

05;07;10;12

Определение профиля энергосвечения мощного электронного пучка в аэрогеле

© Б.А. Демидов¹, М.В. Ивкин¹, И.А. Ивонин¹, В.А. Петров¹, В.П. Ефремов², В.Е. Фортон², Н. Килер³¹Российский научный центр "Курчатовский институт",
123182 Москва, Россия²Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий РАН,
111250 Москва, Россия³KAMAN Diversifies Technologies Corporation, USA

(Поступило в Редакцию 6 июня 1996 г.)

С помощью оптических методов исследована динамика взаимодействия сильноточного электронного пучка с аэрогелем (авсокопористым прозрачным диэлектриком с малой плотностью $\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$). Измеренный профиль свечения аэрогеля и картина его разлета сравниваются с результатами численного моделирования. Обсуждается влияние объемного электрического заряда на профиль поглощения энергии сильноточного релятивистского электронного пучка.

Введение

В последнее время появились сообщения о разработке пористого прозрачного диэлектрика аэрогель [1], обладающего низкой плотностью $0.01\text{--}0.36 \text{ g/cm}^3$ и кластерной структурой. Это уникальное вещество благодаря своей прозрачности, низкой плотности, высокой пористости и малому зарядовому числу позволяет оптическими способами исследовать процессы проникновения и (поглощения) электромагнитного и корпускулярного излучения в диэлектриках.

Наиболее просто импульсное излучение со сравнительно большой глубиной проникновения можно получить с помощью электронного ускорителя. Поэтому нами был использован импульсный релятивистский сильноточный электронный ускоритель "Кальмар" [2].

Разумеется, основные положения поглощения электронного излучения в веществе являются хорошо и давно исследованными. Основным механизмом поглощения электронного пучка с энергиями электронов $E < 500 \text{ keV}$ в твердом теле является кулоновское рассеяние. При этом, согласно работе [3], в веществе с малым Z две трети энергии пучка переходят в энергию возбуждения связанных электронов (возбуждение атомов), а оставшаяся часть энергии идет на ионизацию. Пористость аэрогеля приводит к большому отношению поверхности к объему, что в свою очередь повышает эффективность свечения. Поглощение электронов с энергиями $E < 1 \text{ MeV}$ хорошо описывается уже в диффузионном приближении [4]. В этом приближении зависимость профиля энергосвечения от глубины проникновения, нормированной на длину пробега первичного электрона R_e , не зависит от энергии электрона. Положение максимума энергосвечения в аэрогеле $X_{\text{max}} \approx 0.6 \text{ mm}$ при $E = 290 \text{ keV}$ ($\langle Z \rangle = 11$), а глубина проникновения $R_e \approx 2 \text{ mm}$. Эти данные с точностью $10\text{--}20\%$ согласуются с результатами численных расчетов методом Монте-Карло [5] и экспериментами [6] по поглощению

электронов в близком к аэрогелю по атомному номеру алюминия.

В нашей работе мы исследовали до сих пор мало изученные и неясные вопросы. Экспериментально зарегистрирована эволюция объемного свечения зоны поглощения энергии при различных режимах облучения мишени. Сравнение полученных экспериментальных результатов с расчетными позволило проверить ряд гипотез: о влиянии объемного заряда на формирование в диэлектрике (пористом) зоны энергосвечения, о влиянии на светимость зоны энергосвечения изменения пористости. Аэрогель — материал с кластерными свойствами и его уравнение состояния должно это отражать [7,8]. Визуальное наблюдение разлета аэрогеля позволило нам численно оценить параметры уравнения состояния этого кластерного материала.

1. Описание опыта

Нами был поставлен эксперимент по оптической регистрации поглощения импульсного сильноточного электронного пучка с энергией электронов $U_0 = 200\text{--}290 \text{ keV}$, током $I = 10\text{--}20 \text{ kA}$, длительностью $T \approx 150 \text{ ns}$ в аэрогеле с плотностью $\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Выходная часть ускорителя "Кальмар" [2], включающая корпус 1, выходной коаксиальный трансформатор 2, диэлектрическую разделительную диафрагму 3 и катод 4, соединялась с вакуумной камерой 7, в которую помещался исследуемый образец аэрогеля [6]. При облучении образца аэрогеля пучком электронов 5 возникала вспышка света, которая выходила через окошко 8 и попадала на объектив 9 с фокусным расстоянием 0.65 m и относительным отверстием $1 : 6$. С помощью поворотного устройства 10, состоящего из двух призм, изображение зоны энергосвечения электронного пучка в аэрогеле поворачивалось на 90° в горизонтальной плоскости и на 90° в вертикальной плоскости, проходило

