

УДК 533.95; 537.84

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МГД-ИСТОЧНИКА СВЕТА С Т-СЛОЕМ

С. С. Кацнельсон, А. М. Оришич, Г. А. Поздняков

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Показана возможность использования высокотемпературного токового слоя, инициируемого в потоке плазмы, в качестве мощного источника света с широким спектром излучения. Исследования проводились на установке с дисковым МГД-каналом в режиме генерации Т-слоя в потоках плазмы аргона и натрия.

Ключевые слова: источник света, МГД-канал, Т-слой, лучистый поток, болометр.

Предлагаемый источник света, в котором излучателем является высокотемпературный токовый слой (Т-слой), отличается от известных, использующих, например, слойный импульсный разряд [1], неразрушаемостью элементов конструкции, что позволяет создать мощный большеобъемный импульсно-периодический источник света со значительным рабочим ресурсом. Такой источник может быть использован в технологических процессах.

При выборе конкретной схемы установки учитывалось, что применительно к задачам преобразования энергии наиболее полные исследования характеристик неоднородных потоков с Т-слоем выполнены на установке с дисковым МГД-каналом [2, 3]. Проведенный анализ показал, что эта схема представляется перспективной и для создания источника света.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, состоящей из импульсного источника плазмы, дискового канала и электромагнита. На рис. 1 представлен вариант установки с электроразрядной ударной трубой, используемой в качестве источника аргоновой плазмы. Труба состоит из коаксиального ускорителя (пушки Маршалла длиной 800 мм) и пристыкованного к нему канала длиной 2000 мм. Внутренний диаметр канала равен 56 мм. Ускоритель подключен к батарее конденсаторов типа ИС 5-200 общей емкостью 3200 мкФ с рабочим напряжением 5 кВ, коммутатором служит вакуумный управляемый разрядник. Источник плазмы соединен с каналом, образованным двумя дисками толщиной 60 мм и диаметром 340 мм, изготовленными из оргстекла. Диски установлены на расстоянии 20 мм друг от друга и крепятся к вакуумному ресиверу, охватывающему канал. В одном из дисков имеются гнезда для установки датчиков. Перед экспериментом установка наполняется аргоном до давления несколько сотен паскалей. Разряд конденсаторов через ускоритель порождает сильную ударную волну и поток плазмы за ней, распространяющиеся в сторону дискового канала. Так, при начальном давлении 267 Па длина пробки ударно-нагретого газа составляет примерно 40 см, ее скорость — 5000 м/с, время истечения газа в МГД-канал — до 100 мкс. В качестве источника плазмы натрия использовался электроэрозионный импульсный плазмотрон с временем действия порядка 10 мс и расходом 1 кг/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 99-02-16696).

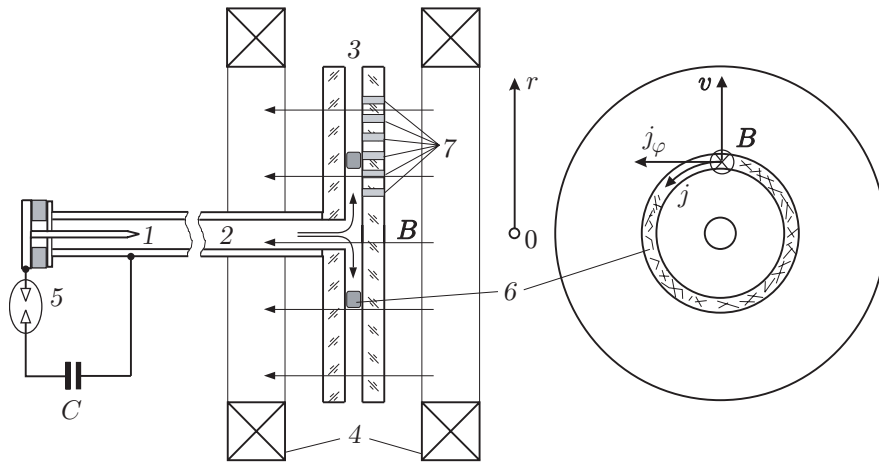


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1, 2 — импульсный источник плазмы (1 — коаксиальный ускоритель, 2 — канал); 3 — дисковый канал; 4 — электромагнит; 5 — вакуумный управляемый разрядник; 6 — Т-слой; 7 — гнезда для установки датчиков

