

Наиболее эффективное (оптимальное) использование ядерного горючего соответствует минимальному значению величины C_T^* в задачах, для которых изменениями фонда заработной платы и основных производственных фондов можно пренебречь. Оптимальное использование ядерного горючего осуществляется при достижении независимыми параметрами АЭС оптимальных значений, определяемых из равенств

$$\frac{\partial C_T^*}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (15)$$

где n — число независимых параметров АЭС. Следует подчеркнуть, что условия (15) справедливы (в большинстве случаев с достаточной степенью точности) лишь для случаев, когда изменение параметров активной зоны не приводит к изменению других характеристик АЭС (а следовательно, и затрат).

В более общем случае (для задач, в которых можно пренебрегать изменениями фонда заработной платы) условие оптимальности независимых параметров можно записать в виде системы равенств

$$\frac{\partial C^*}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (16)$$

где $C^* = C + П$; C — себестоимость отпущенной электроэнергии; $П$ — плата за пользование основными и оборотными фондами АЭС.

Наконец, в самом общем случае условие оптимальности независимых параметров АЭС записывается в виде системы равенств

$$\frac{\partial Ц}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (17)$$

где $Ц$ — оптовая цена производства электроэнергии.

Нетрудно видеть, что условия (15) и (16) — частные случаи общего условия (17), поскольку оптовая цена складывается из себестоимости и прибавочного продукта, одна часть которого рассчитывается пропорционально фонду заработной платы, а вторая — пропорционально производственным фондам.

Строго говоря, вследствие того, что основные или независимые параметры АЭС квази-независимы, практическая оптимизация экономических показателей АЭС — весьма сложная и трудоемкая, но в то же время и весьма важная задача, решение которой может дать ощутимый народнохозяйственный эффект. Развитие методов оптимизации — одна из важней-

ших проблем ядерной энергетики, особенно в условиях перехода на новые методы хозяйствования.

Введение платности производственных фондов, являющейся важным экономическим стимулом более рационального использования ядерного горючего в топливном цикле, позволяет по-новому и более глубоко взглянуть на экономику топливного цикла. В частности, такие важные вопросы, как оптимальные время ввода и производительность предприятий топливного цикла, могут быть экономически правильно решены только с учетом платности производственных фондов. При сравнении различных типов реакторов оборотные фонды, связанные с образованием вторичного ядерного горючего, выступают в роли «вытеснителя» капиталовложений в горнорудную промышленность и частично уранперерабатывающие предприятия топливного цикла. Отсюда следует, что математический аппарат исследования сравнительной экономической эффективности различных типов реакторов может включать в себя понятия отрицательных капиталовложений, а введение платности позволяет правильно понять экономическую значимость оборачиваемости регенерированного горючего.

Настоящая статья, естественно, не охватывает всего многообразия вопросов, которые возникают в экономике ядерной энергетики в связи с введением платности основных производственных фондов и оборотных средств. Использование этого экономического стимула наряду с другими, например рентой, учитывающей природные условия (отчуждение территорий для строительства АЭС и других предприятий топливного цикла), может привести к изменению представлений об экономических показателях ядерной энергетики и потому требует дальнейшего изучения.

Поступила в Редакцию 29/I 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. М., Гостехиздат, 1959.
2. Ю. И. Корякин, В. В. Батов, В. Смирнов. «Атомная энергия», 17, 94 (1964).
3. Н. М. Синев, Б. Б. Батуров, В. М. Шмелев. Доклад № 294, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).

Сильноточный ускоритель на основе трансформатора

Е. А. АБРАМЯН, В. А. ГАПОНОВ

УДК 621.384.60

Описан принцип работы ускорителя прямого действия, предназначенного для ускорения электронов до энергии 1,5 Мэв при средней мощности пучка, составляющей десятки киловатт, и к. п. д. около 90%. Длительность импульсов электронного тока регулируется от 0 до 5 мсек, частота повторения — до 50 раз в секунду. Средний ток $i_{ср}$ может достигать 1/6 величины максимального тока в импульсе. Для проведения по ускорительной трубке электронного тока до 100 ма в пучке диаметром несколько миллиметров внутри трубки установлены магнитные линзы. Для защиты газовых зазоров и других электрически напряженных участков ускорителя от радиации, возникающей внутри трубки, предназначены экраны из тяжелого металла, расположенные вблизи оси трубки.

Описана конструкция установки, на которой получен пучок электронов с энергией 1,5 Мэв и средней мощностью 25 квт ($i_{ср} \approx 17$ ма).

Ускорители электронов на энергию 1 Мэв и выше могут быть широко использованы как при физических исследованиях, так и для различных прикладных целей. Ускорители применяются в качестве источников радиации в химии, для стерилизации медикаментов, при консервировании продуктов. Электронные пучки с плотностью энергии в десятки киловатт на 1 см² позволяют вести плавку, сварку и другие процессы обработки металлов. При энергии много сот киловольт электроны могут быть выпущены из вакуумного объема, где происходит ускорение, и использованы в воздухе или среде инертного газа при атмосферном и более высоком давлении.

В конце 1963 г. по инициативе Г. И. Будкера в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР были начаты работы по созданию ускорителя для прикладных целей, имеющего большую мощность пучка и высокий к. п. д. Из многих известных и возможных способов ускорения заряженных частиц была выбрана схема ускорения при помощи трансформатора [1]. В 1964 г. была сконструирована и изготовлена первая экспериментальная установка ЭлТ-1,5 — электронный трансформатор для ускорения электронов до энергии 1,5 Мэв. Ниже описаны основные элементы установки и принцип ее работы.

Схема установки

Принципиальная конструктивная схема установки показана на рис. 1. Первичная обмотка трансформатора 1 и секции 2 вторичной обмотки

расположены коаксиально. Центральная часть магнитопровода состоит из отдельных изолированных друг от друга дисков 3 и оканчивается с высоковольтной стороны головкой 4.

