

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

Отделение оптики

Препринт N

А.А.Кузнецов, Е.М.Кудрявцев, А.В.Варава, А.В.Дедов

Исследование условий наблюдения «уединенных» волн по локальным
изменениям температуры в массивном медном образце при воздействии
электронного пучка

A.A.Kuznetsov, E.M.Kudriavtsev, A.N.Varava, A.V.Dedov

Research of observation conditions of “solitary” waves using local variation of
temperature in a massive copper sample irradiated by electronic beam

МОСКВА 2003

ABSTRACT

A.A.Kuznetsov, E.M.Kudriavtsev, A.N.Varava, A.V.Dedov

Research of observation conditions of “solitary” waves using local variation of temperature in a massive copper sample irradiated by electronic beam

A set of measurements has been performed for studying the local variations in a copper sample temperature associated with the passage of “solitary” waves, caused by e-beam irradiation of its surface.

Based on the sizes of sample, total duration of experiments, and time between measurements we defined the ranges of speeds that can be registered and the numbers of wave components that are included in these ranges. For these components the sizes of the temperature waves, which can be fixed by our system, the moments of their appearance and duration of their passage through thermocouple have been determined as well as the time shifts between measured channels.

There were specified the reasons complicating registration of the “solitary” waves, and experimental conditions which are expedient for changing: to increase stability of anodi current, to improve speed of the registration system, to reduce duration of influence and to increase the power density of electronic beam.

Work was performed at Moscow Power Institute (Technical University) and P.N.Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Science at partial support by RFBR (the project 00-02-17249).

АННОТАЦИЯ

А.А.Кузнецов, Е.М.Кудрявцев, А.В.Варава, А.В.Дедов

Исследование условий наблюдения «уединенных» волн по локальным изменениям температуры в массивном медном образце при воздействии электронного пучка

Проведена серия измерений временных зависимостей температуры в медном образце с целью изучения локальных температурных изменений, связанных с распространением в нем «солитоноподобной» волновой структуры, вызванной воздействием электронного пучка на его поверхность.

Исходя из размеров образца, времени записи и промежутка между измерениями для каждого из экспериментов получены диапазон регистрируемых скоростей и номера компонент волновых структур, скорости которых в него попадают. Для этих компонент определены размеры возмущений, которые можно зафиксировать нашей системой, время их появления и длительность прохождения через термодатчик, временной сдвиг между различными каналами.

Указаны причины, затрудняющие регистрацию «уединенных» волн, и экспериментальные условия, которые целесообразно изменить: повысить стабильность анодного тока, улучшить быстродействие системы регистрации, сократить длительность воздействия электронного пучка на образец и увеличить максимальную плотность его мощности.

Работа выполнена в Московском Энергетическом Институте (Техническом Университете) и Физическом институте им.П.Н.Лебедева РАН при частичной поддержке РФФИ, проект 00-02-17249.

Исследование условий наблюдения «уединенных» волн по локальным изменениям температуры в массивном медном образце при воздействии электронного пучка

А.А.Кузнецов ¹, Е.М.Кудрявцев ¹, А.В.Варава ², А.В.Дедов ²

¹ *Физический институт им.П.Н.Лебедева Российской Академии Наук*

² *Московский Энергетический Институт (Технический Университет)*

1. Введение

В ряде публикаций [1-3], посвященных исследованию облучения массивных медных образцов электронным пучком, обнаружены локальные изменения температуры, соответствующие прохождению медленных компонент солитоноподобной волновой структуры. Ранее аналогичные волновые структуры наблюдались для различных материалов при облучении их ИК лазерными импульсами с плотностью мощности $\sim 10 \text{ кВт/см}^2$ [4]. В данной работе изучаются временные зависимости температуры в медном образце как непосредственно после включения, так и при длительном воздействии электронного пучка. Температуры измеряются при различной интенсивности пучка и на разном расстоянии от облучаемой поверхности.

2. Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка была аналогична описанной в [1]. Она позволяет моделировать процессы теплообмена при вынужденной конвекции теплоносителя (воды) и одностороннем нагреве рабочего участка экрана с помощью пучка электронов от электронной пушки ЭЛА 60/15-Т.

