

счета зольного остатка с помощью счетчика МСТ-17. Образцы на тех же подложках оставляли для повторных измерений, проводившихся обычно на 7, 15, 30, 50-е сутки и позже.

Для уменьшения слоя инертной пыли ежедневные пробы аэрозолей отбирали на высоте 12 м от земли с помощью пробоотборника, созданного автором. Через ткань типа ФПП-15 площадью 0,25 м<sup>2</sup> за 1 ч прокачивали 1000 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха. Кроме того, еженедельно отбирали пробы с экспозицией 44 ч и в некоторые дни — 20 ч. После окончания прокачки фильтр переносили на специальную подложку размером 5 × 7 см и измеряли скорость счета с помощью счетчика СБТ-10 через 20 мин, 1, 2 и 4 ч после отбора проб. Эти измерения продолжительностью 5 мин каждое служили для определения короткоживущих изотопов. На четвертые сутки проводилось еще одно измерение в течение 30 мин для определения долгоживущих изотопов.

На рисунке представлены усредненные результаты проведенных исследований, приведенные к одному масштабу времени (месяц). Доля долгоживущих изотопов в суммарной активности аэрозолей приведена только для фильтров с экспозицией 20 и 44 ч, поскольку скорость счета фильтров с экспозицией 1 ч на четвертые сутки чаще всего не отличается от фоновой; за 100% принята скорость счета, измеренная на 20-й минуте после окончания отбора пробы. Для кривых спада скорости счета за 100% принят результат измерения пробы на четвертые сутки после ее отбора. До января 1968 г. и в октябре — декабре этого же года скорость счета проб была незначительной для построения достоверных кривых спада.

Представленные на рисунке данные позволяют сделать следующие заключения.

До января 1968 г. радиоактивность атмосферного воздуха была невелика и определялась, по-видимому, долгоживущими изотопами глобальных выпадений от предшествовавших ядерных испытаний. Начиная с января 1968 г. скорость счета упомянутых проб возросла и держалась на этом уровне до осени 1968 г., после чего стала падать и к концу года была близка к исходным значениям.

Характер кривых спада активности указывает на закономерное убывание скорости распада во всех пробах с увеличением продолжительности периода после ядерного взрыва. Можно также отметить значительное увеличение доли долгоживущих излучателей в суммарной скорости счета проб аэрозолей начиная с января 1968 г. и возвращение ее практически к исходным цифрам осенью этого же года.

Одинаковая направленность изменений рассмотренных показателей в сочетании с одновременностью и цикличностью этих изменений вне зависимости от времени года, а также характер кривых спада скорости счета проб позволяют сделать вывод, что измеренные радиоактивные выпадения обусловлены одним радиоактивным облаком. Это свидетельствует о возможности достаточной для практических целей надежностью простейшим радиометрическим методом обнаруживать и идентифицировать глобальные радиоактивные выпадения, вызванные ядерными испытаниями в атмосфере.

Предлагаемый метод позволяет также значительно сократить или вообще исключить радиохимические и спектрометрические анализы при контроле за радиоактивностью атмосферы в районе расположения ядерных реакторов и других объектов, где ведется работы с использованием радиоактивных изотопов.

Поступило в Редакцию 17/VI 1969 г.

## Безжелезный индукционный линейный ускоритель

А. И. ПАВЛОВСКИЙ, А. И. ГЕРАСИМОВ, Д. И. ЗЕНКОВ,  
В. С. БОСАМЫКИН, А. П. КЛЕМЕНТЬЕВ, В. А. ТАНАНАКИН

УДК 621.384.6.03

Линейные индукционные ускорители (ЛИУ) в последние годы нашли применение для получения импульсных токов электронов в сотни ампер с энергией несколько мегаэлектронвольт [1—2]. Установки такого типа представляют собой серию последовательно соединенных трансформаторов с одновитковыми катушками. Ускорение частиц осуществляется электрическим полем, индуцируемым при синхронном изменении потоков в ферромагнитных сердечниках трансформаторов. Отказ от использования сердечников позволяет существенно повысить трансформируемую мощность и одновременно упростить конструкцию ускорителя, уменьшить его размеры и снизить стоимость. Авторами было рассмотрено несколько конструктивных схем ЛИУ с безжелезными магнитопроводами (см., например, работы [3, 4]), представляющих интерес в первую очередь для получения одиночных или серий импульсов тока в десятки тысяч ампер заряженных частиц с энергией в десятки мегаэлектронвольт. В 1967 г. создан экспериментальный образец ускорителя. На рис. 1 показана схема осуществленного варианта ускоряющей системы. Ее особенностью является объединение всех элементов каждого первичного контура: кольцевого конденсатора *C*, управляемого разрядника *P* и соединяющих их шин (*AB* и *DE* — в торообразный магнитопровод *ABDE*, удерживающий замкнутый переменный магнитный поток, который создается током при разряде