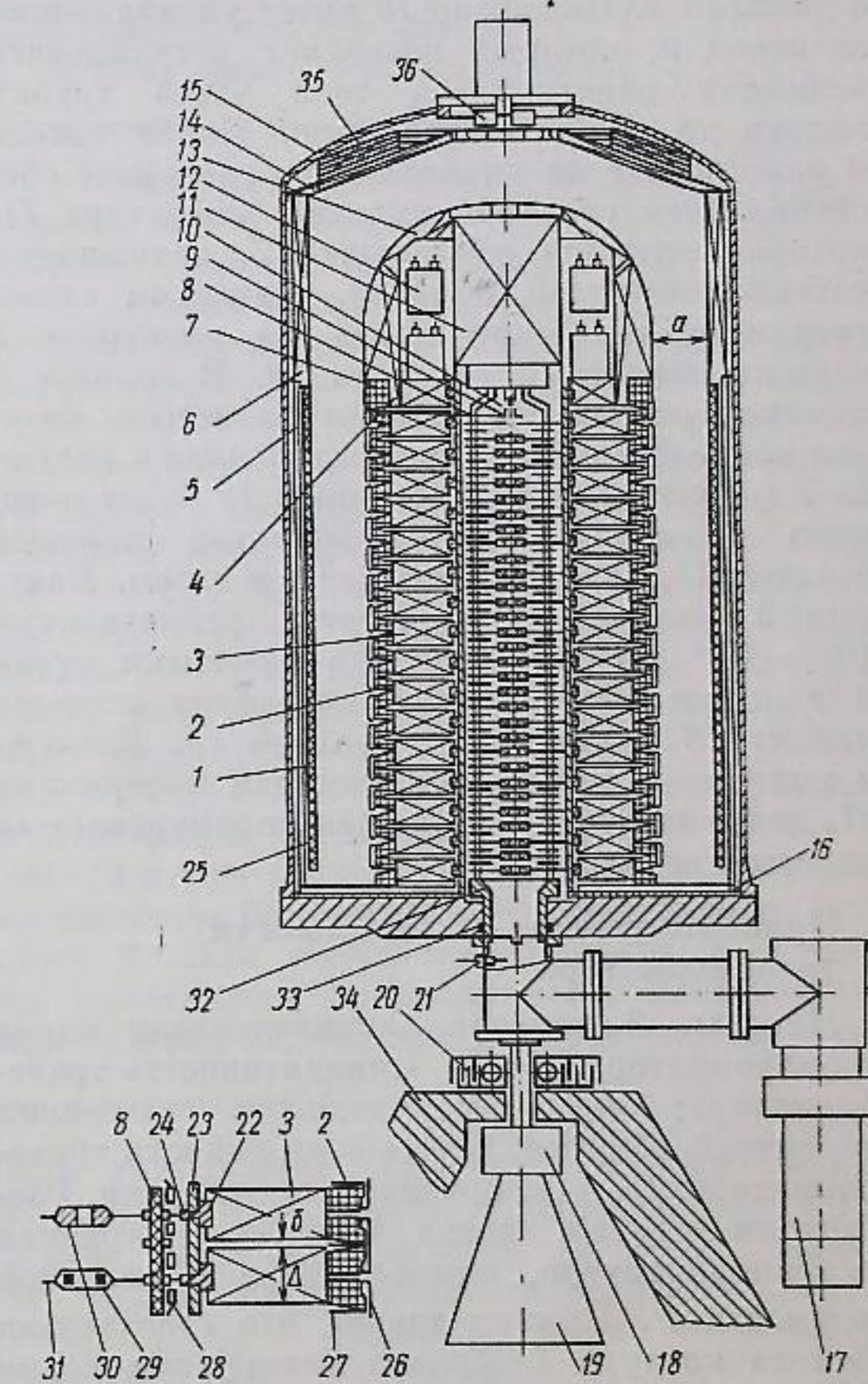


Рис. 1. Схема конструкции установки:

- 1 — первичная обмотка трансформатора; 2 — секция вторичной обмотки; 3 — диск магнитопровода; 4 — высоковольтная часть магнитопровода (головка); 5, 6, 14 — детали магнитопровода; 7 — катушка головки; 8 — ускорительная трубка; 9 — управляющий электрод; 10 — инжектор; 11 — система питания инжектора; 12 — конденсаторная батарея; 13 — емкостный датчик головки; 15 — котел; 16 — основание магнитопровода; 17 — вакуумный насос; 18 — разворачивающий магнит; 19 — раструб с выпускным окном; 20 — пояс Роговского; 21 — пробник; 22 — медные кольца; 23 — опорные цилиндры; 24 — упругие контакты ускорительной трубки; 25 — экран первичной обмотки; 26 — экраны секций вторичной обмотки; 27 — предохранительные разрядники; 28 — омический делитель; 29 — магнитные линзы; 30 — радиационные экраны; 31 — электроды ускорительной трубки; 32 — шаровая опора трубки; 33 — уплотнение трубки; 34 — радиационная защита; 35 — радиатор охлаждения; 36 — вентилятор.

Магнитный поток проходит также по наружным деталям магнитопровода 5, 6, 14 и по основанию магнитопровода 16. Секции 2 соединены последовательно (каждые две секции закреплены на диске 3), средняя точка двух соседних секций электрически соединена с диском. Ускорительная трубка 8 вмонтирована в трансформатор, а ее электроды соединены с дисками 3. Инжектор 10 имеет управляющий электрод 9, который позволяет регулировать величину электронного тока через трубку вплоть до полного запираания. Накал катода и напряжение на управляющем электроде обеспечиваются системой питания инжектора 11, которая питается от катушки 7, являющейся частью вторичной обмотки. Датчиком схемы регулирования напряжения на электроде 9 служит емкостный делитель 13. В головке 4 помимо системы управления размещена батарея конденсаторов 12, подсоединенная к катушке 7 (назначение конденсаторов 12 будет пояснено ниже). Весь трансформатор помещен в котел 15, заполненный сжатым газом. Вакуумный насос 17 обеспечивает в трубке вакуум 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст. Для развертки пучка и выпуска электронов в атмосферу имеются магнит 18 и растроб с фольгой 19. Размеры и положение пучка определяются пробниками 21, величина тока измеряется экранированным поясом Роговского 20.