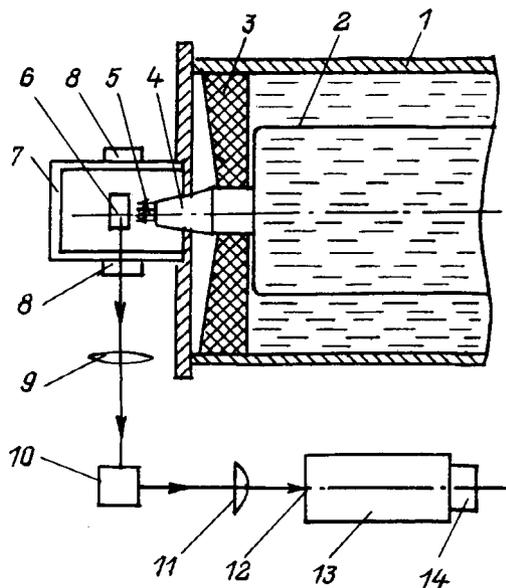


Рис. 1. Схема эксперимента.

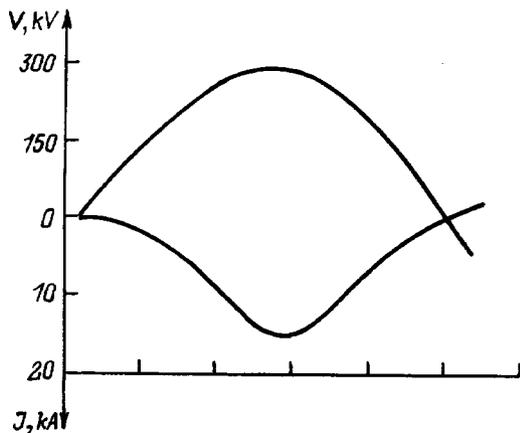


Рис. 2. Оциллограммы тока и напряжения ускорителя "Кальмар".

вертикальную цилиндрическую линзу 11 и попадало на вертикальную щель 12 фотохронографа ФЭР-1 13. Прибор ФЭР-1 в силу своей конструкции (отсутствие электронного усилителя) обеспечивал высокую линейность передачи изображения аэрогеля. Развернутое во времени изображение процесса взаимодействия электронного пучка с аэрогелем регистрировалось на фотопленке Кодак 14. Поскольку ожидаемая глубина зоны энерговыделения составляла 2.0 мм, а высота входной щели ФЭР-1 равнялась 10 мм, то с целью максимального геометрического разрешения оптическое увеличение было выбрано равным 4. Оптическое разрешение всей системы регистрации, проверенное с помощью миры, было не хуже 0.1 мм по аэрогелю. Исследовались образцы аэрогеля размером 20 × 14 мм, толщиной 5 мм с полированными стенками. На образец аэрогеля, размещенный на заземленной

металлической подложке, попадал электронный пучок диаметром 10 мм. Характерные оциллограммы тока и ускоряющего напряжения ускорителя приводятся на рис. 2.

Полученные в экспериментах фотохронограммы обрабатывались с помощью микрофотометра ИФО-451. Зависимость плотности почернения фотопленки от экспозиции определялась с помощью оптического клина.

В отдельных опытах оптическое изображение образца аэрогеля фокусировалось на входную щель ФЭР-1 таким образом, что можно было наблюдать разлет аэрогеля навстречу электронному пучку. Однако в этом случае регистрируемая глубина свечения аэрогеля не могла превышать 1.6 мм.

2. Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлена фотохронограмма, соответствующая условиям опыта, позволяющим наблюдать разлет аэрогеля. Электронный пучок распространяется сверху вниз. Использовалась развертка на ФЭР-1 0.25 μs/cm. На рис. 3 видно, что глубина зоны энерговыделения увеличивается со временем, достигая 1.6 мм в области максимального ускоряющего напряжения, а затем уменьшается в соответствии с падением ускоряющего напряжения. В правой верхней части рисунка видна картина разлета аэрогеля после воздействия электронного пучка. Угол разлета составляет ≈ 60°, что соответствует скорости разлета 7–8 км/с.