С учетом параметров данной установки оценим возможность использования ее в качестве источника света, считая, что реализуется режим течения с развитым Т-слоем в аргоне. Предположим, что для единицы объема Т-слоя имеет место равенство джоулева нагрева и радиационных потерь $j^2/\sigma \approx \text{div } \mathbf{S}$, причем $j^2/\sigma \sim \sigma(uB)^2$; $\text{div } \mathbf{S} \sim S/l$. Здесь u — скорость потока; B — индукция магнитного поля; σ — проводимость; l — характерный размер Т-слоя. Считая, что каждый элементарный объем Т-слоя излучает энергию так же, как вписанный в него полусферический объем радиуса l , имеем поток излучения $S = \varepsilon\sigma'T^4$, где ε — степень черноты полусферического объема; σ' — постоянная Стефана — Больцмана. Проводимость определим по формуле Спитцера $\sigma = 1,56 \cdot 10^{-2} T^{3/2} / \ln \Lambda$, где $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм, а значения $\varepsilon(p, T)$ — по данным [4]. При $u = 10^3$ м/с, $B = 0,65$ Тл, $p = 0,1$ МПа, $l = 10^{-2}$ м получаем приближенное значение температуры в Т-слое 12 000 К и поток излучения $S = 1,5$ кВт/см².

После соответствующей модернизации установки выполнена серия экспериментов по выбору режимов ее работы с целью уточнения начальных условий, при которых Т-слой в потоке плазмы аргона и натрия возникал спонтанно за фронтом ударной волны, распространяющейся в дисковом канале поперек магнитного поля. В экспериментах с помощью магнитных зондов осуществлялась локализация токовой области, измерялись сила протекающего тока, деформация магнитного поля и скорость движения Т-слоя. Деформация компоненты магнитного поля ΔB , нормальной к дисковой поверхности канала (рис. 1), отсчитывалась от уровня однородного постоянного поля возбуждения B . В экспериментах использовалось семь магнитных зондов, расположенных вдоль радиуса канала на расстоянии 15 мм друг от друга, погрешность измерений не превышала 10%. В нескольких точках вдоль радиуса регистрировались спектр излучения натрия в видимой части и зависимость яркости излучения от времени.

Проанализируем изменение магнитного поля в потоке аргонной плазмы при перемещении Т-слоя вдоль радиуса канала при $B = 0,32$ Тл. На рис. 2 приведены зависимости $\Delta B(t)$ при различных расстояниях r от центра канала. Кривые 1–3, соответствующие трем меньшим радиусам, имеют N-образную форму, характерную для изменения магнитного поля в точке, мимо которой движется токовый слой. Участок с отрицательной производной dB/dt соответствует области потока, занятой токовым слоем.

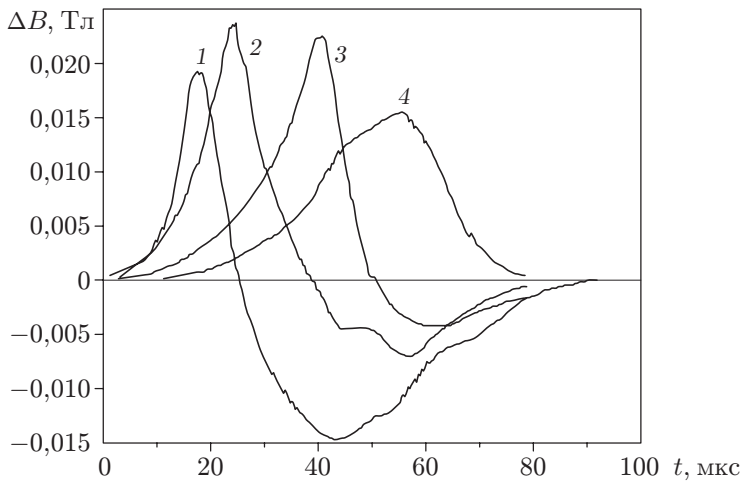


Рис. 2. Зависимость деформации магнитного поля от времени:

1 — $r = 70$ мм; 2 — $r = 100$ мм; 3 — $r = 130$ мм; 4 — $r = 160$ мм

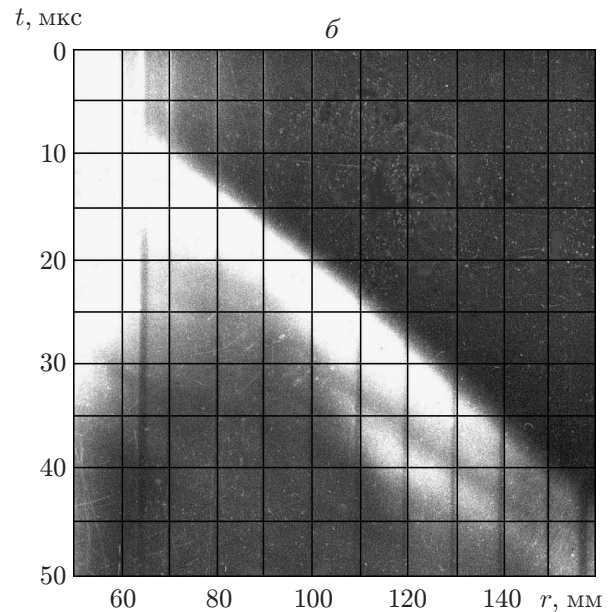
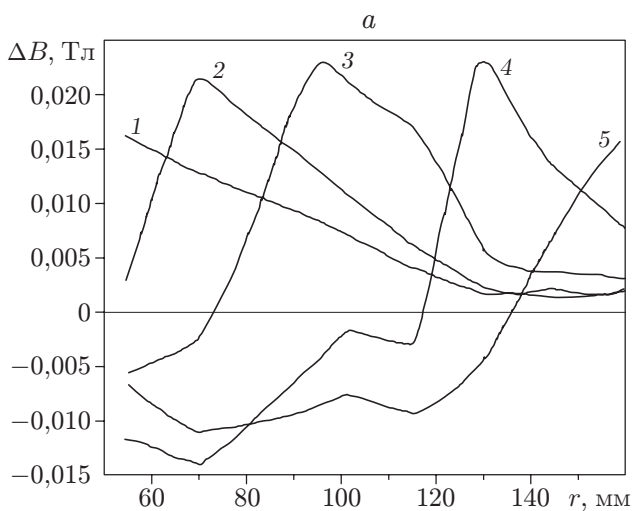


Рис. 3. Распределение деформации магнитного поля, совмещенное с фоторазверткой потока в канале:

a — распределение ΔB в канале (1 — $t = 5$ мкс, 2 — $t = 10$ мкс, 3 — $t = 18$ мкс, 4 — $t = 32$ мкс, 5 — $t = 50$ мкс); *б* — фоторазвертка течения с Т-слоем

Распределения деформации магнитного поля в канале по радиусу в различные моменты времени, полученные из приведенных на рис. 2 зависимостей $\Delta B(t)$ и совмещенные с фоторазверткой течения, показаны на рис. 3. Распределения $\Delta B(r)$ получены путем линейной интерполяции между экспериментальными точками. При движении токового слоя до координаты $r = 130$ мм плотность тока в нем возрастает, что проявляется в увеличении градиента dB/dr и уменьшении ширины токового слоя. В результате торможения Т-слоя в магнитном поле вверх по потоку от него отходит волна сжатия, инициирующая появление еще одного токового слоя, плотность тока в котором значительно меньше, чем в Т-слое. Отход волны с токовым слоем вверх по потоку вызывал расширение светящейся области, что хорошо видно на фоторазвертке (рис. 3, б). На фоторазвертке виден также излом переднего фронта потока, что обычно наблюдается при формировании Т-слоя в момент времени, когда фронт ударной волны опережает Т-слой. Отметим, что для идентификации в потоке

