

УДК 621.384.659

Сильноточный электронный ускоритель «Импульс»

КАЗАНСКИЙ Л. Н., КОЛОМЕНСКИЙ А. А., МЕСХИ Г. О., ЯБЛОКОВ Б. Н.

Ускоритель «Импульс», принадлежащий к первому поколению сильноточных электронных ускорителей, спроектирован и построен в лаборатории проблем новых ускорителей ФИАН в 1969—1971 гг. [1]. В 1973 г. к ускорителю добавлен второй блок, и впервые в отечественной практике на нем был осуществлен двухпучковый режим работы, что повысило эффективность использования ускорителя и обеспечило параллельное проведение различных экспериментов на двух независимых пучках [2].

В настоящее время ускоритель «Импульс» состоит из общего воздушного генератора импульсных напряжений (ГИН) с относящимся к нему оборудованием и двух идентичных цилиндрических блоков. Каждый блок содержит двойную формирующую линию (ДФЛ), трансформирующую линию (ТЛ) и электронную пушку (ЭП) (рис. 1). Переход от одного однопучкового эксперимента к другому занимает несколько минут и сводится к переключению соединения между блоками и ГИН. Для синхронной генерации двух пучков к ГИН присоединяются оба блока.

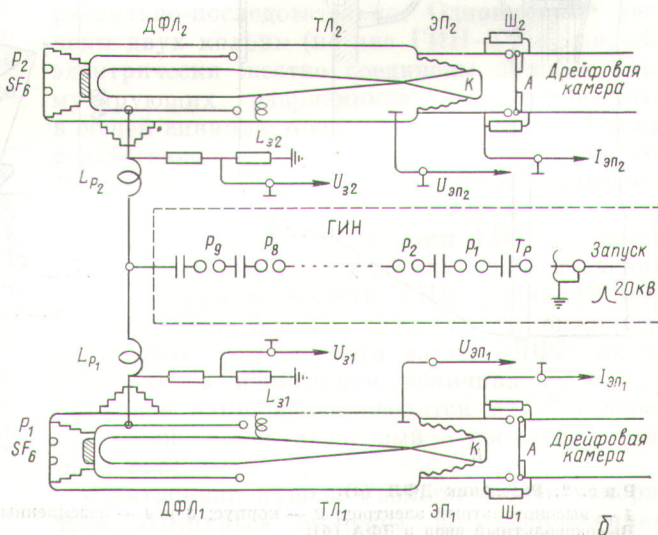
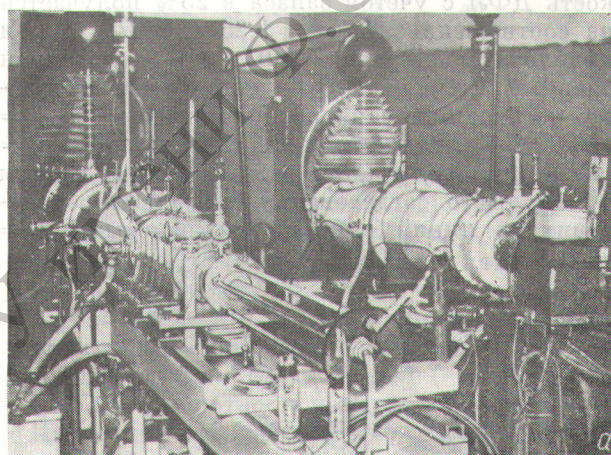
Впервые примененные на ускорителе повышающая напряжением ТЛ, глицерин ($\epsilon = 44$) для изоляции системы ДФЛ—ТЛ, неуправляемый многоискровой разрядник, 30-омный переход из глицерина в вакуум и т. п. требовали эксплуатационной проверки. В настоящей статье излагаются методика проектирования и ее проверка в ходе длительной работы ускорителя.

Выбор параметров и конструкция основных элементов ускорителя

Ускоритель «Импульс» рассчитывался на генерацию одиночных импульсов электронного пучка длительностью 30—40 нс с параметрами 1 кДж, 1 МэВ, 35 кА при минимальных размерах установки. С учетом вольт-секундной зависимости электропрочности диэлектриков ($E t^{1/3} \approx \text{const}$ для $t \leq 1$ мкс) было решено повышать напряжение при передаче энергии к ЭП и соответственно выбрать схему ускорителя ГИН—ДФЛ—ТЛ—ЭП.