На рис. 4 приводится зависимость интенсивности излучения аэрогеля по длине зоны энерговыделения в четыре разных момента времени от начала появления ускоряющего напряжения: $t_1 = 80$ ns; $t_2 = 140$ ns; $t_3 = 170$ ns; $t_4 = 200$ ns (кривые 1–4 соответственно). Эти моменты времени соответствуют ускоряющим напряжениям $V_1 = 220$ kV; $V_2 = 290$ kV; $V_3 = 250$ kV;

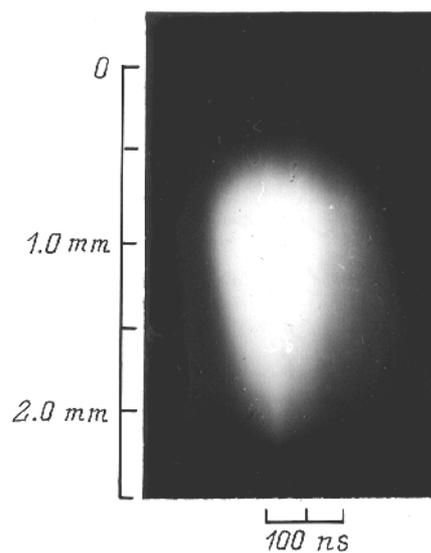


Рис. 3. Фотохронограмма нормального режима.

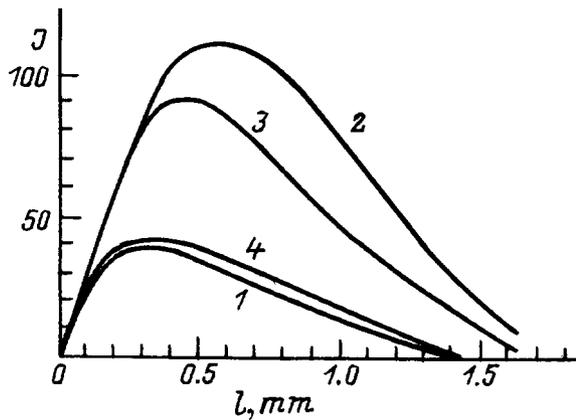


Рис. 4. Интенсивность свечения аэрогеля в нормальном режиме в четыре момента времени.

$V_4 = 220$ кВ и токам $I_1 = 5$ кА, $I_2 = 14$ кА, $I_3 = 11$ кА, $I_4 = 6$ кА.

Четко регистрируется уменьшение глубины зоны энерговыделения, а также перемещение максимума в левую сторону с уменьшением ускоряющего напряжения. Максимальная интенсивность свечения достигается на глубине 0.6 мм (при $V_2 = 290$ кВ). Причем интенсивность свечения аэрогеля пропорциональна току электронного пучка.

С целью более точного определения глубины зоны энерговыделения последующие эксперименты были выполнены при такой геометрии опыта, когда на щель ФЭР-1 попадала область аэрогеля, перекрывающая не менее 2 мм глубины образца. Разлет аэрогеля при этом не регистрировался.

Пропорциональная зависимость интенсивности свечения аэрогеля от тока электронного пучка при неизменном ускоряющем напряжении подтверждается в прямых опытах, где наблюдается срыв тока ускорителя. Такой режим работы ускорителя иллюстрируют осциллограммы, приведенные на рис. 5, а. Соответствующая фотохронограмма, имеющая характерные особенности, представлена на рис. 5, б. Видно, что в нижней части фотографии имеются два пика интенсивности, расстояние между которыми по времени составляет 50 нс, что соответствует тем же 50 нс между максимумами тока на осциллограмме рис. 5, а.

На рис. 6 показана зависимость интенсивности свечения аэрогеля по длине зоны энерговыделения в четыре разных момента времени: $t_1 = 70$ нс, $t_2 = 85$ нс, $t_3 = 130$ нс, $t_4 = 160$ нс (кривые 1–4 соответственно), наблюдавшихся в режиме срыва тока. Из осциллограммы рис. 5, а следует, что этим моментам времени соответствуют следующие величины ускоряющего напряжения $V_1 = 230$ кВ, $V_2 = 290$ кВ, $V_3 = 290$ кВ, $V_4 = 230$ кВ и токи $I_1 = 12$ кА, $I_2 = 20$ кА, $I_3 = 16$ кА, $I_4 = 8$ кА.