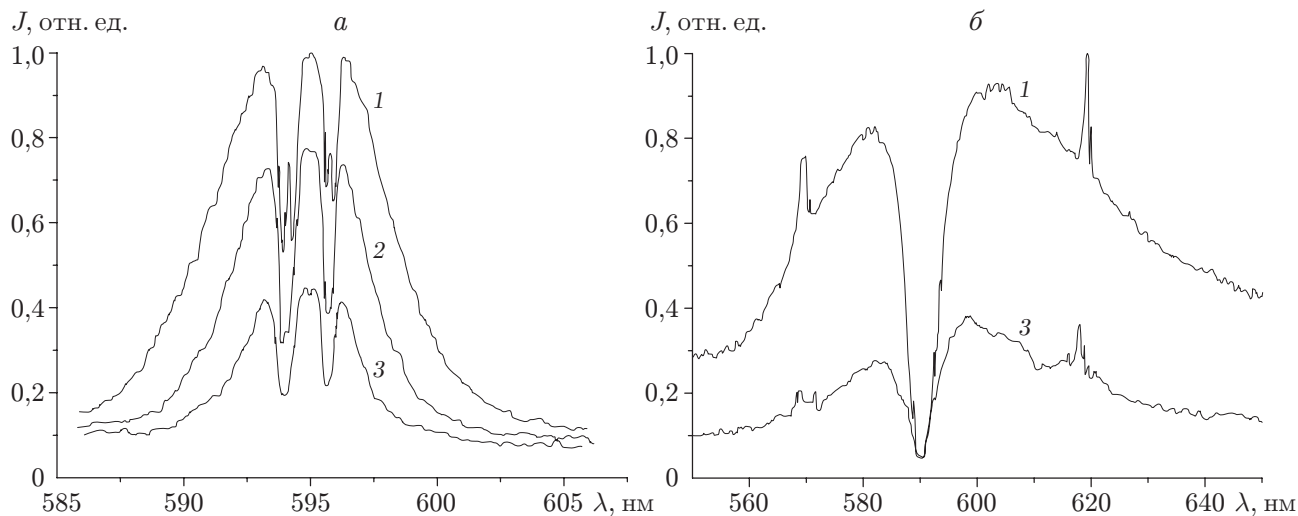


Рис. 4. Спектры излучения потока плазмы натрия:
a — $B = 0$; *б* — $B = 0,64$ Тл; 1 — $r = 70$ мм, 2 — $r = 115$ мм, 3 — $r = 160$ мм

T-слоя согласно данным настоящих экспериментов достаточно использовать какую-либо одну методику: измерение деформации магнитного поля с помощью магнитных зондов, фоторазвертку, измерение распределения давления в канале и т. д.

Изменение спектра излучения при развитии в потоке плазмы T-слоя регистрировалось в потоке плазмы натрия. На основе анализа фоторазверток был выбран режим работы установки, когда в плазме натрия возникал T-слой. Интегральный по времени спектр излучения потока плазмы натрия получен в отсутствие магнитного поля и при $B = 0,64$ Тл, когда возникал T-слой. На рис. 4,*a* показаны спектры излучения в окрестности желтого дублета натрия, полученные в отсутствие магнитного поля для трех значений r . Практически все зарегистрированное излучение плазмы находится на этом участке спектра. На рис. 4,*б* показаны аналогичные спектры при $B = 0,64$ Тл. Видно, что резонансные линии на рис. 4,*б* на порядок шире, а излучение континуума значительно интенсивнее. В отличие от спектра излучения аргоновой плазмы излучение натрия сосредоточено в относительно узкой полосе, что может быть полезным при создании источника света.

Выбор режима работы установки и положения точки измерения максимальной мощности излучения T-слоем проводился по результатам измерения деформации магнитного поля на различных расстояниях от центра канала. Эта методика позволяет легко идентифицировать стадию развития T-слоя и определить координату с максимальной амплитудой тока. Соответствующие измерения проводились магнитными зондами, установленными в канале на различных расстояниях от центра канала и регистрирующими изменение нормальной к плоскости канала составляющей вектора магнитной индукции. На рис. 5 приведена зависимость деформации магнитного поля от координаты r . Начальное давление аргона составляло 267 Па, $B = 0,64$ Тл. Уменьшение магнитного поля обусловлено прохождением T-слоя мимо точки наблюдения, причем чем выше плотность тока, тем интенсивнее деформация магнитного поля, и чем острее вершина, тем резче выражена передняя граница T-слоя. Для данного режима характерны две стадии развития T-слоя: точка $r = 90$ мм соответствует стадии максимального развития, при $r > 130$ мм наблюдается стадия его деградации.