Трансформирующая линия. Коэффициент трансформации ТЛ ограничен допустимым увеличением длины установки при заданном искажении формы импульса $\Delta U/U$. Если ДФЛ и ТЛ заполнены одним и тем же диэлектриком

и $\Delta U/U = 0,1$, то отношение длины этих линий определяется по таблице. Для «Импульса» были выбраны $l_{ТЛ} = l_{ДФЛ}$ и $K_{ТЛ} = 1,4$. Конструктивно ТЛ выполнена в виде коаксиальной линии с коническим центральным электродом диаметром 90 мм на входе и 15 мм на выходе. Диаметр внешнего электрода 410 мм. Длина ТЛ равна 850 мм. Волновое сопротивление изменяется от 14 до 30 Ом. Измеренное искаже-



Р и с. 1. Общий вид ускорителя «Импульс» (а) и его структурная схема (б)

Зависимость отношений длины трансформирующей и формирующей линий от коэффициента трансформации

$K_{ТР}$	$Z_{ВЫХ}/Z_{ВХ}$	$l_{ТЛ}/l_{ДФЛ}$	$K_{ТР}$	$Z_{ВЫХ}/Z_{ВХ}$	$l_{ТЛ}/l_{ДФЛ}$
1,2	1,44	0,33	1,8	3,24	3,5
1,3	1,7	0,69	2,0	4,0	4,8
1,4	1,96	1,1	2,5	6,22	8,2
1,6	2,58	2,2	3,0	9,0	12,0

ние вершины импульса длительностью 35 нс не превышает 10%.

Двойная формирующая линия. Полная емкость ДФЛ с учетом запаса в 25% получается из соотношения $C_{ДФЛ} = 1,25 (2W/U_{ЭП}^2) K_{ТР}$ и приблизительно равна 5 нФ, где W — заданная энергия в пучке и $U_{ЭП}$ — напряжение на пушке; необходимое зарядное напряжение $U_{ДФЛ} = 700$ кВ. Волновое сопротивление ($Z_{ДФЛ} = C_{ДФЛ}/\tau_{и}$) получается равным 14 Ом, причем для лучшего согласования импедансы образующих ее линий выбраны одинаковыми $Z = 0,5 Z_{ДФЛ} = 7$ Ом.

Выбор параметров ДФЛ определяет жесткие требования ко времени коммутации ее разрядника:

$$t_{\phi} \approx 2,2 [\tau_R^2 + (L_p/Z)^2]^{1/2} \leq 0,3\tau_{и}, \quad (1)$$

где L_p — его индуктивность; τ_R — постоянная времени падения сопротивления искр. Полагая вклады обеих составляющих равными, получаем при токе ~ 100 кА условия: $L_p \leq 20$ нГн и $\tau_R \leq 3$ нс, которые можно выполнить лишь при многоискровой работе разрядника.

При жестко заданных волновых сопротивлений ДФЛ Z из условия максимальной энергоемкости можно определить оптимальное отношение диаметров образующих ее электродов $\alpha_{опт}$ и оптимальную диэлектрическую проницаемость изоляции $\epsilon_{опт}$ [3]. При этом предполагается, что электропрочность жидких диэлектриков с разными ϵ одинакова.

$$W/V = \frac{60}{\pi c} \frac{E^2}{Z^2} \frac{\ln^3 \alpha}{\alpha^4} = \text{const} \frac{\ln^3 \alpha}{\alpha^4}, \quad (2)$$

где V — объем ДФЛ; c — скорость света. Максимум удельной энергоемкости достигается при $\alpha_{опт} = 2,12$, а диэлектрическая проницаемость среды, соответствующая $\alpha_{опт}$ и Z , равна