Принцип работы и особенности трансформатора

На рис. 2 показана эквивалентная схема трансформатора, где L — индуктивность трансформатора; L_{1s} — индуктивность рассеяния первичной обмотки; C — общая емкость трансформатора; R_H — сопротивление нагрузки. Рассмотрим случай, когда мощность, теряемая в трансформаторе, намного меньше полезной мощности \bar{P} . Примем также, что собственная частота контура LC равна частоте изменения напряжения u_1 , подаваемого на первичную

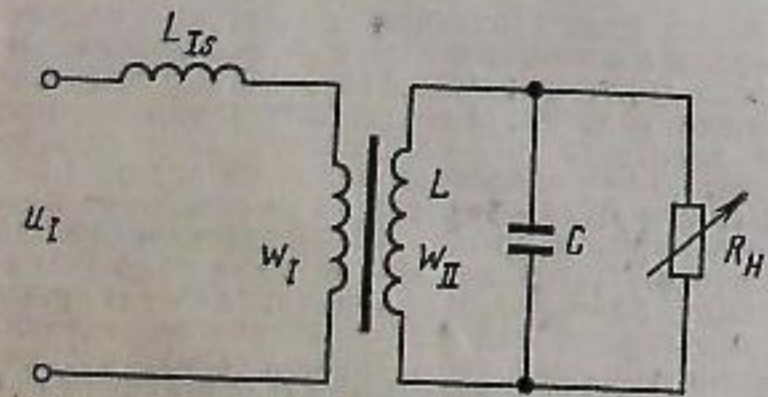


Рис. 2. Упрощенная схема трансформатора: L — индуктивность трансформатора; L_{1s} — индуктивность рассеяния первичной обмотки; C — емкость трансформатора; R_H — сопротивление нагрузки.

обмотку. Как уже указывалось, благодаря наличию у инжектора управляющего электрода ток через трубку может быть равен нулю даже в те полупериоды, когда полярность напряжения на вторичной обмотке соответствует ускорению электронов (на высоковольтном конце трубки минус). Пока ток в трубке отсутствует, трансформатор работает в режиме холостого хода и ток в первичной обмотке i_1 мал. Предположим, что управляющий электрод начинает открываться с момента t_1 (рис. 3). Легко видеть, что при определенном законе изменения тока в ускорительной трубке i_{TP} напряжение на трубке u_{TP} может оставаться постоянным. Обозначим w_I и w_{II} — число витков в первичной и вторичной обмотках, а $k = \frac{w_I}{w_{II}}$ — коэффициент трансформации, тогда для интервала времени $t_1 < t < t_2$ можно записать: $u_{Im} \sin \omega t = L_{1s} \frac{di_1}{dt} + k u_{TP}$. Интегрируя обе части уравнения, полагая $u_{TP} = \text{const}$ и учитывая, что $\frac{u_{Im}}{k} = u_{IIIm}$, получаем $i_1 = u_{TP} \frac{k}{L_{1s}} \left[\frac{u_{IIIm}}{\omega u_{TP}} (\cos \omega t_1 - \cos \omega t) - (t - t_1) \right]$. (1)

В течение времени $t_1 < t < t_2$ напряжение на индуктивности L также постоянно $L \frac{di_L}{dt} = u_{TP}$, откуда ток в индуктивности $i_L = \frac{u_{TP}}{L} (t - t_1) + i_L(t_1)$. Величину $i_L(t_1)$ найдем из рассмотрения режима холостого хода:

$$L \frac{di_L}{dt} = u_{IIIm} \sin \omega t; \quad i_L(t_1) = -\frac{u_{IIIm}}{\omega L} \cos \omega t_1.$$

При постоянном напряжении на емкости C ток $i_C = 0$ и ток в трубке $i_{TP} = k i_1 - i_L$. Обозначив $\frac{u_{TP}}{u_{IIIm}} = \sin \omega t_1 = \alpha$ и $\frac{L_{1s}}{L} = \nu$, получим

$$i_{TP} = \frac{u_{IIIm}}{\omega L_{1s}} [(k^2 + \nu) \cos \omega t - \alpha \omega (k^2 + \nu) (t - t_1) - k^2 \cos \omega t]. \quad (2)$$

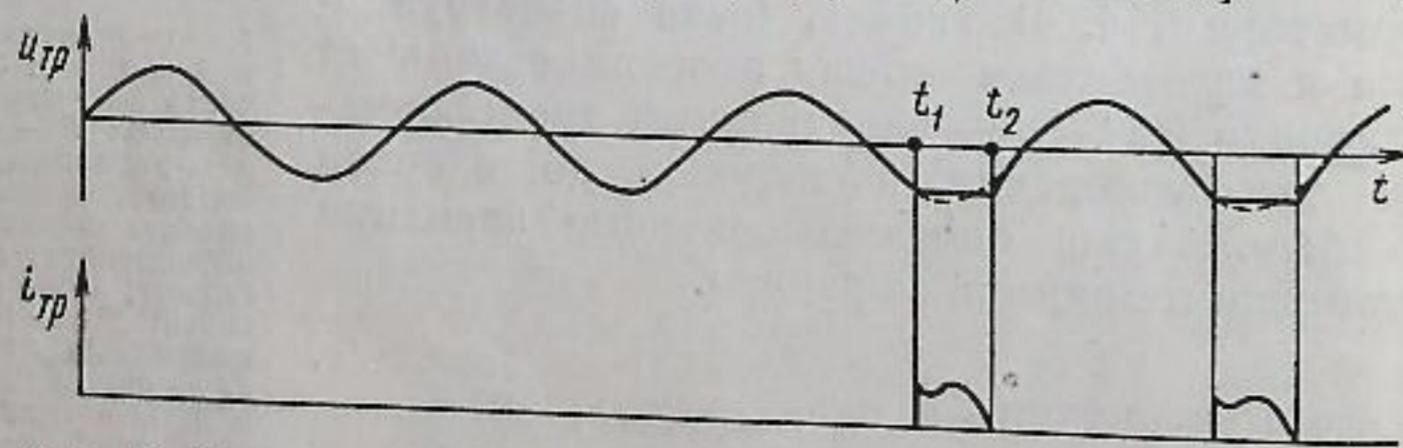


Рис. 3. Изменение напряжения и тока трубки: u_{TP} — напряжение на ускоряющей трубке; i_{TP} — ток ускоренных электронов.

При $i_{TP} = 0$ в момент t_2 уравнение (2) примет вид

$$(k^2 + \nu) \cos \omega t_1 - \alpha \omega (k^2 + \nu) (t_2 - t_1) - k^2 \cos \omega t_2 = 0. \quad (3)$$

Из уравнения (3) можно найти t_2 .