Условная схема облучаемого образца изображена на Рис. 1. Рабочим участком служила поверхность $14 \times 14 \text{ мм}^2$ медного параллелепипеда с цилиндрическим отверстием диаметром 8 мм, через которое под давлением прокачивалась вода. Толщина образца, т.е. размер между передней

облучаемой стенкой и задней, от которой волны могут отражаться, $D = 6$ мм. Образец был помещен в вакуумную камеру с рабочим давлением $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Строчно-кадровая развертка электронного пучка обеспечивала сканирование поверхности нагрева с частотой кадра 10 кГц при количестве строк в кадре 64. Этим обеспечивалась однородность распределения мощности по рабочей поверхности. Величина мощности регулировалась изменением анодного тока в пределах от 5 до 100 мА. Максимальная мощность составляла ~ 5 кВт,

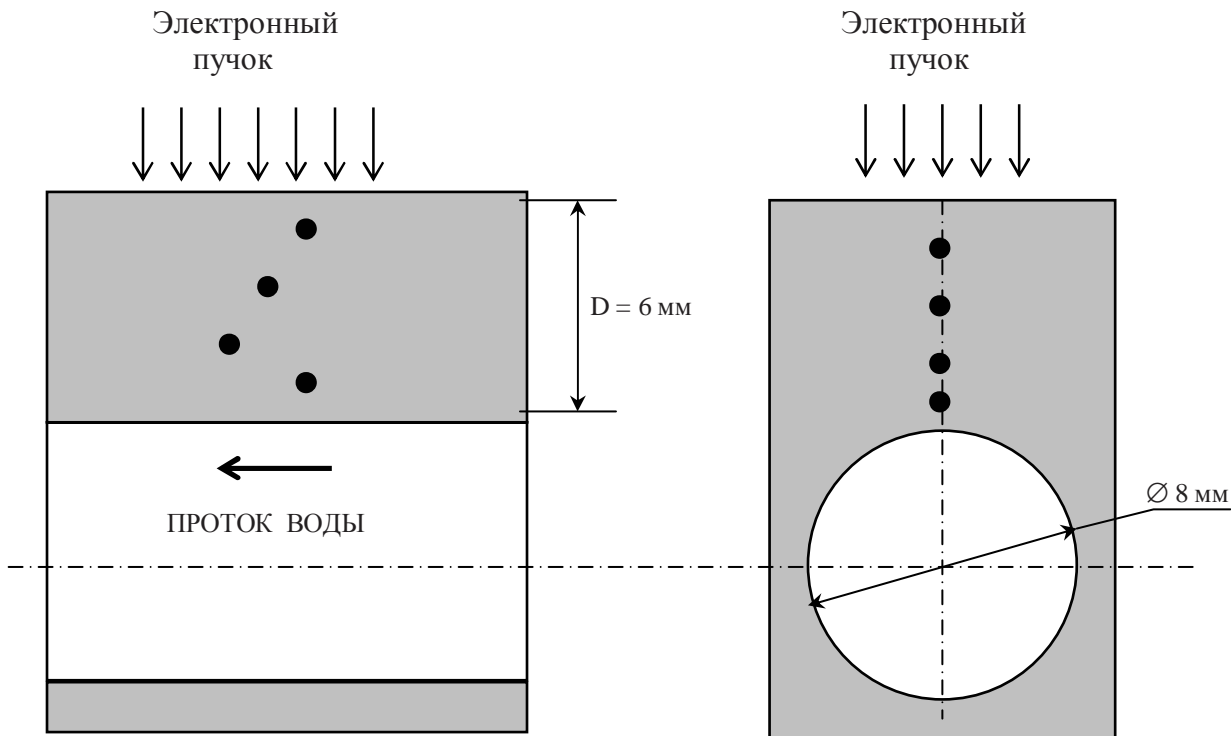


Рис. 1 Условная схема рабочего образца.

плотность мощности - $2,5$ кВт/см². Выведение пучка на полную мощность происходило за время ~ 1 сек.

Регистрация температуры производилась с помощью четырех кабельных хромель-алюмелевых термопар (обозначены кружками) с диаметром кабеля $0,3$ мм и постоянной времени ~ 10 мсек. Термопары 1 - 4 располагались на расстояниях 1 мм, $2,5$ мм, 4 мм и 5 мм соответственно от облучаемой поверхности.