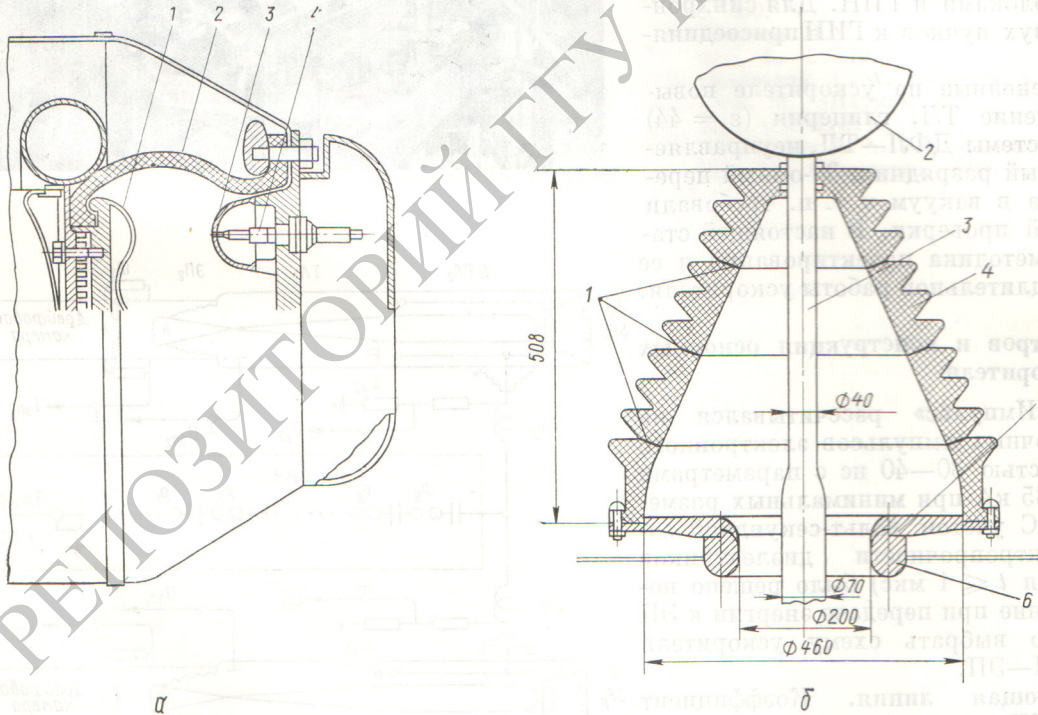


Рис. 2. Разрядник ДФЛ (а):
1 — высоковольтный электрод; **2** — корпус; **3** и **4** — заземленный и поджигающий электроды
Высоковольтный ввод в ДФА (б):
1 — места склейки; **2** — шар; **3** — высоковольтный шток; **4** — изолятор; **5** — опорный диск; **6** — охранный
 кольцо в корпусе ДФЛ

$\epsilon_{\text{опт}} = \left(\frac{60}{Z} \ln \alpha_{\text{опт}}\right)^2 = 2000/Z^2$. При $Z = 7$ Ом $\epsilon_{\text{опт}} = 42$, что и определило выбор глицерина ($\epsilon = 44$) в качестве диэлектрика.

Учитывалось также, что для глицерина не требуются система очистки и специальный подбор конструктивных материалов, а соотношения длины и диаметров ДФЛ и ТЛ получаются удовлетворительными. Максимальная рабочая напряженность электрического поля в ДФЛ была принята равной 200 кВ/см; соответственно определяются диаметры коаксиальных электродов ДФЛ: центрального, среднего и внешнего (90, 190 и 410 мм). Длина ДФЛ $l_{\text{ДФЛ}} = \tau_{\text{и}} c / 2\epsilon^{0,5} \approx 850$ мм. Центральный электрод внутренней линии ДФЛ заземляется через индуктивность $L_3 = 3,5$ мкГн, импеданс которой на частоте заряда мал по сравнению с импедансом ГИН, а в наносекундном диапазоне значительно больше выходного сопротивления ДФЛ. Эта индуктивность включена в начальной части ТЛ и представляет собой цилиндрическую однослойную катушку средним диаметром 30 мм из 2-мм медной проволоки.

Разрядник ДФЛ (рис. 2, а) установлен во внешней линии и при пробое автоматически «отсекает» ГИН от ДФЛ, такое расположение разрядника удобно и для управления его поджигом. Разрядник смонтирован в бочкообразном плексигласовом изоляторе диаметром и высотой около 250 мм и установлен на торце ДФЛ. Анод разрядника — усеченная сфера (радиус и диаметр ~ 180 и 150 мм) — изготовлен из алюминия толщиной 2 мм. Заземленный катод состоит из шести стержней диаметром 30 мм с полусферическими закруглениями, расположенных на окружности диаметром 120 мм; вершины стержней изготовлены из нержавеющей стали. Разрядник наполняется элегазом SF₆ до давления 150—400 кПа.