Средняя мощность в пучке $\bar{P} = f u_{TP} \int_{t_1}^{t_2} i_{TP} dt$ или

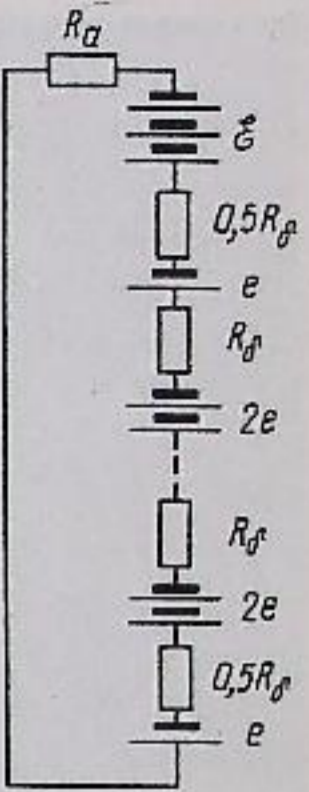
$$\bar{P} = \frac{u_{TP}^2}{2\pi \alpha L_{1s}} \left[(k^2 + \nu) (t_2 - t_1) \cos \omega t_1 - \frac{\alpha \omega}{2} (k^2 + \nu) (t_2 - t_1)^2 - \frac{k^2}{\omega} (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1) \right]. \quad (4)$$

Полученная для \bar{P} формула является приближенной и отражает качественную зависимость полезной мощности от длительности импульса $t_2 - t_1$, индуктивности рассеяния L_{1s} и соотношения $\nu = \frac{L_{1s}}{L}$. Более точная зависимость величины \bar{P} от всех параметров в установленном режиме с учетом распределенных параметров трансформатора изучалась на моделях. Для описанной в настоящей работе установки $\bar{P} = 25$ квт при $t_2 - t_1 = 5$ мсек, $L_{1s} = 4,6 \cdot 10^{-4}$ гн, $L = 40\,000$ гн и $\nu = 1,15 \cdot 10^{-8}$. Рассмотренный способ поддержания постоянного напряжения на трубке при помощи регулирования тока в трубке может быть использован и для получения другой формы $u_{TP}(t)$ путем подбора соответствующего закона изменения i_{TP} в течение импульса.

Как указывалось выше, собственная частота контура была выбрана равной частоте напряжения, питающего трансформатор. Так, для описанной ниже установки $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = 50$ гц и питание первичной обмотки осуществляется непосредственно от сети.

Для обеспечения постоянства градиента электрического напряжения вдоль центральной части магнитопровода количество ампер-витков у каждого воздушного (точнее газового) зазора должно быть пропорционально его магнитному сопротивлению R ($R_i = \frac{l_i}{\mu_i S_i}$). На каждый зазор δ между дисками приходится две секции 2 (см. рис. 1). Зазор между самым верхним диском и головкой 4 в два раза меньше, поэтому около него расположена одна секция 2. То же относится к зазору между самым

Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема магнитопровода: \mathcal{E} — ампер-витки катушки головки; e — ампер-витки секции вторичной обмотки; R_a — магнитное сопротивление между головкой и наружными деталями магнитопровода; R_δ — магнитное сопротивление зазора между дисками.



нижним диском и основанием магнитопровода 16. Отношение числа ампер-витков в катушке 7 к общему числу ампер-витков всех секций равно $\frac{R_a}{16R_\delta}$, где R_a — магнитное сопротивление участка a , к которому приложено полное напряжение; R_δ — магнитное сопротивление зазора δ между дисками. Эквивалентная схема магнитопровода с вторичной обмоткой показана на рис. 4, где \mathcal{E} и e — число ампер-витков катушки 7 и секции 2 соответственно. Из условия обеспечения примерно одинаковой напряженности электрического поля в газовых зазорах величина a равна (или несколько больше) сумме всех междисковых зазоров и, следовательно, $R_a \gg R_\delta$. Амплитудное значение ампер-витков катушки 7 $i_{7m} w_7 = \Phi_m R_a$, где Φ_m — амплитуда основного потока. Для обеспечения нужного значения $i_{7m} w_7$ при относительно малом напряжении на катушке 7 по ее виткам пропускается ток, который на несколько порядков больше тока, проходящего по секциям 2. Для получения заданной величины i_{7m} к катушке 7 подсоединяется конденсаторная батарея 12, емкость которой определяется из соотношения $C_{12} = \frac{i_{7m}}{\omega u_{7m}}$, где $u_{7m} = u_{IIIm} \frac{w_7}{w_{II}}$.

При выполнении указанных условий амплитуды магнитной энергии в зазоре a и электрической энергии в емкости 12 будут равны, что следует из идентичности условий: $i_{7m} w_7 = \Phi_m R_a$, $i_{7m} = \omega C_{12} u_{7m}$, с одной стороны, и $C_{12} u_{7m}^2 = \Phi_m^2 R_a$ — с другой.

Одна из особенностей описываемого трансформатора — большое число зазоров в магнитопроводе. Легко показать, что такая система будет иметь максимальную добротность при определенном соотношении δ/Δ , где Δ — высота дисков 3. Как известно, добротность определяется соотношением $Q = \frac{P_p}{P_m + P_{ст}}$, где P_p — реактивная мощность трансформатора; P_m и $P_{ст}$ — потери в меди и стали. Если заданы рабочая частота, материал магнитопровода и обмоток, а также размеры магнитопровода

(полная длина и сечение в каждом месте), то $P_p = k_1 \frac{i_L^2}{R}$, $P_m = k_2 i_L^2$ и $P_{ст} = k_3 \frac{i_L^2}{R^2}$, где $R = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i}$ — полное магнитное сопротивление магнитопровода; k_1 , k_2 и k_3 — коэффициенты, постоянные при заданных условиях. Отсюда следует, что

$$Q = \frac{k_1 R}{k_2 R + k_3} \quad (5)$$

Как видно из уравнения (5), Q является функцией магнитного сопротивления цепи R . Из условия $\frac{dQ}{dR} = 0$ находим величину $R^* = \sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$, соответствующую максимальной добротности трансформатора. Величины δ и Δ , обеспечивающие $\sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} = R^* = \sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$, легко вычислить. Нетрудно видеть, что при $R = R^*$ $P_m = P_{ст}$, т. е. при равенстве потерь в обмотках и стали трансформатора добротность максимальна.

Таким образом, в описываемой установке величина зазоров δ между дисками определяется необходимой электрической прочностью и условием получения максимальной добротности.