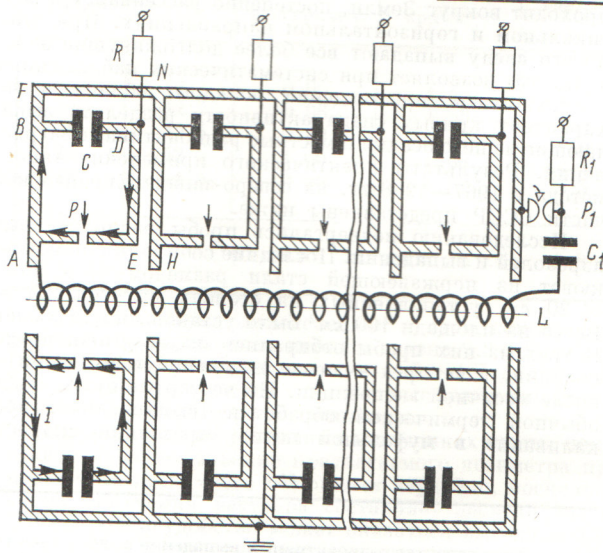
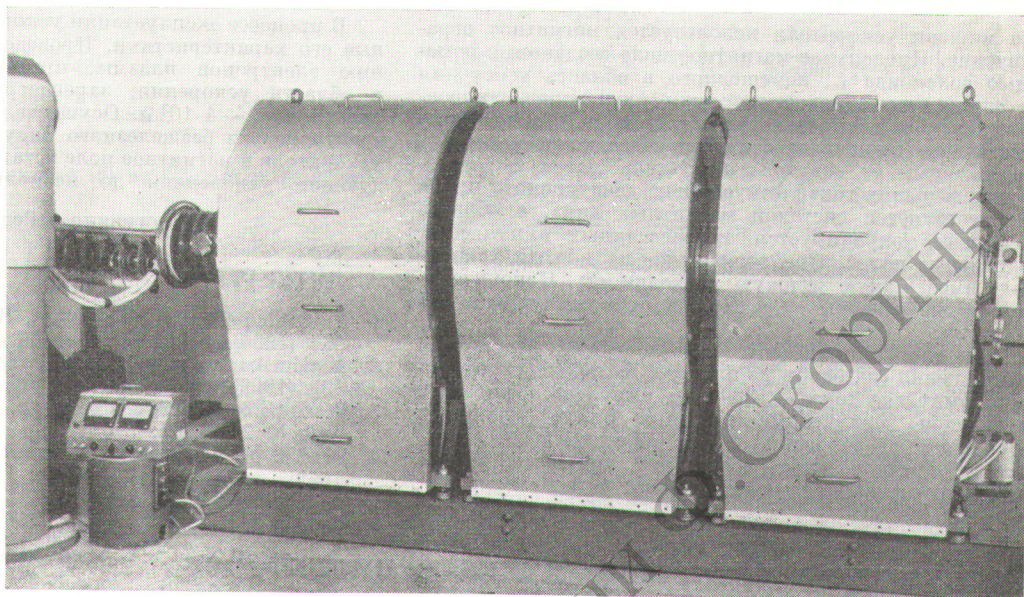
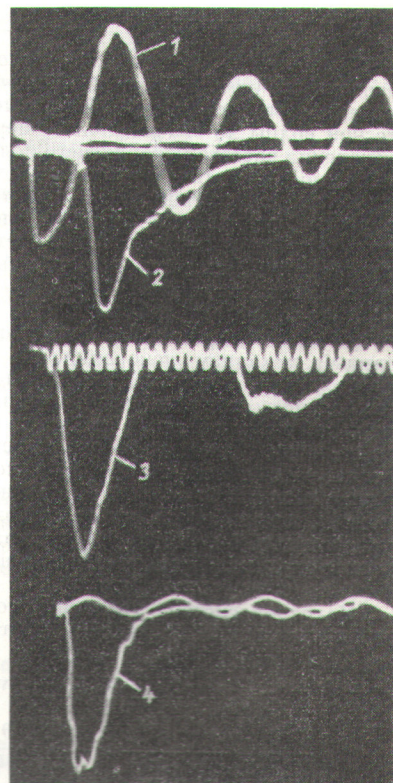


Рис. 1. Схема ускоряющей системы: *C* и *C*<sub>1</sub> — конденсаторы; *P* и *P*<sub>1</sub> — управляемые разрядники; *R* и *R*<sub>1</sub> — резисторы; *L* — соленоид; *I* — ток первичного контура.



