядника обеспечивает малый разброс во времени срабатывания ~ 1 нсек. Непосредственнаястыковка формирующей линии с ускоряющей секцией и применение воздушного разрядника под давлением позволило получить достаточно малую длительность фронта импульса ускоряющего напряжения в 12 нсек.

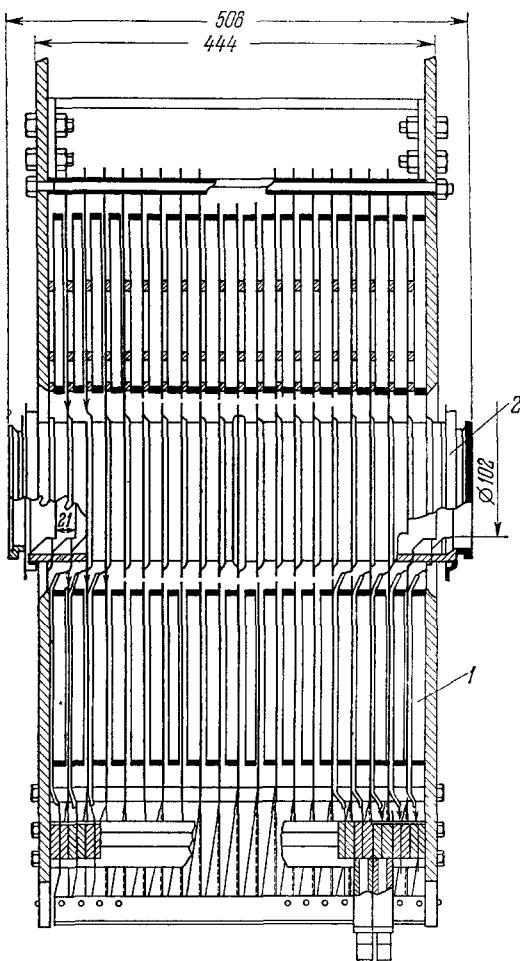


Рис. 11. Поперечное сечение секции инжектора «Астрона» (размеры — в мм)
1 — сердечник, 2 — ускорительная трубка.

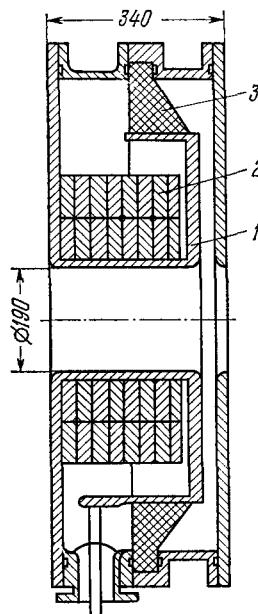


Рис. 12. Поперечное сечение секции инжектора ERA (размеры — в мм)
1 — первичная обмотка, 2 — сердечник, 3 — изоляционная перегородка.

В другом наносекундном ускорителе типа СИЛУНД в качестве накопителя использованы пленочные импульсные конденсаторы и водородные тиатротроны типа ТГИ-1-3000/50 в качестве коммутаторов. Практика показывает, что импульсные водородные тиатротроны при длительностях импульса менее 1 мксек могут коммутировать токи, в несколько раз превышающие паспортные значения, ^{46,65}. Однако время коммутации составляет несколько десятков наносекунд. Для уменьшения длительности фронта между накопителем и индуктором в этом ускорителе установлена обостряющая

система, которая представляет собой коаксиальную линию с ферритом. Коррекция плоской части импульса осуществляется подбором величины и знака начальной намагниченности ферритов в корректирующей линии. В описанной системе удается получить длительность фронта импульса 5 μ сек при длительности плоской части 20 μ сек.

В ускорителях ЛИУ-3000 и ЛИУ-30/250 длительность импульса составляет 350 и 500 μ сек соответственно и использование импульсных водородных тиратронов не требует применения обострителя фронта. Для формирования плоской части импульса используется неоднородная формирующая линия с сосредоточенными параметрами⁴⁴, закон изменения импеданса которой должным образом согласован с законом изменения импеданса индукционной системы.

При использовании для удержания размеров пучка продольного магнитного поля по внутреннему диаметру индукторов закрепляются катушки, концы от которых проходят с одной стороны индуктора.

Помимо рассмотренных, важным узлом ускорителя является электронная пушка. Конструкцией ее во многом определяется величина тока, качество пучка, надежность работы ускорителя. В источниках высоковольтного питания пушек в ЛИУ, как правило, используются импульсные трансформаторы, выполненные из тех же элементов, что и индукционная система, т. е. из индукторов.

В инжекторе «Астрона» импульсный трансформатор представляет собой секцию, аналогичную по конструкции основной, но несколько большего диаметра^{4,17}. В центре секции располагаются электроды пушки, с помощью которых создается не только продольная, но и радиальная составляющие электрического поля. Таким образом достигается компенсация расталкивающего действия сил пространственного заряда. Требуемое распределение градиента достигается путем подбора расстояния между электродами и числа сердечников между следующими друг за другом электродами. Пушка ускорителя после реконструкции имеет оксидный катод в форме плоского диска диаметром 17,8 см. Анодное отверстие закрыто сеткой для устранения провала электрического поля.