На рис. 6 приведены синхронизированные зависимости от времени деформации магнитного поля и яркости свечения плазмы, измеренной с помощью фотодиода, вмонтированного в стенку канала и регистрировавшего поток излучения, нормальный к стенке

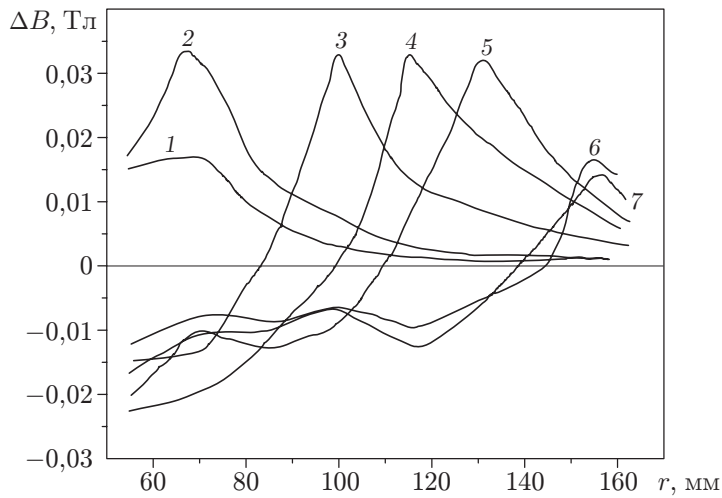


Рис. 5. Зависимость деформации магнитного поля от координаты r :
 1 — $t = 10$ мкс; 2 — $t = 15$ мкс; 3 — $t = 29$ мкс; 4 — $t = 42$ мкс; 5 — $t = 48$ мкс;
 6 — $t = 57$ мкс; 7 — $t = 60$ мкс

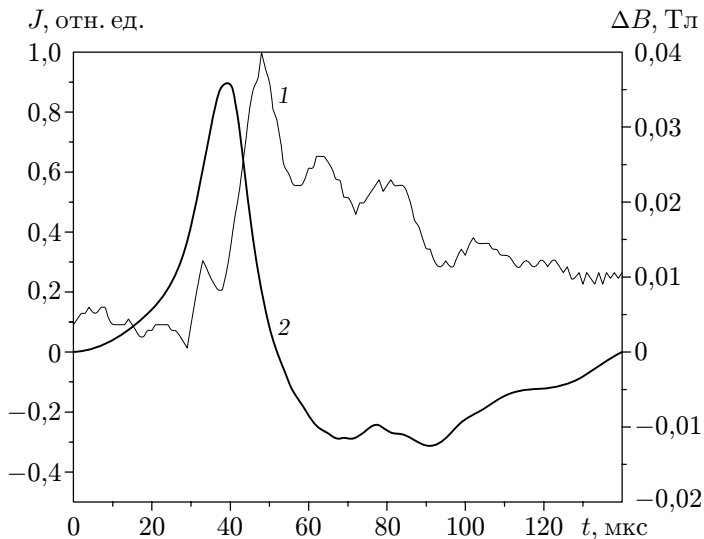


Рис. 6. Зависимости яркости свечения плазмы (1) и деформации магнитного поля (2) от времени

канала. Датчики располагались на расстоянии $r = 90$ мм. Видно, что максимум яркости соответствует области Т-слоя (зоне уменьшения магнитной индукции).

Поток излучения измерялся платиновым болометром, который имеет практически постоянную спектральную чувствительность во всем интервале длин волн, излучаемом Т-слоем, и сравнительно просто может быть откалиброван. На рис. 7, а–в приведены схема болометра, установленного в стенке канала, схема его калибровки и характерный калибровочный сигнал соответственно. Болометр состоит из металлического корпуса, чувствительного элемента, выполненного из платиновой проволоки диаметром 3 мкм и защищенного тонким (0,2 мм) стеклянным окном. Чувствительный элемент соединен с коаксиальным кабелем. Малый диаметр проволоки обеспечивает достаточно высокое временное разрешение. Калибровка проводилась в вакууме, в качестве эталона использовалась молибденовая лента шириной 30 мм, нагреваемая током до яркостной температуры 2000 К. Температура ленты контролировалась пирометром ЭОП-66. Расстояние от ленты до чувствительного элемента болометра равно 20 мм. Между болометром и лентой находилась медно-молибденовая шторка электромеханического затвора. Шторка открывалась на 0,1 с при установившейся температуре эталона. Сигнал с болометра (рис. 7, в) линейно зависел от времени в течение не менее 10 мс, практически линейная зависимость сигнала от поглощенного болометром излучения наблюдалась до значения амплитуды порядка 8 мВ. Поток