На рис. 6 видно, что при ускоряющем напряжении $V = 290$ кВ глубина зоны энерговыделения достигает 2.0 мм, а максимум интенсивности излучения аэро-

геля лежит в области 0.6 мм. При ускоряющем напряжении $V_1 = V_4 = 230$ кВ глубина зоны энерговыделения не превышает 1.5 мм.

Рассматривая кривые на рис. 4 и 6, можно заметить, что эти кривые отличаются от классической кривой энерговыделения, описывающей профиль поглощения энергии пучка моноэлектронов в веществе. В экспериментальных кривых нарастание интенсивности свечения происходит гораздо более плавно, чем в кривой энерговыделения, практически сразу начинающейся с ненулевого значения.

Было выдвинуто соображение, что это обусловлено оптическим размытием изображения зоны энерговыделения светосильным объективом с относительным отверстием 1 : 6 (позиция 9 на рис. 1), не обеспечивающим необходимую глубину резкости и дифракционным размытием изображения краем "диафрагмы".

Дифракционное размытие изображения краем "диафрагмы" оценивается как $\sqrt{L_0 \lambda / \pi} \approx 0.1$ мм (L_0 — характерное расстояние от края "диафрагмы" до образца аэрогеля) [9]. Дифракционное размытие от объектива с относительным отверстием 1 : 6 на порядок меньше.

Расчеты, приведенные в соответствии с [9], показали, что с помощью объектива с относительным отверсти-

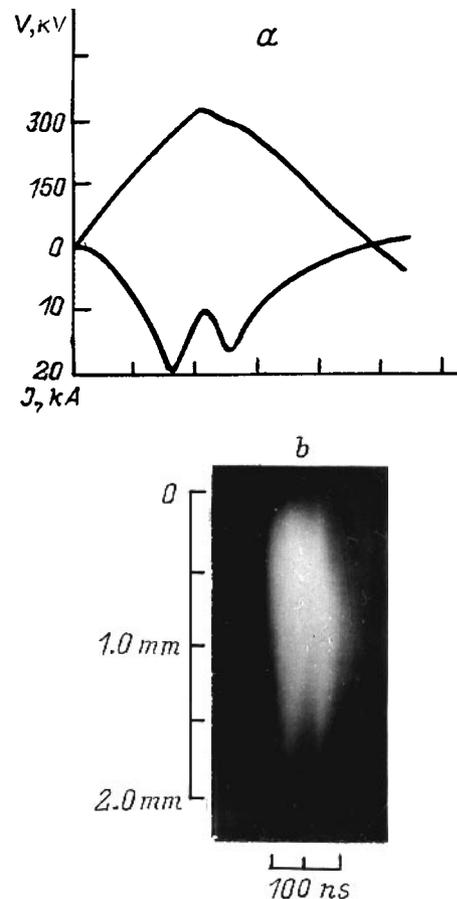


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения ускорителя "Кальмар" в режиме срыва тока (а) и фотохронограмма режима со срывом тока (б).

ем 1 : 6 и при глубине резкости 10 mm размытие фокусировки в области аэрогеля составляет ≈ 0.2 mm. Поэтому эксперименты были повторены с тем же объективом, но с относительным отверстием 1 : 21.

Применение объектива с таким относительным отверстием позволяет в 3 раза улучшить сфокусированность на фотохронографе объемной зоны энерговыделения, но зато более чем в 10 раз ослабляет интенсивность света, попадающего на входную щель ФЭР-1.

Из-за нехватки интенсивности света была использована более медленная развертка и получены слабо развернутые во времени картины свечения зоны энерговыделения.

Как пример таких картинок на рис. 7 показаны три режима облучения аэрогеля электронным пучком: а — $V_{\max} = 240$ kV, $I_{\max} = 11$ kA; б — $V_{\max} = 290$ kV, $I_{\max} = 13$ kA; с — $V_{\max} = 290$ kV, $I_{\max} = 20$ kA (электронный пучок распространяется сверху вниз).

На рис. 8 представлены результаты фотометрирования негативов рис. 7. Фотометрирование производилось сверху вниз. Кривые 1–3 соответствуют режимам а–с на рис. 7.