Вся конструкция устанавливается в бак, через который прокачивается фреон при давлении 2 атм. Этим уменьшается корона и отводится тепло от секции. Пушка дает ток 1200 а при напряжении 550 кв. Это соответствует микропервеансу 2,9.

В ускорителе ЛИУ-30/250 в качестве импульсного трансформатора будет использована секция основного ускорителя, по оси которой проходит металлический стержень, а полость между стержнем и корпусом индукторов заполнена трансформаторным маслом^{13,66}. Напряжение 300 кв выводится через проходной изолитор и подается на катод электронной пушки. В пушке использован специальный катод с высоким значением удельной эмиссии диаметром 50 мкм⁶⁷. Ток пушки >250 а.

В инжекторе ERA в качестве импульсного трансформатора использованы пять ускорительных секций, состыкованных вместе⁶¹. По оси секций проходит металлический стержень, заканчивающийся сферическим наконечником. Стержень служит ножкой. На наконечнике располагается автоэмиссионный катод, выполненный из tantalовой ленты толщиной 0,012 мкм, свернутой в спираль с внешним диаметром 10 мкм. Анодное отверстие закрыто сеткой из вольфрамовой проволоки диаметром 0,075 мкм и со стороной ячейки 3 мкм. При напряжении около 1 Мв из пушки «вытрягивается» ток 1200 а. Катод в состоянии выдержать $(3-5) \cdot 10^5$ импульсов без разрушения. Другие узлы и системы ЛИУ не отличаются от аналогичных узлов в других ускорителях и специального описания не требуют.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 60-х годов был разработан и создан ряд ЛИУ, предназначенных для проведения исследований в области новых методов ускорения и контролируемого термоядерного синтеза. Опубликовано значительное количество работ по физике и технике ускорителей этого типа. Показано, что в ЛИУ могут быть ускорены пучки с током в сотни и тысячи ампер при малом энергетическом разбросе и хорошем эмиттансе, что делает их весьма привлекательными для физиков-исследователей.

Наряду с этим ЛИУ надежны и просты в эксплуатации, не требуют особых условий внешней среды, обладают высоким к. п. д. Это дает основание надеяться, что наряду со всеми расширяющимися применением ЛИУ в научных исследованиях они будут использоваться и в промышленности. Например, на базе ЛИУ могут быть созданы легкоподвижные, дешевые и несложные в эксплуатации установки для рентгено-структурного анализа, гамма-каротажа, дефектоскопии, способные работать в полевых или заводских условиях.

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д. В. Ефремова, Ленинград
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. N. Christofilos, Nucl. Fusion Suppl., pt. 1, 159 (1962).
2. В. И. Векслер, АЭ 2, 427 (1957).
3. W. A. S. Lamb, IRE Trans. Nucl. Sci. NS-9, 53 (1962).
4. N. Christofilos et al., Rev. Sci. Instr. 35, 886 (1964) (см. перевод: Приб. науч. иссл. 35 (7), 150 (1964)).
5. А. И. Анацкий и др., АЭ 21, 439 (1966).
6. А. Bowersy, Elektrische Hochspannungen, B., 1939.
7. J. W. Beal et al., Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. Conference Proceedings (Novosibirsk, August 1-7, 1968), v. 1, Vienna, IAEA, 1969.
8. В. И. Векслер и др., АЭ 24, 317 (1968).
9. В. П. Саранцев, Вестн. АН СССР, № 12, 54 (1968).
10. V. I. Vekslер et al., Proc. of the 6th Intern. Conference on High Energy Accelerators, Cambridge, CEAL-2000, 1967, p. 289.
11. В. П. Саранцев и др., Препринт ОИЯИ Р9-5558, Дубна, 1971.
12. В. Д. Аниньев и др., Препринт ОИЯИ 13-4392, Дубна, 1969.
13. А. Г. Апастков et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18, 625 (1971).
14. D. Keeffe, Part. Accel. 1, 1 (1970).
15. Дж. М. Петерсон и др., Труды 2-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 11-18 ноября 1970 г.), т. 1, М., «Наука», 1972.
16. В. К. Гришин, ПТЭ, № 1, 35 (1970).
17. J. W. Beal et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-16, 294 (1969).
18. В. К. Гришин, В. Г. Сухаревский, Вестн. МГУ, сер. III (Физика. Астрономия) 11, 591 (1970).
19. Е. И. Луценко и др., ЖТФ 35, 635 (1965).
20. Н. С. Педенок и др., сборник «Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой», Киев, «Наукова думка», 1965.
21. В. К. Гришин, В. Г. Сухаревский, Вестн. МГУ, сер. III (Физика. Астрономия) 11, 570 (1970).
22. А. И. Павловский и др., АЭ 28, 432 (1970).
23. В. Д. Гитт и др., Препринт ОИЯИ Р9-5601, Дубна, 1971.
24. И. М. Матора, Препринт ОИЯИ Р9-3184, Дубна, 1967.
25. Ю. П. Вахрушин, О. В. Семенов, ЖТФ 38, 1521 (1968).
26. В. Смайт, Электростатика и электродинамика, М., ИЛ, 1954.
27. Ю. П. Вахрушин и др., Препринт ОИЯИ 9-3287-2, Дубна, 1967.
28. Ю. П. Вахрушин, Канд. диссертация (НИИЭФА, Ленинград, 1967).
29. Ю. П. Вахрушин, В. К. Гаген-Торн, Препринт НИИЭФА А-0123, Ленинград, 1971.