Генератор импульсных напряжений. Использование в ДФЛ глицерина с небольшим удельным сопротивлением $\rho \geq 10^6$ Ом·см ограничивает время зарядки ДФЛ. Потери энергии при зарядке ДФЛ напряжением $0,5 U_{\text{макс}}$ ($1 - \cos \omega t$) и коммутации в максимуме напряжения равны $\Delta W/W \approx 2,6 \cdot 10^{13} / \omega \epsilon \rho$. Если допустить потерю энергии не более 10%, то для глицерина с $\epsilon = 44$ и $\rho \geq 2 \cdot 10^6$ Ом·см время зарядки ДФЛ $t_3 = \pi/\omega$ должно быть не более 1 мкс. Ударная емкость ГИН C_{Γ} должна быть выбрана так, чтобы энергия, передаваемая в ДФЛ, была максимальной. Без учета потерь

$$W_{\text{ДФЛ}} = [C_{\Gamma} C_{\text{ДФЛ}} / (C_{\Gamma} + C_{\text{ДФЛ}})^2] W_{\Gamma} = K_W W_{\Gamma}, \quad (3)$$

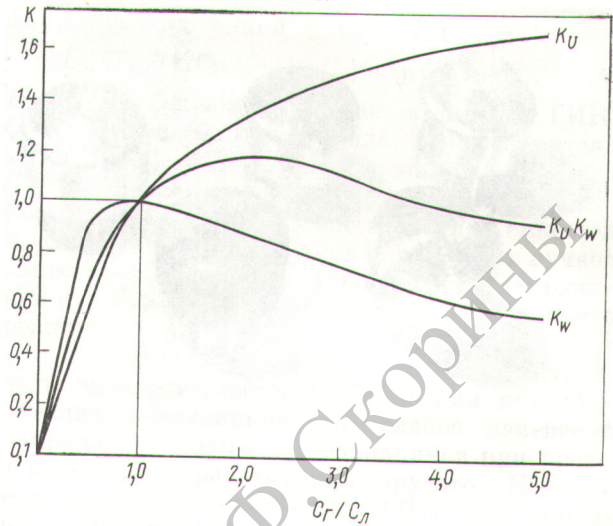


Рис. 3. Зависимость K_W , K_U и $K_U K_W$ от $C_{\Gamma} / C_{\text{ДЛ}}$

где W_{Γ} — энергия, запасенная в ГИН. Желательно, чтобы напряжение на ДФЛ было больше ударного напряжения ГИН. Из этих соображений отношение $C_{\Gamma} / C_{\text{ДФЛ}}$ следует выбрать вблизи максимума $K_W K_U$, где $K_U = U_{\text{ДФЛ}} / U_{\Gamma}$ (рис. 3).

Для одной ДФЛ было принято $C_{\Gamma} = 2C_{\text{ДФЛ}}$; минимальное ударное напряжение ГИН находят из соотношения $U_{\Gamma} = U_3 / [\exp(-\pi/2Q)] K_U$, где $Q \approx 15$ — добротность контура заряда (~ 600 кВ). Индуктивность зарядного контура должна быть не более 20 мкГн.

ГИН ускорителя «Импульс» собран из четырех стандартных ГИН-400-0,06/5, соединенных параллельно-последовательно. Одноименные каскады двух колонн (по два ГИН-400 в каждой) электрически жестко соединены шинами коммутирующих разрядников, смонтированных в общей винипластовой трубе диаметром 110 мм и работающих в атмосфере азота под давлением 100—500 кПа. Изменение давления позволяет оперативно регулировать выходное напряжение ГИН. Первый разрядник ГИН является тригatronом с отдельной регулировкой давления азота. Ударная емкость ГИН равна 12 нФ, индуктивность 5 мкГн, длительность однополупериодного резонансного заряда ДФЛ около 0,65 мкс, а измеренная величина $K_{\Gamma} = 1,3$. Зарядное напряжение вводится в ДФЛ через конусный плексигласовый изолятор (см. рис. 2, б).