3. Результаты измерений и их обсуждение

В Таблице 1 представлены следующие параметры проведенных экспериментов (№№ 1-16) по измерениям временных зависимостей температуры: полное время измерений $t_{ИЗМ}$, промежуток между измерениями Δt , количество точек в эксперименте N , величина среднего значения анодного тока I . Кроме того, значком + обозначено какие из измеряемых каналов (термопар) $T1, T2, T3, T4$ были подключены в каждом из экспериментов.

Таблица 1. Условия и параметры измерений

№ экс	$t_{ИЗМ}$ сек	Δt сек	N	I мА	T1	T2	T3	T4	h	n	K	V_{min} см/сек	V_{max} см/сек	№ комп, i
1	134	7,47	19	58	+	+	+	+	6	4	1	0,0045	0,0028	-
2	123	3,41	37	-	+	+	+	+	6	4	1	0,0049	0,0060	-
3	225	7,49	31	66	+	+	+	+	6	4	1	0,0027	0,0028	-
4	187	7,21	27	65	+	+	+	+	6	4	1	0,0032	0,0029	-
5	157	7,47	22	72	+	+	+	+	6	4	1	0,0038	0,0028	-
6	779	7,49	105	62	+	+	+	+	6	4	1	0,0008	0,0027	28, 29
7	216	7,46	30	60	+	+	+	+	6	4	1	0,0028	0,0028	-
8	263	7,50	36	66	+	+	+	+	6	4	1	0,0023	0,0027	-
9	172	7,15	25	80	+	+	+	+	6	4	1	0,0035	0,0029	-
10	440	7,46	60	65	+	+	+	+	6	4	1	0,0014	0,0027	28
11	232	7,49	32	68	+	+	+	+	6	4	1	0,0026	0,0028	-
12	282	1,45	195	-	+	-	-	+	8	4	2	0,0043	0,0104	26
13	282	1,45	196	-	+	-	-	+	8	4	2	0,0043	0,0104	26
14	65	0,79	82	-	-	-	-	+	8	4	3	0,0277	0,0189	-
15	189	0,80	235	-	-	-	-	+	8	4	3	0,0096	0,0188	25
16	155	0,79	197	-	-	-	-	+	8	4	3	0,0117	0,0191	25

В экспериментах №№ 1-11 запись изменения температуры начиналась спустя длительное время (от 270 до 4700 сек) после включения пучка, который действовал на образец в течение всего измерения. При этом для регистрации использовались все имеющиеся четыре канала ($T1, T2, T3, T4$).

Эксперименты №№ 12-16 соответствуют измерениям температуры как до начала, так и во время облучения образца. В случаях № 12 и № 13 регистрация проводилась по двум каналам ($T1$ и $T4$), а в последних трех - только по одному ($T4$).

Проведем оценку параметров солитоноподобных волновых структур, которые мы можем зарегистрировать с помощью имеющихся экспериментальных данных. Прежде всего, размер возмущения температуры L в направлении распространения волны должен быть заметно меньше толщины образца D . Кроме того, мы можем фиксировать только те компоненты волновых структур, скорость которых не превышает V_{max} , определяемую из выражения

$$V_{max} = \frac{L}{(n+1)\Delta t} \quad , \quad (1)$$

где n - требуемое количество точек на волне (возмущенном участке). Мы полагаем, что для надежной регистрации возмущения следует взять $n = 4$. Минимальную скорость волны, фиксируемую в наших экспериментах с достаточной степенью достоверности, V_{min} можно получить из следующего условия

$$V_{min} = \frac{KD}{t_{ИЗМ}} \quad , \quad (2)$$

где K – количество полных проходов компоненты через образец толщиной D за время измерений $t_{ИЗМ}$. По-видимому, для экспериментов с одним измеряемым каналом (№№ 14-16) целесообразно положить $K = 3$, для двухканальной регистрации с датчиками вблизи границ образца (№№ 12, 13) $K = 2$, а в тех случаях, когда используются все четыре канала (№№ 1-11), достаточно взять $K = 1$.