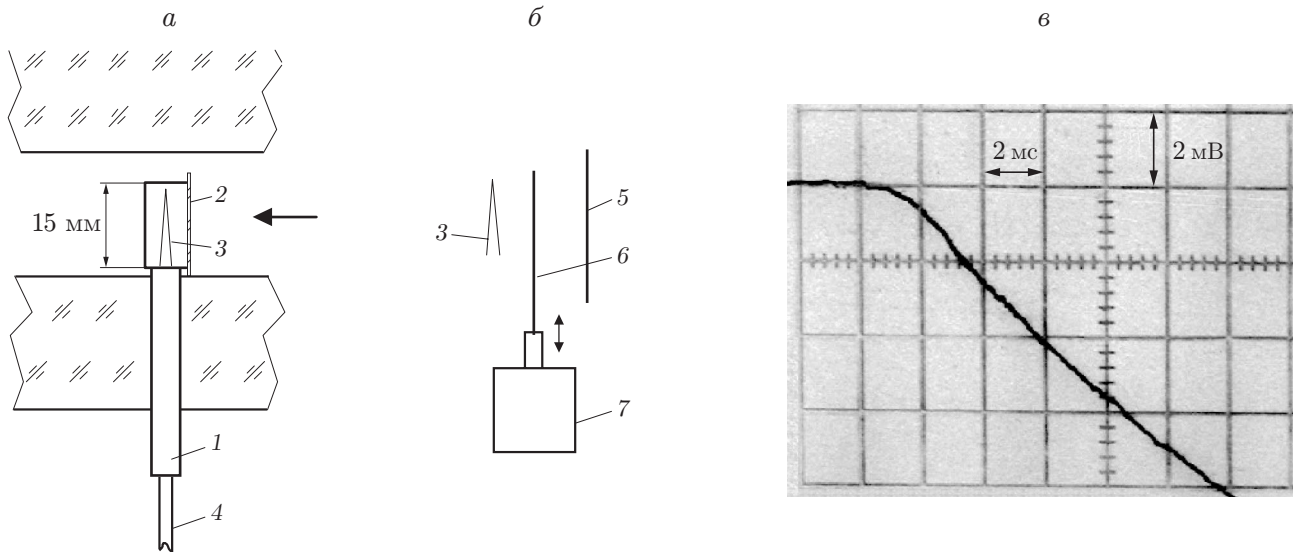


Рис. 7. Измерение потока излучения:

a — схема болометра; *б* — схема калибровки болометра; *в* — характерный калибровочный сигнал; 1 — металлический корпус; 2 — стеклянное окно; 3 — чувствительный элемент; 4 — коаксиальный кабель; 5 — молибденовая лента; 6 — медно-молибденовая шторка; 7 — электромеханический затвор

излучения от ленты $S_0 = \sigma' T^4 \approx 9 \cdot 10^{15}$ Вт/м². При этом скорость изменения сигнала с болометра, пропорциональная потоку излучения, равна 0,7 В/с.

Для измерения потока излучения от Т-слоя выбран режим работы установки, в котором наблюдалось максимально сильное МГД-взаимодействие: начальное давление аргона 267 Па, $B = 0,64$ Тл. В этом режиме на расстоянии 90 мм от центра реализуется максимально развитый Т-слой, который на расстоянии 130 мм начинает распадаться вследствие сильного торможения. Для синхронизации прохождения Т-слоя мимо болометра, расположенного на расстоянии 115 мм от центра, устанавливались магнитные зонды на расстояниях $r = 100, 130$ мм. На рис. 8 приведены совмещенные сигналы с зондов U_3 (кривые 1, 2) и с болометра U_6 (кривая 3). Т-слой локализован в окрестности максимума сигнала с зондов. Видно, что скорость прохождения токовым слоем отметки $r = 100$ мм значительно выше скорости прохождения отметки $r = 130$ мм, где начинается распад Т-слоя. Таким образом, болометр установлен в области наиболее сильного МГД-взаимодействия. На записи сигнала с болометра имеется два горизонтальных участка ($t \leq 30$ мкс и $t \geq 80$ мкс) и участок, на котором наблюдается уменьшение сигнала (30 мкс $< t < 80$ мкс). Горизонтальные участки кривой сигнала с болометра соответствуют временным интервалам, когда облучение болометра мало. Участок, на котором сигнал уменьшается, соответствует прохождению Т-слоем отметки 115 мм, когда поток излучения значителен. Результаты измерений болометром показывают, что его временное разрешение достаточно высокое, время уменьшения сигнала соответствует времени прохождения болометра Т-слоем. Температура нити болометра после прохождения Т-слоя практически постоянная. Это позволяет пренебречь охлаждением нити в результате теплообмена с окружающим ее газом при измерении потока излучения от Т-слоя. Уровень шума обусловлен характеристиками усилителя.