Видно, что интенсивность излучения аэрогеля нарастает более резко с увеличением глубины L (в отличие от рис. 4), максимум интенсивности переместился в область 0.4–0.5 mm. Глубина зоны энерговыделения R_e

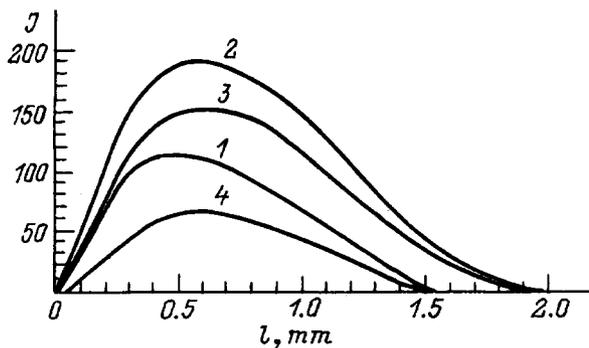


Рис. 6. Интенсивность свечения аэрогеля в режиме срыва тока в четыре момента времени.

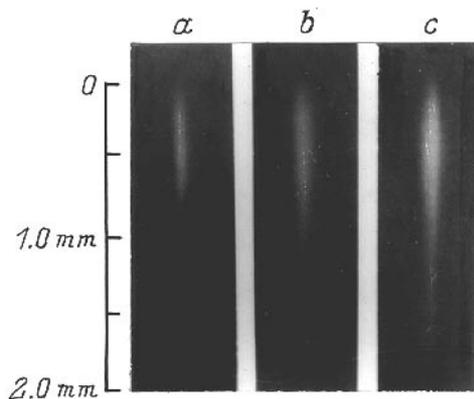


Рис. 7. Фотохронограммы на медленной развертке.

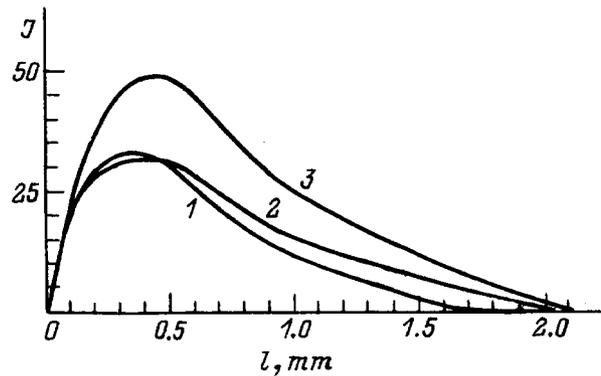


Рис. 8. Интенсивность свечения аэрогеля на медленной развертке (интегральная).

при максимальном ускоряющем напряжении $V = 290$ kV не изменилась и составляет 2.0 mm. При максимальном ускоряющем напряжении $V = 240$ kV, $R_e \approx 1.6$ mm, $X_{\max} = 0.35$ –0.4 mm. Сравнивая рис. 8 и 4, можно заметить также, что кривые рис. 8 правее максимума более вогнутые, чем на рис. 4. Все это объясняется тем, что кривые рис. 8 являются фактически интегральными и в интенсивность свечения вносят вклад не только электроны с максимальными энергиями, соответствующими максимальному ускоряющему напряжению V_{\max} , но и электроны с энергией $E < V_{\max}$.

В дополнительных экспериментах, выполненных с более широкими образцами аэрогеля, было обнаружено, что форма кривой интенсивности излучения широких образцов аэрогеля не изменилась по сравнению с кривыми рис. 8, лишь уменьшилась интенсивность свечения. Это говорит о том, что рассеяние фотонов в аэрогеле вносит малый вклад в размытие регистрируемого профиля интенсивности свечения.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Наиболее убедительно выглядит корреляция интенсивности и глубины свечения с амплитудами тока и ускоряющего напряжения электронного пучка.

Как показывают приведенные ниже численные расчеты, глубина интенсивности свечения практически совпадает с расчетной глубиной зоны энерговыделения электронного пучка. Это свидетельствует о малом влиянии объемного заряда поглощаемого электронного пучка на формирование зоны энерговыделения.

На малую инерционность свечения указывает удивительно хорошая корреляция развернутых во времени профилей свечения и осциллограмм тока и напряжения как в нормальном режиме работы ускорителя, так и в режиме срыва тока. Это подтверждает уверенность в том, что свечение вызвано именно поглощением электронов, происходящих за время менее чем 10^{-10} ns [10].