30. Р. В. Лукин, Радиотехника **2** (4), 46 (1947).
31. Я. С. Ицхоки, Импульсные трансформаторы, М., «Сов. радио», 1950.
32. М. М. Айзинов, Переходные процессы в элементах радиоустройств, Л., «Морской транспорт», 1955.
33. Э. Ф. Зайцев, Радиотехника **23** (6), 59 (1968).
34. Л. А. Мирович и др., Магнитные генераторы импульсов, М., «Сов. радио», 1968.
35. А. И. Пирогов, Ю. М. Шамаев, Магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса, М., «Энергия», 1964.
36. A. Goral, Bull de l'Ac. Polon. Sci., Ser. des Sci. techn. **8**, 297 (1960); Electron. Eng. **32**, 116 (1960).
37. В. Г. Михалев, Тр. МФТИ, вып. 8, 38 (1962).
38. В. Л. Дятлов, Научн. докл. высш. школы (Электромеханика и автоматика), № 2, 3 (1959).
39. М. Г. Витков, Автоматика и телемех. **23**, 1686 (1962).
40. Н. П. Барштейн и др., Электрон. тех., сер. 9, № 3, 95 (1971).
41. А. И. Анаккий и др., Препринт ОИЯИ Р9-6075, Дубна, 1971.
42. А. И. Анаккий и др., Электрофиз. аппаратура (М., Атомиздат), вып. 8, 134 (1969).
43. П. В. Букаев, В. П. Сараниев, Препринт ОИЯИ Р9-5129, Дубна, 1970.
44. А. И. Анаккий и др., Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 9—16 октября 1968 г.), т. 2, М., Атомиздат, 1970.
45. О. Н. Литвиненко, В. И. Сошиников, Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике, М., «Сов. радио», 1964.
46. W. A. S. Lamb, IRE Trans. Nucl. Sci. **9**, 57 (1962).
47. И. Г. Катаев, Ударные электромагнитные волны, М., «Сов. радио», 1963.
48. И. Н. Мешков, Б. В. Чирков, ЖТФ **35**, 2202 (1965).
49. П. С. Анциупов и др., Препринт ОИЯИ Р9-4498, Дубна, 1969.
50. W. A. Shergwood, IEEE Trans. Nucl. Sci. **14**, 928 (1967).
51. J. W. Beal, Proc. of the 1968 Proton Linear Accelerator Conference (Upton, May 20—24, 1968), N.Y., BNL, 1968, p. 713.
52. V. K. Neil, R. K. Cooper, Part. Accel. **1**, 111 (1970).
53. C. H. Woods, Rev. Sci. Instr. **41**, 959 (1970) (см. перевод: Приб. научн. иссл. **41** (7), 53 (1970)).
54. Ю. П. Вахрушин, В. С. Кузнецов, ЖТФ **39**, 506 (1969).
55. И. М. Матора и др., Препринт ОИЯИ Р9-5268, Дубна, 1970.
56. Ю. П. Вахрушин и др., Препринт ОИЯИ Р9-5714, Дубна, 1971.
57. Ю. П. Вахрушин и др., Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Ереван, 1969), т. 1, Ереван, АН Арм. ССР, 1970; Ю. П. Вахрушин и др., АЭ **31**, 294 (1971).
58. R. W. Allison et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **16**, 1055 (1969).
59. В. С. Кузнецов и др., Препринт НИИЭФА Д-0111, Ленинград, 1970.
60. Е. И. Луценко и др., ЖЭТФ **57**, 1575 (1969); Е. И. Луценко и др., ЖТФ **40**, 529 (1970).
61. R. Averug et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **18**, 479 (1971).
62. Г. И. Жиляков, Высоковольтные электронные пучки, М., «Энергия», 1968.
63. П. В. Букаев и др., Препринт НИИЭФА А-0118, Ленинград, 1971.
64. Ю. П. Вахрушин и др., Препринт ОИЯИ 9-3288-2, Дубна, 1967.
65. Г. А. Месяц и др., Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения, М., «Энергия», 1970.
66. О. С. Богданов и др., Препринт НИИЭФА А-0112, Ленинград, 1970.
67. В. М. Левин и др., Аннотации докладов, представленных на 2-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц (11—18 ноября 1970 г.). М., АН СССР — ГК ИАЭ, 1970, стр. 40.