Оценим поток излучения. Скорость изменения напряжения составляла порядка 8 В/с, что соответствует потоку $S = 8S_0/0,7 \approx 1$ кВт/см² и подтверждает приведенную в начале работы оценку. Удельная мощность джоулева нагрева в условиях данных экспериментов (при характерной плотности тока примерно 400 А/см² и ЭДС около 10 В/см [3]) составляет

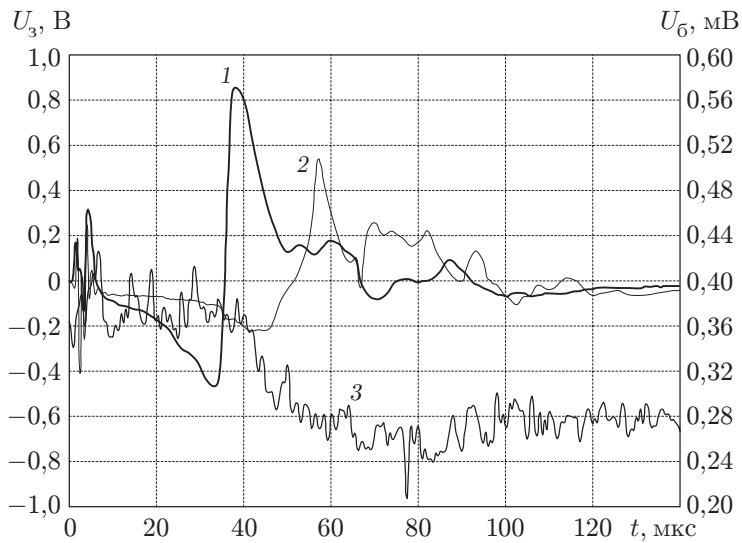


Рис. 8. Синхронизированные сигналы с магнитных зондов и болометра:

1, 2 — U_3 (1 — $r = 100$ мм; 2 — $r = 130$ мм); 3 — U_6

$W \approx 5$ кВт/см³. Сопоставление значений S и W также подтверждает вывод теоретических исследований Т-слоя о роли излучения как основного стабилизирующего фактора на нелинейной стадии развития перегретной неустойчивости [5, 6].

В заключение отметим, что полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования рассмотренного варианта МГД-преобразователя энергии в качестве мощного источника света в соответствующих технологических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворников И. В., Колпаков Ю. А., Лакутин В. А., Подмошенский И. В. Слойный импульсный разряд как источник света для облучения // Журн. прикл. спектроскопии. 1974. Т. 21, вып. 2. С. 227–234.
2. Гриднев Н. П., Кацнельсон С. С., Фомичев В. П. Неоднородные МГД-течения с Т-слоем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984.
3. Поздняков Г. А. Экспериментальное исследование Т-слоя в модели дискового МГД-генератора на аргоне и парах натрия: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1997.
4. Кацнельсон С. С., Ковальская Г. А. Теплофизические и оптические свойства аргоновой плазмы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А., Заклязьминский Л. А. и др. Эффект Т-слоя в магнитной гидродинамике / АН СССР. Ин-т пробл. механики. Препр. М., 1969.
6. Кацнельсон С. С. Исследование высокотемпературных магнитогидродинамических потоков в задачах преобразования энергии: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1998.

Поступила в редакцию 23/ХІІ 2002 г.,
в окончательном варианте — 11/ІІІ 2003 г.