Параметры установки ЭлТ-1,5

Перед описанием конструктивных особенностей ускорителя ЭлТ-1,5 приведем его основные параметры:

Напряжение питания; первичной обмотки	220/380 в, 50 гц
Максимальное напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода	1,7 Мв
Максимальное ускоряющее напряжение на трубке	1,5 Мв
Диапазон изменения ускоряющего напряжения	400 кв — 1,5 Мв
Стабильность ускоряющего напряжения	до 2%
Средняя мощность электронного пучка в основном рабочем режиме ($u_{тр} = 1,5$ Мв)	25 ват
Диапазон изменения средней мощности	0 — 25 ват
Значение a для основного режима	0,88
Длительность импульсов тока для основного режима	5 мсек
Среднее значение тока в основном режиме	~17 ма
Максимальный ток в импульсе в основном режиме	100 ма

Суммарные потери в обмотках и магнитопроводе трансформатора, а также в инжекторе и системе его питания в основном режиме ~2,5 ват
 Индуктивность трансформатора L $4 \cdot 10^4$ гн
 Общая емкость трансформатора C $250 \cdot 10^{-12}$ ф
 Собственная частота контура LC 50 гц
 Индуктивность рассеяния первичной обмотки в основном режиме $4,6 \cdot 10^{-4}$ гн

Габариты ускорителя с выпускным устройством и вакуумным насосом
 Габариты котла высота 3,3 м, ширина 1,3 м, высота 2,1 м, диаметр 1,2 м
 Давление газа в котле 15 атм
 Вес ускорителя 8 т

Конструкция ЭлТ-1,5

Трансформатор. Магнитопровод изготовлен из пластин трансформаторной стали Э43 толщиной 0,35 мм, склеенных эпоксидной смолой. Диски 3 (всего 16 дисков), головка 4 и другие детали магнитопровода набраны из пластин, расположенных радиально, и после пропитки смолой по специальной технологии обработаны по торцовым поверхностям с целью получения качественной поверхности. Напряжение на зазорах δ (в описываемой установке $\delta = 6$ мм) около 100 кв при номинальном напряжении на ускорителе, равном 1,5 Мв. Зазор $a = 120$ мм; максимальная напряженность в газе ~160 кв/см при напряжении на вторичной обмотке 1,5 Мв. Головка 4 (рис. 5) и другие детали магнитопровода после склеивания обрабатывались для получения нужной формы и качества поверхности. Чтобы избежать закорачивания пластин при механической обработке, толщина изоляции между пластинами доходит до 0,15 мм. В дисках и головке имеются центральные отверстия со встроенными замкнутыми медными кольцами 22 (см. рис. 1). На кольца опираются несущие изоляционные цилиндры 23. Пластины трансформаторного железа дисков электрически соединены с кольцами 22, которые экранируют практически до нуля магнитные поля трансформатора в области трубки.

Первичная обмотка 1 намотана на медный экран 25, изоляцией служат стеклотента и эпоксидная смола. Каждая секция 2 вторичной обмотки состоит из 3550 витков медного провода сечением 0,1 мм². Секции соединены последовательно. Рабочее напряжение на каждой секции ~50 кв. Как видно из рис. 1, зазор между соседними секциями 2 изменяется с радиусом, что обеспечивает примерно равную напряженность электрического поля между сек-

циями. Величина испытательного напряжения на секциях в полтора-два раза больше рабочего. Экраны 26 предохраняют вторичную обмотку от повреждения при пробоях, разрядники 27 — от перенапряжений на секциях в процессе тренировки. Слои секции изолированы бумагой, пропитанной эпоксидной смолой. После специальной пропитки секции становятся монолитными с необходимыми электрическими и механическими характеристиками. Катушка 7 имеет 36 витков. Конденсаторная батарея 12 состоит из 24 конденсаторов общей емкостью 480 мкф с рабочим напряжением 500 в и расположена в полости головки 4. При выбранных геометрических размерах трансформатора и числе витков вторичной обмотки собственная частота системы равна 50 гц.

Инжектор и ускоряющая трубка. Инжектор экспериментальной установки имеет борид-лантановый катод диаметром 5 мм с косвенным подогревом и управляющий электрод 9. При напряжении на всей трубке 1,5 Мв напряжение на управляющем электроде относительно катода, полностью запирающее ток, равно 2 кв.

Ускоряющая трубка разборная и состоит из восьми одинаковых секций, соединенных между собой резиновыми уплотнениями. Каждая секция изготовлена из эпоксидных колец, склеенных с дюралевыми электродами. Общая длина трубки ~1,2 м, число изоляционных колец равно 64. Напряжение подводится к электродам в 18 точках при помощи упругих контактов 24, соединяющих электроды с дисками 3, головкой 4 и основанием магнитопровода 16. Напряжение на промежуточных кольцах задается омическим делителем 28. В настоящее время испытываются керамические трубки, имеющие минимальное число вакуумных стыков. В трубке установлено 16 короткофокусных постоянных магнитных линз 29, которые обеспечивают диаметр пучка 3—5 мм при токе около 100 ма.

У оси трубки расположены экраны 30, изготовленные из сплава, содержащего 88% свинца. Экраны существенно ослабляют радиацию, возникающую при попадании электронов на электроды и от других эффектов. Для обеспечения вакуумной откачки электроды 31 имеют отверстия, смещенные в соседних электродах относительно друг друга. Трубка откачивается насосом Н5С с азотной ловушкой.

Инжектор и трубка вынимаются через головку 4 без снятия котла. Электроды 31 с линзами 29 и экранами 30 легко снимаются и мо-



Рис. 5. Центральная колонна трансформатора.

гут быть заменены при экспериментировании или при выходе из строя в процессе эксплуатации. Шаровая опора 32 и уплотнение трубки 33 обеспечивают мягкое крепление и отсутствие нагрузок на изолятор при несоосности трубки с колонной магнитопровода.

Котел, выпускное окно и другие системы. Котел 15, в котором размещен трансформатор, заполнен смесью фреона и азота при давлении до 15 атм. Газ подается в котел через сушилку. Весь ускоритель после переборки просушивается под вакуумом.

Конструкция системы, предназначенной для выпуска электронного пучка в атмосферу, определяется условиями конкретного технологического процесса, в котором используются ускоренные электроны. В экспериментальном ускорителе выпуск осуществляется через окно из титановой фольги толщиной 50 мк и площадью 400 × 40 мм, которая охлаждается сжатым воздухом.

Чтобы радиация, возникающая при торможении пучка в облучаемом изделии, не попадала в трансформатор; под котлом установлена стальная защита 34.