Принимая во внимание соотношение $t_{ИЗМ} = (N-1)\Delta t$ запишем диапазон регистрируемых скоростей волновых структур в виде

$$K \cdot \frac{D}{t_{ИЗМ}} < V < \frac{(N-1)}{(n+1)h} \cdot \frac{D}{t_{ИЗМ}}, \quad (3)$$

где $h = D/L$ – отношение толщины образца к размеру волны. Считая, что в образце толщиной $D = 6$ мм при использовании четырех датчиков, удаленных на 1 мм и 1,5 мм друг от друга (см. Рис. 1), можно идентифицировать возмущения с размером L не более ~ 1 мм, получим для экспериментов №№ 1-11 $h = 6$. А при двух (или одном) используемых датчиках, расположенных на расстоянии 1 мм от стенок, величина L не должна превышать $\sim 0,75$ мм. Следовательно, для экспериментов №№ 12-16 $h = 8$. С учетом сказанного выше определим из выражения (3) значения V_{min} и V_{max} для всех наших экспериментов. Полученные результаты представлены в Таблице 1.

Если взять за основу гипотезу о том, что при импульсном воздействии на твердое тело (в данном случае медный образец) возникающие «уединенные» волны распространяются с дискретными скоростями, равными $U_i = 2^i \times V_{Cu}$ (где $V_{Cu} = 4,7$ км/сек – продольная скорость звука для меди) [4], можно определить номера компонент i , попадающих в регистрируемый интервал. Результаты также приведены в Таблице 1.

Из Таблицы видно, что только в шести экспериментах (№№ 6, 10, 12, 13, 15, 16) параметры измерений позволяют регистрировать изменения температуры, связанные с распространением волновых структур. Причем лишь в одном из них (эксперимент № 6) в интервал между V_{min} и V_{max} попадают две компоненты, а в остальных пяти – по одной.

Для каждой из указанных компонент, с учетом их скоростей, оценим предельные геометрические размеры возмущений L_{min} и L_{max} , которые можно зафиксировать нашей системой, и длительность прохождения этих возмущений через термодатчик Δt_{WAVE} .

Величина L_{min} определяется из выражения (1) и для компоненты с номером i составляет $L_{min} = U_i (n+1)\Delta t$, а значение L_{max} равняется D/h . Соответственно, величина Δt_{WAVE} лежит в диапазоне от (L_{min}/U_i) до (L_{max}/U_i) . Результаты представлены в Таблицах 2-4. Там же для всех компонент приведено количество их проходов через термодатчик за полное время измерений $t_{ИЗМ}$, совпадающее с числом соответствующих возмущений $m = U_i t_{ИЗМ} / D$ в каждом канале. Кроме того, исходя из пространственного расположения термопар для каждой компоненты определены временные сдвиги между различными каналами $\Delta t_{i,j}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$) и время задержки между включением пучка и первым появлением сигнала $\Delta t_{0,1}$ и $\Delta t_{0,4}$.

Таблица 2 соответствует экспериментам № 6 и № 10, в которых измерения проводились по четырем каналам. Временные зависимости температур $T1, T2, T3, T4$ показаны на Рис. 2 и 3. Таблица 3 соответствует экспериментам № 12 и № 13, в которых измерения проводились по двум каналам. Временные зависимости температур $T1$ и $T4$ представлены на Рис. 4 и 5. Указанные в Таблицах 2 и 3 временные сдвиги между различными каналами $\Delta t_{1,2}$, $\Delta t_{2,3}$, $\Delta t_{3,4}$, $\Delta t_{1,4}$, определяются расстояниями между соответствующими термодатчиками и могли бы наблюдаться даже при отсутствии отражений «уединенных волн» от стенок образца.

Таблица 2. Параметры температурных возмущений для экспериментов с четырехканальной регистрацией

№ эксп	№ комп. i	U_i , см/сек	$L_{min} \div L_{max}$ мм	Δt_{WAVE} сек	m	$\Delta t_{1,2}$, сек	$\Delta t_{2,3}$, сек	$\Delta t_{3,4}$, сек
6	28	0,0018	0,66 ÷ 1	40 ÷ 60	2	83	83	56
	29	0,0009	0,33 ÷ 1	40 ÷ 120	1	167	167	110
10	28	0,0018	0,66 ÷ 1	40 ÷ 60	1	83	83	56