В каждом эксперименте наблюдалась практически полная пропорциональность интегральной интенсивности свечения и амплитуды тока, полученная при равных ускоряющих напряжениях в начальный и конечный моменты облучения кривые 2, 3 на рис. 8. Это свидетельствует о незначительности влияния изменения теплофизических характеристик аэрогеля (прежде всего пористости и плотности) на свечение зоны энерговыделения. Поэтому при проведении численных расчетов было принято допущение, что интенсивность свечения имевшихся в нашем распоряжении образцов аэрогеля прямо пропорциональна интенсивности объемного энерговыделения и не зависит от изменения пористости материала.

Довольно хорошо прослеживается корреляция координат максимумов свечения и энергии пучка электронов. Координаты максимумов регистрируемого свечения практически совпадают с координатами максимумов энерговыделения. Это означает, что образующееся в аэрогеле при поглощении электронного пучка внутреннее электрическое поле гораздо меньше величины $U_0/X_{\max} \simeq 5 \text{ kV/cm}$ в течение всего времени облучения. Таким образом, подтверждается вывод о том, что пробойные поля высокоэнергетичных электронов [10], образующихся при поглощении первичных релятивистских электронов пучка, на несколько порядков меньше пробойных напряжений термализованных электронов. В результате во время облучения диэлектрик ведет себя подобно металлу. Конечно, в таком пористом диэлектрике, как аэрогель, существенную роль играет и пробой по поверхности пор, но косвенные результаты наших экспериментов с другими диэлектриками [11] также подтверждают отсутствие какого-либо влияния объемного заряда поглощаемого электронного пучка на формирование зоны энерговыделения.

Некоторые отличия координат максимумов свечения и энергии пучка электронов возникают лишь в конце облучения, что объясняется возникающей из-за разгрузки неоднородностью аэрогеля и подтверждается численными расчетами.

При регистрации свечения в начале зоны энерговыделения возникают и определенные отклонения от истинного профиля энерговыделения — профиль свечения более гладкий. Два явления — дифракция на краю "диафрагмы" и объективе и ограниченная глубина резкости объектива усложняют исследование по изучению поглощения энергии электронного пучка в аэрогеле. Поэтому для восстановления профилей энерговыделения требуется специальная численная обработка.

При облучении аэрогеля импульсным электронным пучком происходит интенсивный разлет вещества с облучаемой поверхности. Поэтому можно предположить, что регистрируемое размытие переднего фронта свечения аэрогеля (рис. 6, 8) обусловлено не только дифракционными эффектами и расфокусировкой, но и разлетом аэрогеля навстречу электронному пучку, что потребовало проведение дополнительного численного моделирования, приведенного в следующем разделе.

4. Численное моделирование

Для сравнения экспериментальной регистрируемой кривой свечения и теоретической интенсивности энерговыделения нами были произведены численные расчеты. При расчете оптического искажения регистрируемого свечения учитывалось как геометрическое (расфокусировка), так и дифракционное размытие на краю "диафрагмы" и на объективе.

Предполагалось, что собственно интенсивность свечения в образце аэрогеля пропорциональна объемному энерговыделению. Удельное энерговыделение электронного пучка в зависимости от лагранжевой координаты глубины поглощения и времени облучения рассчитывалось в диффузионном приближении [4] с учетом реальных осциллограмм тока и напряжения ускорителя "Кальмар" (рис. 2). В расчетах учитывались необходимое для определения свечения изменение плотности аэрогеля и его разлет в ходе облучения, производимый по одномерной лагранжевой схеме второго порядка точности.

Для описания аэрогеля использовалось уравнение состояния $\langle P \rangle (\rho, E, \beta)$ пористой среды с самосогласованным изменением пористости и упругих характеристик [7,8] (дополнительное уравнение, необходимое для определения меняющейся в ходе облучения пористости $\beta(x, t)$, получается из условия выравнивания давления в структурных составляющих аэрогеля). В этом уравнении состояния как коэффициент Грюнайзена $\langle \Gamma \rangle$ (генерации энерговыделения), так и дифференциальный модуль упругости $\langle K \rangle$ степенным образом зависят от пористости $\beta(x, t)$ аэрогеля: $\{\langle \Gamma \rangle, \langle K \rangle\} \simeq \{\Gamma_0, K_0\}(1 - \beta/\beta^*)^z$, где β^* — величина порога протекания, зависящая от фрактальных свойств аэрогеля оценена $\simeq 1$ (поскольку существуют аэрогели с чрезвычайно малой плотностью $\simeq 0.01$); z — перколяционный коэффициент трехмерного кластера, также зависящий от типа кластера, может находиться в диапазоне от 1.7 до 4.4 [8]. Для оценки этого перколяционного коэффициента, а также коэффициентов Γ_0, K_0 была использована контрольная экспериментальная информация о скорости разлета аэрогеля (раздел 2).