Р и с. 2. Общий вид ускорителя.

накопительного конденсатора *C*. Индуцируемое вихревое электрическое поле концентрируется в ускоряющем зазоре *АН* заземленным вторичным контуром *AFNH*, охватывающим магнитопровод. Толщина дисков *AB* и *DE* больше глубины скин-слоя на частоте разрядного тока, что позволяет использовать один из дисков как часть вторичного контура. Минимальная величина магнитного потока рассеяния достигается благодаря применению в безжелезном магнитопроводе конденсатора и коммутатора кольцевой геометрии. В ускорителе накопительная емкость  $C = 0,053 \text{ мкф}$  набрана из десяти малоиндуктивных сикондовых конденсаторов, рассчитанных на рабочее напряжение  $50 \text{ кВ}$  \*. Цилиндрические электроды разрядника *P* вместе с симметрично расположенными по окружности четырьмя параллельными токовыми разрядными каналами, одновременно закорачивающими межэлектродный зазор, образуют внутренний цилиндр тока. Точность включения разрядника не хуже  $\pm 2 \text{ нсек}$ . Коэффициент связи первичного и вторичного контуров составляет  $\sim 95\%$ . Амплитудное значение разрядного тока в первичном контуре  $10^5 \text{ а}$ , а частота колебаний  $6,2 \text{ Мгц}$ . Безжелезный магнитопровод вместе с охватывающим его вторичным контуром образует ускорятельную ячейку, высота которой  $50 \text{ мм}$ , диаметр  $1050 \text{ мм}$ . Ускоритель на  $2 \text{ Мэв}$  собран из 48 одинаковых ячеек, объединенных в три блока. Общий вид ускорителя показан на рис. 2. Электроны с энергией в несколько сот килоэлектронвольт инжектируются в него из плоского диода с протонакальным катодом. Источником напряжения инжекции служит малоиндуктивный генератор коаксиальной конструкции, собранный по схеме Аркадьева — Маркса. Для проводки килоамперных пучков от инжектора



Р и с. 3. Осциллограммы:

1 — ускоряющее напряжение; 2 — напряжение инжекции; 3 — электронный ток на выходе ускорителя (метки  $100 \text{ Мгц}$ ); 4 — импульс тормозного излучения (метки  $10 \text{ Мгц}$ ).

\* Сикондовые конденсаторы типа К15-10 разработаны под руководством М. И. Неймана и Г. П. Блохиной.

до мишени ускорителя используется магнитное ограничение. Продольное магнитное поле создается с помощью соленоида  $L$ , помещенного в область ускорения и служащего одновременно для улучшения однородности ускоряющего электрического поля. Ускоряющая система нагружена на соленоид через конденсатор  $C_1$ , заряжаемый от внешнего источника. В случае ускорения меньших токов фокусировка электронного пучка осуществляется системой магнитных линз, а область ускорения экранируется от рассеянных импульсных магнитных полей. При этом пучок на выходе ускорителя имеет малую угловую расходимость. Накопительные конденсаторы  $C$  заряжаются импульсно за 5 мксек.

На рис. 3 приведены осциллограммы вторичного напряжения (на одном из блоков), напряжения инжекции, импульса тока  $\sim 1300$  а и импульса тормозного излучения, полученные в одном цикле ускорения электронов до энергии  $\sim 2$  Мэв. (Максимальное значение ускоренного тока составляет примерно 2000 а и ограничивается инжектирующим устройством.)