Электронная пушка. Размеры пушек ускорителя «Импульс» выбраны по соображениям удобства стыковки с дрейфовой камерой и воз-

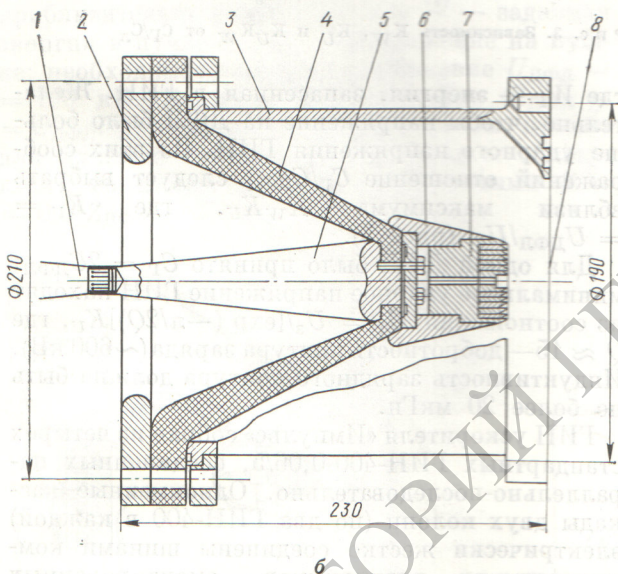
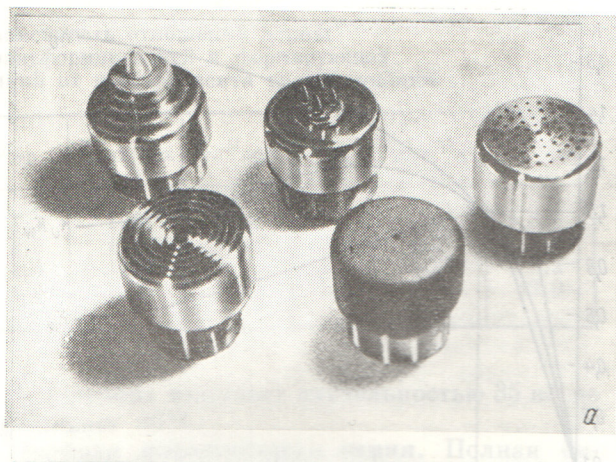


Рис. 4. Общий вид используемых катодов (а) и схематический чертеж пушки (б):

1 — внутренний электрод ТЛ; 2 — диафрагмирующее кольцо; 3 — корпус; 4 — высоковольтный изолятор; 5 — согласующий конус; 6 — катододержатель; 7 — катод; 8 — анод

возможности наложения магнитного поля (длина 250 мм, диаметр ~ 180 мм). Габариты ЭП ограничили ее электропрочность ($U_{\text{ЭП, макс}} \leq 850$ кВ), однако до сих пор ЭП больших размеров нами не применялись. Коническая форма изолятора и отсутствие градиентных колец (рис. 4, а) объясняются особенностями перехода из среды с высоким ϵ [4]. Высоковольтный импульс, поступающий на ЭП из ТЛ, проходит через трехслойную коаксиальную линию с постоянным волновым сопротивлением, образованную кор-

пусом, изолятором и переходным конусом. В качестве анода используется титановая фольга толщиной 20—50 мкм или сетка из нержавеющей стали. Рабочий вакуум в пушке не хуже $(1 \div 2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Конструкция катододержателя позволяет регулировать промежуток анод—катод в пределах 0,5—2,5 см и подбирать импеданс пушки.

Были опробованы катоды различной конфигурации: одноигольчатые, многоигольчатые, с плоской эммитирующей поверхностью и инкрустированные диэлектриком (см. рис. 4, б). Сейчас используются катоды диаметром 44 мм, гладкий графитовый и из нержавеющей стали, имеющий семь concentрических гребней с шагом 3 мм. Импеданс пушки ~ 30 Ом получается при анод—катодном расстоянии 10—17 мм и изменяется с ростом напряжения примерно как $U^{-1/2}$ (рис. 5, а). Изменение импеданса пушки за время высоковольтного импульса приведено на рис. 5, б. При напряжении на пушке 700—800 кВ напряженность электрического поля на поверхности катододержателя достигает $(3 \div 4)10^5$ В/см, что вызывает эмиссию с его боковой поверхности и последующее развитие пробоя вдоль поверхности.