Несмотря на высокий к. п. д. ускорителя, потери в обмотках и магнитопроводе транс-

форматора, а также в инжекторе и системе его питания составляют около 2,5 квт. Для снятия тепла имеются охлаждаемый водой радиатор 35 и вентилятор 36, обеспечивающий принудительную циркуляцию газа в котле.

Системы управления и автоматики ускорителя

Принципиальная схема управления и автоматики показана на рис. 6. Напряжение на вторичной обмотке регулируется путем изменения коэффициента трансформации, для чего имеется несколько отводов первичной обмотки и переключатель. Напряжение на вторичной обмотке измеряется ступенями через 50—100 кв. Плавная регулировка напряжения на трубке может осуществляться варьированием величины падения напряжения $\alpha = \frac{u_{тр}}{u_{Пт}}$ за счет изменения ширины импульсов тока $t_2 - t_1$ и, следовательно, некоторого изменения величины средней мощности \bar{P} . Стабилизация заданной мощности также осуществляется подстройкой ширины токовых импульсов. Для этих

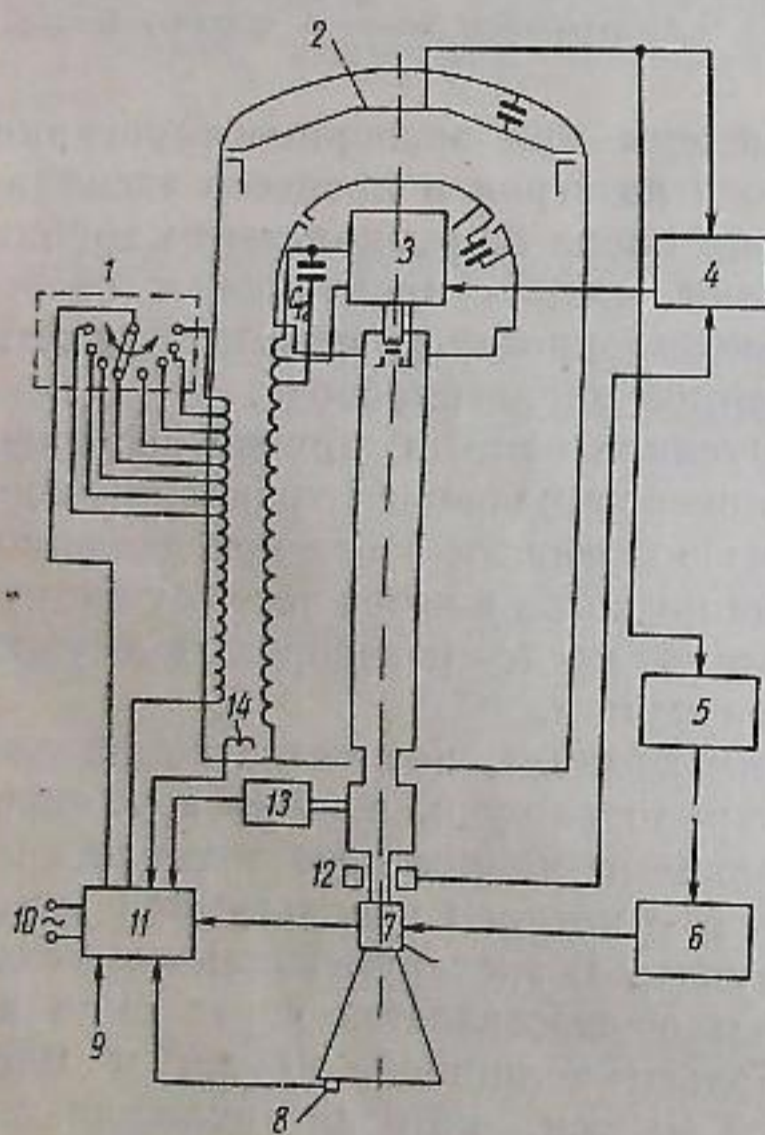


Рис. 6. Принципиальная блок-схема управления и автоматики.

1 — переключатель; 2 — емкостные датчики напряжения на трубке; 3 — система питания инжектора; 4 — схема регулирования и стабилизации мощности; 5 — схема регулирования и стабилизации развертки; 6 — генератор развертки; 7 — разворачивающий магнит; 8 — датчик температуры фольги; 9 — от датчика давления в котле; 10 — сеть; 11 — система выключения сети; 12 — пояс Роговского; 13 — вакуумный датчик; 14 — датчик пробоя.

операций предназначена схема регулировки и стабилизации мощности, датчиками которой служат пояс Роговского и емкостный датчик напряжения на трубке.

Система питания инжектора вырабатывает напряжение на управляющем электроде u_0 , необходимое для обеспечения $i_{тр}(t)$, нужного для поддержания постоянного напряжения на трубке. При необходимости поддерживать постоянство $u_{тр}$ с точностью до 2% и выше в системе питания инжектора устанавливается схема с обратной связью, вырабатывающая u_0 и имеющая на входе емкостный датчик напряжения на трубке, расположенный в головке 4. В случае, когда допускается изменение энергии электронов порядка 5—10%, вместо схемы регулирования может быть установлен источник постоянной э. д. с., полностью запирающий ток инжектора, и навстречу ему включен емкостный датчик головки. Тогда в зависимости от соотношения между величиной постоянной э. д. с. и э. д. с., возникающей на емкостном датчике, инжектор будет открыт на заданное время $t_2 - t_1$. Кроме того, может быть установлена схема, обеспечивающая $u_{тр} = \text{const}$ или другие законы $u_{тр}(t)$ по заданной программе.

Система питания инжектора обеспечивает также накал катода. Сама система питается от части витков вторичной обмотки. Для обеспечения постоянного питания катода и других схем, заложенных в головке 4, при изменении напряжения на трубке от 400 кв до 1,5 Мв в системе питания инжектора имеется соответствующая система стабилизации. Различные устройства регулировки параметров системы питания, находящейся под высоким потенциалом (изменение накала катода, ширины импульса тока и др.), управляются, как и в обычных электростатических генераторах, при помощи изоляционных нитей. Успешно опробовалось также включение схемы с обратной связью, вырабатывающей u_0 светом. Источник света располагался в заземленной части, а фотодиод — в головке 4. В такой системе момент t_1 , когда начинает работать схема регулирования и по трубке течет ток, задается на каждом периоде напряжения. В этом случае электроны пропускаются по трубке как одиночными импульсами, так и с любой частотой повторения (до 50 раз в 1 сек).