Влияние объемного электрического заряда, создаваемого в диэлектрическом аэрогеле пучком электронов, на формирование зоны энерговыделения мало из-за высокой подвижности высокоэнергетичных пробойных электронов [10] и в расчетах не учитывалось.

Численный расчет был произведен для нормального режима работы ускорителя (рис. 2) с амплитудой напряжения и плотности тока $U_0 = 290 \text{ kV}$ и $J_0 = 14 \text{ kA/cm}^2$ соответственно. Время облучения (на полувысоте) $T = 140 \text{ ns}$. Именно в этом режиме были получены экспериментально зафиксированные кривые свечения рис. 4.

На рис. 9 крестиками нанесены 2 кривые численного моделирования регистрируемой интенсивности свечения аэрогеля (с учетом оптического искажения из-за расфокусировки и дифракционного размытия на краю "диа-

фрагмы” и на объективе). Для сравнения на рис. 9 приведены сплошные кривые, соответствующие кривым 1, 2 на рис. 4, полученным для моноэнергетичных первичных электронов с энергиями $V_1 = 220$ kV и $V_2 = 290$ kV соответственно. Видно, что как глубины, так и максимумы свечения практически совпадают. Численно подтверждено также, что в процессе разгрузки аэрогеля (падения плотности вблизи облучаемой поверхности) максимумы регистрируемого свечения, как и в эксперименте (кривые 1, 4 на рис. 6), действительно сдвигаются в глубь аэрогеля.

Штриховой линией на рис. 9 показаны собственно кривые свечения аэрогеля (без учета оптического искажения), пропорциональные объемной интенсивности энерговыделения в аэрогеле. Видно, что оптическое искажение (отличие от кривых, нанесенных звездочками) сильно лишь при $L < 0.2$ mm. Сравнение объемных интенсивностей энерговыделения, соответствующих началу и концу облучения показывает, что эффект уменьшения плотности в зоне разгрузки не сопровождается падением свечения — объемное энерговыделение в начале зоны энерговыделения не только не упало в ходе облучения, но и несколько возросло (из-за наличия возрастающего участка в начале зоны энерговыделения).

На рис. 10 приведено сравнение интегральных свечений аэрогеля. Крестиками нанесена численно полученная светимость аэрогеля в рассмотренном выше режиме. Сплошная линия соответствует экспериментальной

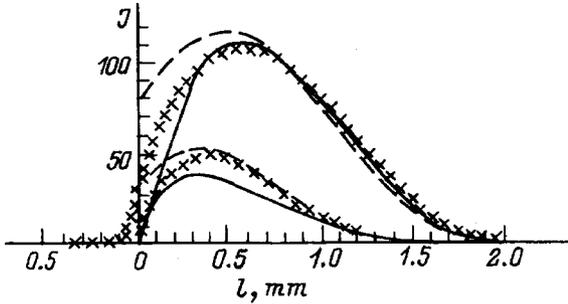


Рис. 9. Интенсивности свечения и энерговыделения аэрогеля в нормальном режиме.

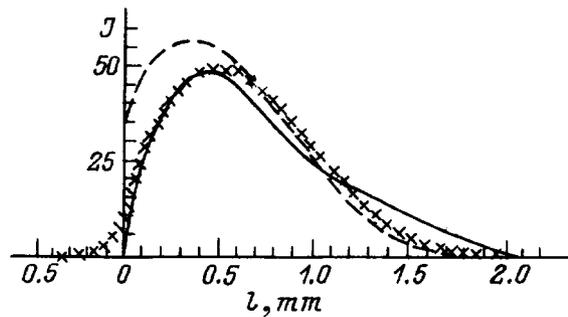


Рис. 10. Интенсивности объемного энерговыделения и свечения аэрогеля в нормальном режиме на медленной развертке (интегральная).