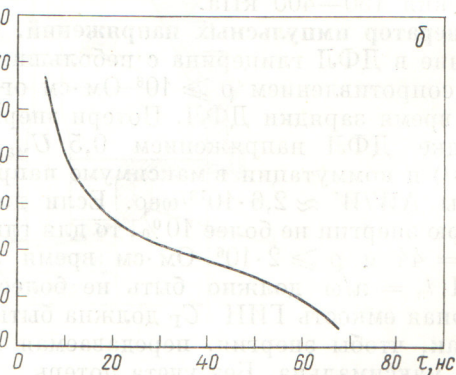
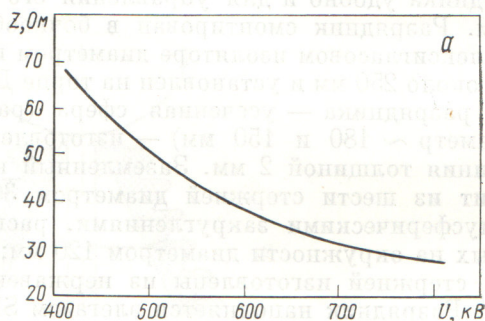


Рис. 5. Зависимость изменения импеданса пушки от напряжения при фиксированном анод—катодном промежутке (а) и в течение высоковольтного импульса (б)

Режимы работы ускорителя «Импульс»

В однопучковом режиме на ускорителе получен пучок с максимальной энергией около 800 кэВ, током до 30 кА, длительностью ~ 40 нс и энергозапасом около 700 Дж (рис. 6). Фронт импульсов напряжения и тока ~ 18 нс, что соответствует искажению фронта в разряднике, глицерине и на входе ЭП. На вершине или на заднем фронте импульса напряжения часто наблюдается резкий срез, вызванный перекрытием изолятора ЭП. Обычно работа ведется в режиме до 700 кэВ, 20 кА; пучок на аноде сравнительно однородный, диаметром 3—5 см. При установке в центре катода усеченного тefлонового конуса (высотой 12 мм, диаметром 5/12 мм) пучок фокусировался до нескольких миллиметров.

В двухпучковом режиме на «Импульсе» проведена параллельная зарядка двух ДФЛ и синхронная генерация двух пучков.

С приемлемой для практики точностью амплитуда зарядного напряжения каждой из n

формирующих линий с емкостью $C_{л}$:

$$U_n/U_T = [2C_T/(C_T + nC_{л})] \exp(-\pi/2Q), \quad (4)$$

где U_T и C_T — напряжение и емкость ГИН; Q — добротность цепи заряда. Для ускорителя «Импульс» в однопучковом режиме $C_{дфл} = 0,5 C_T$, в двухпучковом $nC_{дфл} \approx C_T$, $Q \approx 15$. Согласно (4) при таких соотношениях емкостей параметры каждого из двух синхронных пучков снижаются до ~ 80% ускоряющего напряжения и ~ 60% запасенной энергии однопучкового режима.

В двухпучковом режиме необходимо обеспечить одновременность срабатывания коммутирующих разрядников или слабое изменение напряжения одного из разрядников при преждевременном срабатывании другого. Поэтому каждая линия соединяется с ГИН через дополнительную развязывающую индуктивность $L_g = 2L_0$, где L_0 — индуктивность ГИН. Возможность одновременной генерации двух пучков зависит от стабильности работы разрядников ДФЛ. На ускорителе «Импульс», где