Генератор развертки обеспечивает линейное изменение поля в магните, разворачивающем электроны вдоль длинной стороны (400 мм) выпускного окна; частота развертки 2 кГц.

Поддержание постоянного угла развертки при различных энергиях электронов осуществляется схемой регулирования и стабилизации развертки. В перпендикулярном направлении пучок разворачивается синусоидальным напряжением промышленной частоты.

Для отключения напряжения сети при нарушении работы какого-либо из узлов ускорителя предназначена система выключения.

Результаты эксперимента

Установка ЭлТ-1,5 была опробована в различных режимах работы. Ускорение пучка осуществлялось как отдельными импульсами, так и с частотой повторения до 50 гц. Основные измерения тока пучка проводились цилиндром Фарадея, расположенным в воздухе, и поясом Роговского. Энергия пучка определялась по емкостному датчику, расположенному на зазоре a . Средняя мощность измерялась как тепловым методом, так и по потребляемой трансформатором мощности за вычетом потерь в стали и меди трансформатора.

Электроны ускорялись в диапазоне энергий 400 квэ — 1,5 Мэв. При энергии 1,5 Мэв средняя мощность была равна около 25 квт, средний ток 17 ма, максимальный ток в импульсе 100 ма при ширине импульсов 5 мсек, к. п. д. ускорителя $\sim 90\%$. Ширина импульсов составляла 0—5 мсек. Диаметр пучка на выходе из трубки при средней мощности 25 квт был равен около 5 мм. Развертка пучка проводилась в двух направлениях — на углы $\pm 2,5$ и $\pm 25^\circ$. Максимальное значение средней мощности, полученное в кратковременном режиме, составило ~ 30 квт.

Заключение

Опыт создания и запуска первого экспериментального ускорителя ЭлТ-1,5 показал, что предложенная схема осуществима и расчеты, положенные в основу установки, правильны. Высокий к. п. д. при значительной средней мощности позволяет использовать аналогичные установки в различных энергоемких радиационных процессах, в металлургии и для других целей.

Наиболее близкими по параметрам к описанной установке являются ускорители прямого действия — динамитрон, трансформатор с изолированным сердечником и резонансный трансформатор [2]. Для питания динамитрона и трансформатора с изолированным сердечником необходимы преобразователи на высокую

частоту (первый — на сотни килогерц и второй — около килогерца). В обеих системах выпрямление напряжения производится при помощи многих выпрямительных ячеек, что усложняет получение высокой надежности. Резонансные трансформаторы также работают на частоте выше промышленной.

Системы с ВЧ-ускорением (линейные ускорители и микротроны), хотя и имеют большие предельные энергии, чем перечисленные установки, обладают существенно более низким к. п. д. и, по-видимому, в диапазоне энергий 1—3 Мэв не могут конкурировать с электронным трансформатором в случаях, когда требуются пучки с мощностью во много киловатт.

Основное отличие установок типа ЭлТ — выпрямление и стабилизация ускоряющего напряжения при помощи самого электронного пучка, а также питание установки от сети промышленной частоты 50 или 60 гц. Кроме того, такие установки позволяют проводить ускорение с заданным распределением электронов по энергиям, что необходимо, в частности, для получения равномерной дозы по толщине облучаемого материала.

Недостатком ускорителей такого типа является существенное превышение импульсной мощности пучка над средней. Однако это не препятствует применению ускорителей, так как для энергоемких процессов необходимые дозы набираются за многие сотни импульсов, что практически эквивалентно воздействию непрерывного пучка. Наибольшие трудности могли быть связаны с ускорительной трубкой, которая должна пропускать импульсный ток, в несколько раз превышающий среднее значение.

Однако разработанная конструкция трубки позволяет пропускать необходимые импульсные мощности. Другим недостатком описываемой системы является превышение (до 10—15%) обратного напряжения на трубке по сравнению с ускоряющим. Однако это не сказывается на общей электрической прочности системы, так как в отсутствие пучка и сопутствующей ему радиации (хотя и ослабленной специальными экранами) установка (трубка и газовые зазоры) способна выдерживать большие напряжения.

Дальнейшие усовершенствования электронного трансформатора позволят увеличить энергию частиц, получаемую на таких установках, и средние мощности. По-видимому, в дальнейшем удастся получить к. п. д., близкий

к к. п. д. обычного трансформатора (95—98%). В настоящее время обрабатывается конструкция ускорителя на 1,5 Мэв, предназначенного для серийного выпуска.

В заключение считаем своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Института ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, принявших активное участие в конструировании и наладке установки: инженеров Г. Крайнова, В. Николаева, И. Шалашова, механиков В. Бирюкова, Г. Балыкова, М. Воронова,

М. Губина, Ю. Ефременкова, А. Косачева, М. Степанова и техника В. Кирова.

Поступила в Редакцию 24/1 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Абрамян, В. А. Гапонов. Устройство для ускорения заряженных частиц с высоким к. п. д. Авторское свидетельство № 906570 от 31.08.1964 г.
2. M. Cleland, K. Morganstern. Nucleonics, No. 8, 52 (1960).

Экспериментальное определение фактора качества излучения вблизи ускорителей высокой энергии