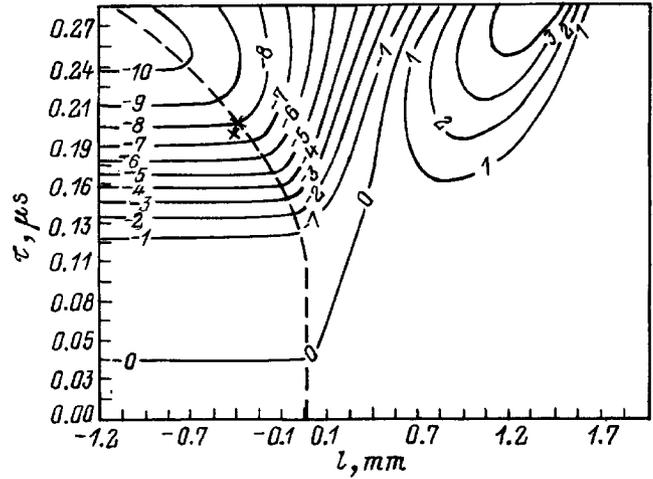


Рис. 11. Изолинии массовой скорости $V(x, t)$ разгрузки аэрогеля.

кривой 2 (рис. 8) и удовлетворительно совпадает с расчетной. Поэтому можно сделать вывод о том, что штриховая линия на рис. 10, соответствующая расчетному интегральному объемному энерговыделению, действительно определяет интегральный профиль энерговыделения в аэрогеле, восстановленный по его профилю свечения.

Наконец, на рис. 11 приведены изолинии массовой скорости $V(x, t)$ разгрузки аэрогеля, соответствующие рассматриваемому численному эксперименту. Штриховая линия показывает движение облучаемой поверхности аэрогеля. Крестиками обозначена контрольная, экспериментально полученная в этом режиме точка $V_{cont}(-0.04$ cm, 200 ns) = 7–8 km/s. Условие ее попадания на штриховую линию дает богатую информацию об уравнении состояния аэрогеля в зоне импульсного энерговыделения и позволяет определить численно основные параметры этого уравнения состояния. В частности, можно сделать вывод о том, что даже для аэрогеля с такой сравнительно большой начальной плотностью, как $\rho_0 = 0.36$ g/cm³, необходим учет в уравнении состояния изменения пористости.

Выводы

Проделанные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Обнаружена линейная связь между интенсивностью свечения аэрогеля и величиной тока пучка электронов.
2. Наблюдается достаточно хорошее совпадение экспериментальной кривой интенсивности свечения и расчетного профиля свечения.
3. Отличие экспериментальной кривой свечения и профиля энерговыделения хорошо объясняется оптическими искажениями (дифракцией и расфокусировкой) оптической системы регистрации, что позволяет говорить о

совпадении экспериментального и расчетного профиля энерговыделения электронного пучка в пористом диэлектрике аэрогель.

4. Достаточно хорошее совпадение экспериментальной кривой интенсивности свечения и расчетного профиля свечения аэрогеля свидетельствует о незначительности влияния пространственного объемного электрического заряда на формирование зоны энерговыделения электронного пучка с плотностью тока $J \simeq 1-10 \text{ kA/cm}^2$.

5. Влияние разгрузки материала на изменение профиля свечения мало, что говорит о малой зависимости интенсивности свечения от изменения пористости аэрогеля.

6. Визуальное наблюдение разлета аэрогеля позволяет получать информацию о типе и параметрах его уравнения состояния в зоне импульсного энерговыделения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 95-06285а).

Список литературы

- [1] *Burchell M., Thomson R.* // *Bul. Amer. Phys. Soc.* 1995. Vol. 40. N 6. P. 1409.
- [2] *Демидов Б.А., Ивкин М.В., Петров В.А.* и др. // *Атомная энергия.* 1979. Т. 46. С. 100.
- [3] *Никеров В.А., Шолин Г.В.* Кинетика деградационных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 137.
- [4] *Kanaya K., Okadama S.* // *J. Phys. D.* 1972. Vol. 5. N 1. P. 43.
- [5] *Аккерман А.Ф.* Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. Алма-Ата: Наука, 1974.
- [6] *Баранов В.Ф.* Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974. С. 229.
- [7] *Соколов И.М.* // *УФН.* 1986. Т. 150. Вып. 2. С. 221.
- [8] *Feng S., Sen P.N.* // *Phys. Rev. Lett.* 1984. Vol. 52. P. 216.
- [9] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. Теоретическая физика. Т. 2. М.: Наука, 1988.
- [10] *Вайсбург Д.И.* Высокоэнергетическая электроника твердого тела. Новосибирск, 1982.
- [11] *Демидов Б.А., Ивкин М.В., Ивонин И.А., Петров В.А.* // *ЖТФ.* 1995. Т. 65. Вып. 9. С. 56.