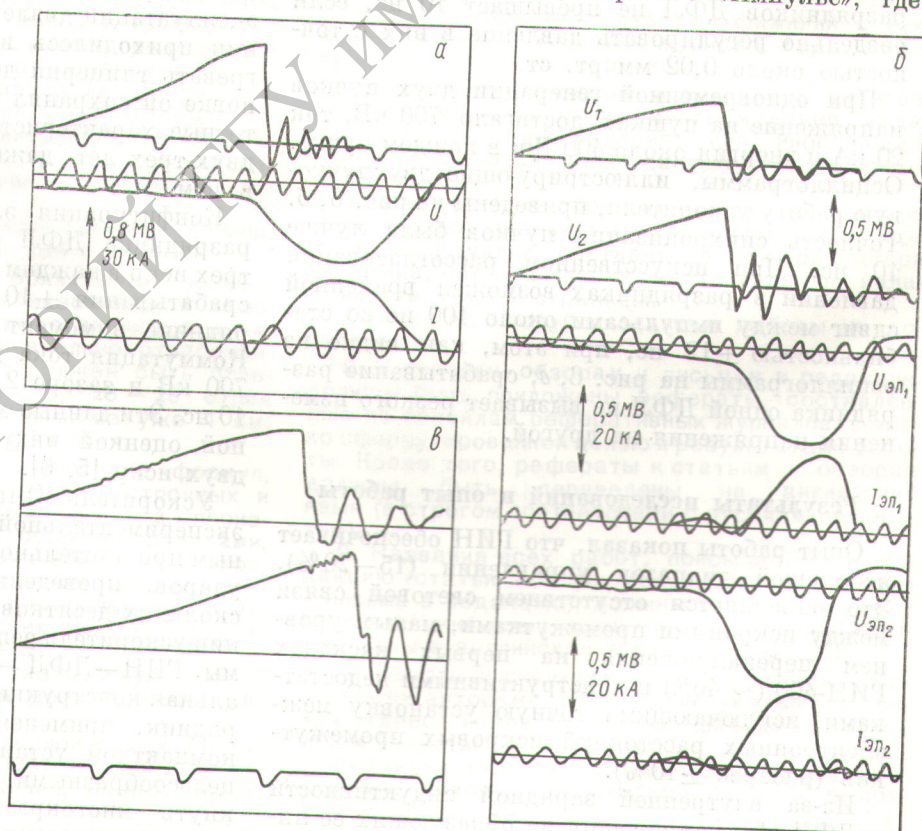


Рис. 6. Осциллограммы зарядного напряжения, напряжения и тока электронной пушки в однопучковом (а) и двухпучковом (б) режимах работы ускорителя; зарядных напряжений двух ДФЛ при временном смещении пучков (в). Метки времени для зарядных напряжений 200 нс, калибровочная синусоида 100 МГц

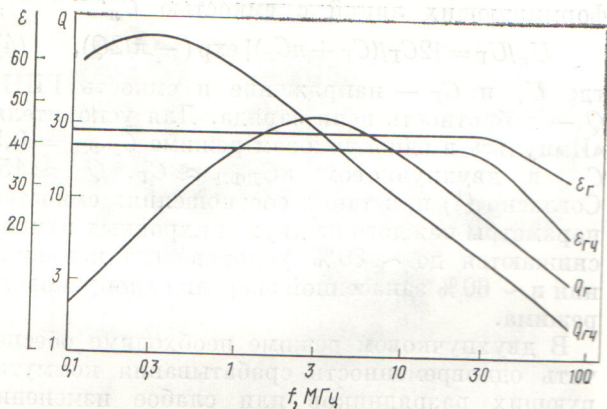


Рис. 7. Высокочастотные свойства глицирина: г — глицерин 94%, гч — глицерин марки ч; $\rho = 1,7 \cdot 10^6$ и $60 \cdot 10^6$ Ом·см соответственно

применяются неуправляемые разрядники, это вызвало особые опасения и было тщательно проверено экспериментально. Оказалось, что средний квадратический разброс срабатывания разрядников ДФЛ не превышает 10 нс, если раздельно регулировать давление в них с точностью около 0,02 мм рт. ст.

При одновременной генерации двух пучков напряжение на пушках достигало 700 кВ, ток 20 кА и энергия около 400 Дж в каждом пучке. Осциллограммы, иллюстрирующие двухпучковую работу ускорителя, приведены на рис. 6, б. Точность синхронизации пучков была лучше 10 нс. При искусственном рассогласовании давлений в разрядниках возможен временной сдвиг между импульсами около 100 нс со стабильностью ± 12 нс, при этом, как видно из осциллограммы на рис. 6, в, срабатывание разрядника одной ДФЛ не вызывает резкого изменения напряжения на другой.

Результаты исследований и опыт работы

Опыт работы показал, что ГИН обеспечивает небольшой диапазон управления (15—20%). Это объясняется отсутствием световой связи между искровыми промежутками, малым уровнем перенапряжения на первых каскадах ГИН-400 (~40%) и конструктивными недостатками, исключающими точную установку межэлектронных расстояний искровых промежутков (разброс $\pm 10\%$).

Из-за внутренней зарядной индуктивности в ДФЛ (L_3) напряжения на образующих ее линиях не равны, и их разность поступает на ЭП. Исследование влияния L_3 на уровень этого предимпульсного напряжения и на потери

энергии при прохождении основного импульса показали, что добиться хороших результатов при размещении индуктивности в среде с большим ϵ , видимо, невозможно. В нашем случае приемлемые результаты (амплитуда предимпульсного напряжения $\leq 10\%$ и потери энергии основного импульса $\leq 20\%$) удалось получить благодаря включению дополнительной индуктивности 12 мкГн между ГИН и ДФЛ.