В. Н. ЛЕБЕДЕВ, М. ЗЕЛЬЧИНСКИЙ, М. И. САЛАЦКАЯ

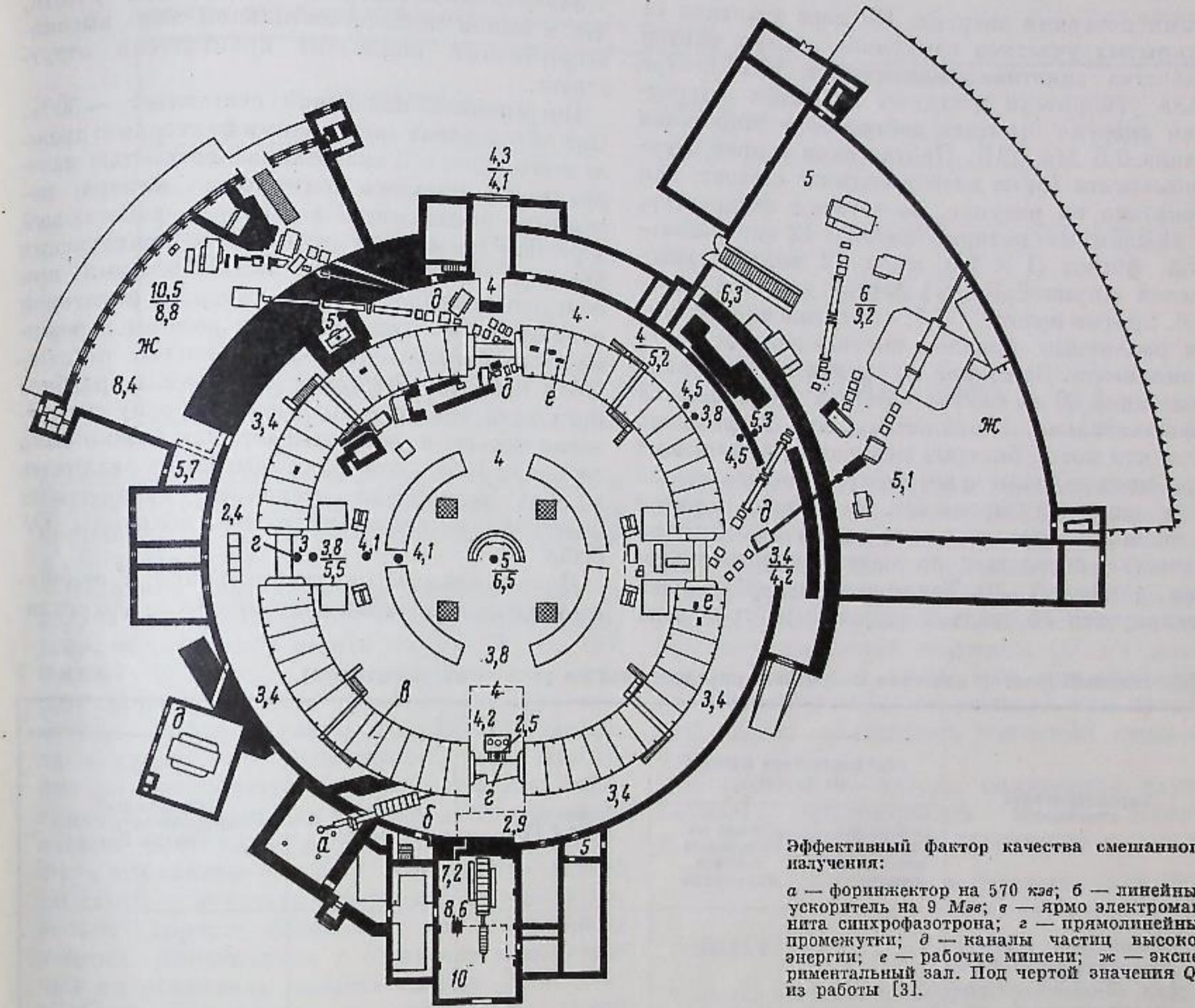
УДК 577.391

Приведены экспериментальные данные, характеризующие величину эффективного фактора качества QF многокомпонентного импульсного излучения на различных участках синхрофазотрона на 10 Гэв. Измерения проводились на основе рекомбинационного метода. Величина QF изменяется от 3 до 11. Результаты измерений сравниваются с величинами, определенными на других ускорителях высокой энергии. Даны также некоторые значения QF , полученные в экспериментах на пучках частиц синхроциклотрона на 680 Мэв.

Выходом из этого положения может служить использование известного экспериментального соотношения между плотностью линейных потерь энергии и фактором качества QF * [6, 7]. С помощью такого соотношения можно вычислить эффективную величину QF любого излучения, если известен спектр линейной потери энергии (ЛПЭ) этого излучения. Зная величину QF , легко оценить значение дозового эквивалента в бэрадах. Спектр ЛПЭ в свою очередь можно определить с помощью тканеэквивалентного пропорционального счетчика Росси [8, 9]. Оценку среднего значения ЛПЭ возможно получить также путем анализа треков в ядерных эмульсиях или на снимках с трековых камер [10, 11]. Однако любой из перечисленных методов непригоден для быстрых и оперативных измерений в практических условиях.

Предложенный недавно рекомбинационный метод [12, 13] дает возможность преодолеть некоторые из этих трудностей и определить эффективный фактор качества неизвестного излучения одновременно с измерением поглощенной дозы, не прибегая к анализу спектра ЛПЭ. Этот метод был использован для определения величины фактора качества смешанного импульс-

* Термин «фактор качества» излучения предложен Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) [5] для обозначения физического измеримого параметра излучения, характеризующего это излучение с точки зрения ожидаемого биологического эффекта, в отличие от термина «относительная биологическая эффективность» (ОБЭ), который теперь рекомендуют использовать только в радиобиологии.



Эффективный фактор качества смешанного излучения:

а — форинжектор на 570 кэв; б — линейный ускоритель на 9 Мэв; в — ярмо электромагнита синхрофазотрона; г — прямолинейные промежутки; д — каналы частиц высокой энергии; е — рабочие мишени; ж — экспериментальный зал. Под чертой значения QF из работы [3].

ного излучения вблизи ускорителей высокой энергии ОИЯИ.

Измерения производились в помощью сдвоенной тканеэквивалентной рекомбинационной камеры, подробно описанной в работе [14]. Величиной, пропорциональной фактору качества, служило отношение ионных токов двух камер, одна из которых работала в режиме насыщения, а в другой были созданы условия для колонной рекомбинации. В режиме колонной рекомбинации количество рекомбинирующих ионов зависит от линейной плотности ионов в треках частиц.

Результаты измерений, усредненные по всему объему камеры, соответствуют эффективной глубине ткани 2—5 см, что обусловлено конструктивными особенностями тканеэквивалент-

ной камеры. Погрешность, возникающая за счет довольно больших (30 × 30 см) размеров камеры (неоднородность поля излучения, изменение спектра в объеме камеры и т. д.), не учитывалась.

Результаты измерений эффективного фактора качества излучения в наиболее характерных точках внутри здания синхрофазотрона на 10 Гэв представлены на рисунке. Как ожидалось, QF достигает минимального значения (≤ 3) на участках, непосредственно прилегающих к открытым прямолинейным промежуткам ускорителя. В этих местах основной вклад в дозу дают первичные и вторичные частицы высокой энергии — релятивистские протоны и нейтроны, мезоны и электрон-фотонный компонент, — обладающие минимальными удель-