## Резонансное ускорение пучка осцилляторов в поле плоской волны

В. Б. КРАСОВИЦКИЙ

УДК 621.384.601

В работах [1, 2] показано, что осциллятор, образованный заряженной частицей во внешнем магнитном поле, может быть ускорен полем плоской монохроматической волны до значительных энергий, если в начале ускорения частота ускоряющего поля в системе отсчета, связанной с частицей, равна гирочастоте. Интересно, что синхронизм между полем и частицей не нарушается с ростом энергии частицы даже при релятивистских скоростях, вследствие чего (без учета силы торможения излучением [3]) частица может быть ускорена до бесконечно больших энергий.

Применяемое в работах [1, 2] одночастичное приближение позволяет достаточно полно изучить элементарный механизм ускорения, но описывает процесс не полностью, так как предполагает, что энергия ускоряющего поля значительно больше энергии, приобретаемой частицей, и не учитывает влияния ускоряемого тока на поле. Этот эффект имеет существенное значение, когда плотность энергии ускоряемого тока становится сравнимой с плотностью энергии ускоряющего поля и, как показано ниже, приводит к срыву режима ускорения. При этом максимальная энергия, приобретаемая пучком, зависит от начальной амплитуды ускоряющего поля и плотности пучка.

Исходная система уравнений состоит из уравнений движения пучка и уравнений Максвелла для полей:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \gamma \mathbf{v} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \gamma \mathbf{v} &= \frac{e}{m} \mathbf{E} + \frac{e}{mc} [\mathbf{v}, \mathbf{H} + \mathbf{H}_0]; \\ \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= \frac{4\pi e}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} n \mathbf{v}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{v}$  — скорость пучка;  $\gamma = \left(1 - \frac{|\mathbf{v}|^2}{c^2}\right)^{-1/2}$  — его энергия, а  $n$  — плотность. Ось  $z$  направим вдоль внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ , так что  $v_z$  — проекция скорости пучка на направление внешнего магнитного поля.

В процессе эксплуатации ускорителя изучены основные его характеристики. Проведены опыты по ускорению электронов плазмы, предварительно созданной в области ускорения; зарегистрирован ток быстрых электронов  $\sim 4 \cdot 10^3$  а. Осуществлена инжекция пучка электронов из безжелезного индукционного линейного ускорителя в магнитное поле бетатронного типа с последующим ускорением до нескольких десятков Мэв.

Поступило в Редакцию 4/VIII 1969 г.

### ЛИТЕРАТУРА

1. N. Christofilos et al. Rev. Sci. Instrum., 35, 886 (1964).
2. А. И. Анацкий и др. «Атомная энергия», 21, 439 (1966).
3. В. С. Босамыкин и др. Бюллетень изобретений № 23, 1967.
4. В. С. Босамыкин. Бюллетень изобретений № 9, 1969.

При решении системы (1) предположим, что  $v_z(t, z) = v_{||}(t)$  и  $n(t, z) = n_0$  (уравнение непрерывности при этом удовлетворяется автоматически [4]), и будем искать решение в виде плоских волн круговой поляризации:

$$\left. \begin{aligned} E_x + iE_y &= E(t) \exp i[\Phi + \psi(t)]; \\ v_x + iv_y &= v_{\perp}(t) \exp i[\Phi + \vartheta(t)], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Phi = \omega t - kz$ ,  $\omega = ck$ , а  $E(t)$ ,  $v_{\perp}(t)$ ,  $\psi(t)$  и  $\vartheta(t)$  — медленно изменяющиеся функции времени. Подставляя выражение (2) в систему (1) и выражая магнитное поле через электрическое  $\mathbf{H} = [n\mathbf{E}]$  (где  $\mathbf{n}$  — единичный вектор вдоль  $\mathbf{H}_0$ ), получаем систему уравнений в полных производных по времени:

$$\frac{d}{dt} \gamma v_{\perp} = \frac{e}{m} \left(1 - \frac{v_{||}}{c}\right) E \cos(\vartheta - \psi); \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \gamma v_{||} = \frac{e}{mc} v_{\perp} E \cos(\vartheta - \psi); \quad (4)$$

$$\frac{dE}{dt} = -2\pi en_0 v_{\perp} \cos(\vartheta - \psi); \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (\vartheta - \psi) = \frac{\omega_H}{\gamma} - \omega \left(1 - \frac{v_{||}}{c}\right) -$$

$$- \left( \frac{d}{dt} \gamma v_{\perp} + \frac{dE}{dt} \right) \operatorname{tg}(\vartheta - \psi). \quad (6)$$

Из уравнений (3) — (5) можно найти законы сохранения энергии и импульса в системе ускоряющей