При сооружении ускорителя «Импульс» были исследованы высоковольтные и высокочастотные свойства глицирина (рис. 7). Спад ϵ и Q при частотах более 30 МГц ограничивают крутизну фронта импульса до значений ≥ 10 нс. Однако при формировании импульсов с длительностью фронта 10—15 нс применение глицирина вполне возможно. Высоковольтные свойства глицирина хорошо описываются выражением

$$E_{пр} = 0,35 t_{эфф}^{1/3} S_{эфф}^{1/10} \text{ [МВ/см]}, \quad (5)$$

где $t_{эфф}$, $S_{эфф}$ — эффективное время и площадь, мкс и см².

Глицирин оказался достаточно удобным в эксплуатации диэлектриком, хотя при заполнении приходилось вакуумировать линии и нагревать глицерин до 50—60° С. В нашей установке он сохранял изоляционные и высокочастотные характеристики стабильными в течение двух-трех лет, даже после нескольких пробоев в нем.

Конфигурация электродов коммутирующего разрядника ДФЛ обеспечивает горение двух-трех искр в каждом ударе без поджига. Точность срабатывания ± 10 нс. Перенапряжение в разряднике в момент пробоя достигает 1,6—1,8. Коммутация тока до 100 кА при напряжении 700 кВ и зазоре 2,2 см осуществляется за 8—10 нс. Эти данные хорошо согласуются с расчетной оценкой индуктивности и сопротивления двух искр [5, 6].

Ускоритель «Импульс» оказался удобным для экспериментальной работы и достаточно надежным при длительной эксплуатации. Общее число ударов, проведенных на нем, достигает нескольких десятков тысяч. Принятые при создании ускорителя решения, например: выбор системы ГИН—ДФЛ — повышающая ТЛ, коаксиальная конструкция линий, многоискровый разрядник, применение глицирина в небольшой компактной установке, в основном оказались целесообразными. Особенно следует подчеркнуть многократный выигрыш в использовании ускорителя при работе с двумя пучками.

Авторы благодарят А. Н. Лебедева, Д. Д. Красильникова, В. Б. Сидорова,

О. И. Саксонова, В. Т. Еремичева, С. И. Власенко и А. В. Серова за большую помощь и поддержку при создании и запуске ускорителя.

Поступила в Редакцию 4/VI 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанский Л. Н. и др. Препринт ОИЯИ Д-9-6707. Дубна, 1972, с. 161.
2. Казанский Л. Н., Коломенский А. А., Яблоков Б. Н. В сб.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям

заряженных частиц. Т. 1. М., «Наука», 1975, с. 310.

3. Казанский Л. Н., Яблоков Б. Н. В сб.: Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. М., «Наука», 1972, с. 98.
4. Месхи Г. О., Яблоков Б. Н. Там же, с. 90.
5. Баранник С. И., Вассерман С. Б., Лукин А. Н. ЖТФ, 1974, т. 44, вып. 11, с. 2352.
6. Pfeiffer W. «Elektrotechn. Z. A.», 1974, Bd 95, H. 8, S. 405.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Содержание статей, направляемых в журнал «Атомная энергия», должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

Объем обзоров, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

При подготовке рукописей авторы должны руководствоваться следующими правилами:

1. Тексты (среди них обязательно должен быть первый машинописный экземпляр) и иллюстрированные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательно обработанном для печати виде. Текст должен быть отпечатан через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

2. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудноразличимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

3. Единицы всех физических величин должны быть обозначены в системе СИ.

4. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовки.

5. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15×20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографий 12×18 см.

6. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

7. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

- а) для журнальных статей — фамилий и инициалов авторов, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

- б) для книг — фамилий и инициалов авторов, полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

- в) для статей в сборнике — фамилий и инициалов авторов статьи, названия сборника, инициалов и фамилий составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

8. К статьям, обзорам и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четко сформулированной целью и результатами работы. Кроме того, рефераты к статьям и обзорам должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

9. Названия всех работ, присылаемых в редакцию (статьи, обзоры, депонированные статьи и письма в редакцию), должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции.

10. Тексты и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. Необходимо указывать точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.