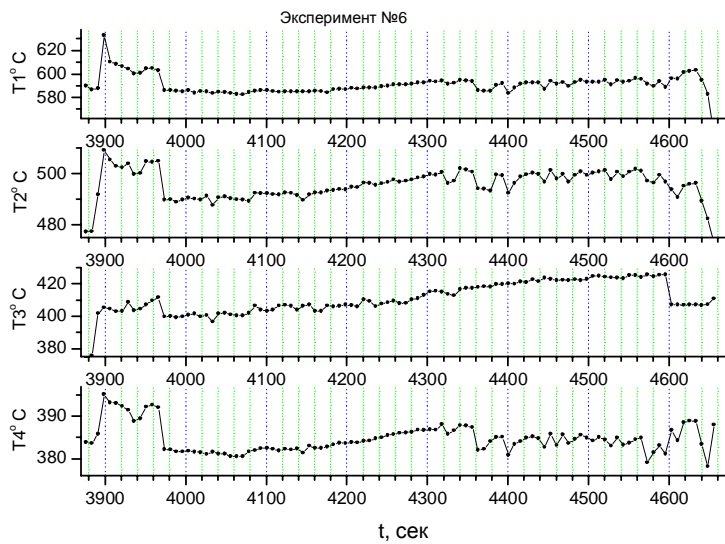


Рис. 2. Результаты измерения температур Т1 - Т4 (эксперимент № 6)

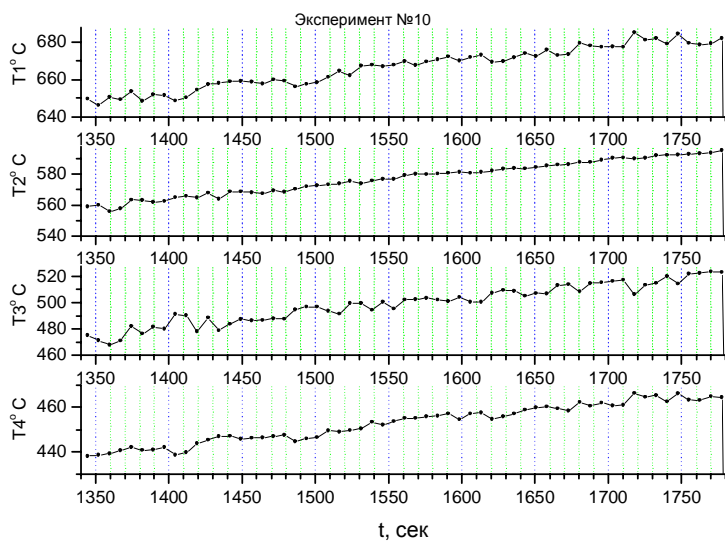


Рис. 3. Результаты измерения температур Т1 - Т4 (эксперимент № 10)

Таблица 3. Параметры температурных возмущений для экспериментов с двухканальной регистрацией

№ эксп	№ комп, i	U_i , см/сек	$L_{min} \div L_{max}$, мм	Δt_{WAVE} , сек	m	$\Delta t_{0,1}$, сек	$\Delta t_{1,4}$, сек	$\Delta t_{1,1B} = \Delta t_{4,4B}$, сек
12	26	0,007	0,5 ÷ 0,75	7 ÷ 11	3-4	14	57	28
13	26	0,007	0,5 ÷ 0,75	7 ÷ 11	3-4	14	57	28

В экспериментах №№ 12-16, измеренные временные зависимости температуры включают момент начала воздействия пучка на образец. Это позволяет рассчитать время между включением пучка и первым появлением сигнала на 1-ой и 4-ой термопарах - $\Delta t_{0,1}$ и $\Delta t_{0,4}$. Кроме того, в этих экспериментах возможно зафиксировать несколько прохождений волны через термодатчик после ее отражений от границ образца. Временные интервалы $\Delta t_{1,1B}$, $\Delta t_{4,4B}$ и $\Delta t_{4,4D}$ определяются расстояниями между термопарами 1 и 4 и стенками образца – ближней и дальней от них соответственно.

Для одноканальных измерений (№№ 15, 16) параметры температурных возмущений приведены в Таблице 4, экспериментальные временные зависимости температуры T_4 (1) и те же зависимости, сглаженные по двум соседним точкам (2), показаны на Рис. 6 и 7.

Таблица 4. Параметры температурных возмущений для экспериментов с одноканальной регистрацией

№ эксп	№ комп, i	U_i , см/сек	$L_{min} \div L_{max}$, мм	Δt_{WAVE} , сек	m	$\Delta t_{0,4}$, сек	$\Delta t_{4,4B}$, сек	$\Delta t_{4,4D}$, сек
15	25	0,014	0,6 ÷ 0,75	4 ÷ 5	4-5	36	14	70
16	25	0,014	0,6 ÷ 0,75	4 ÷ 5	3-4	36	14	70

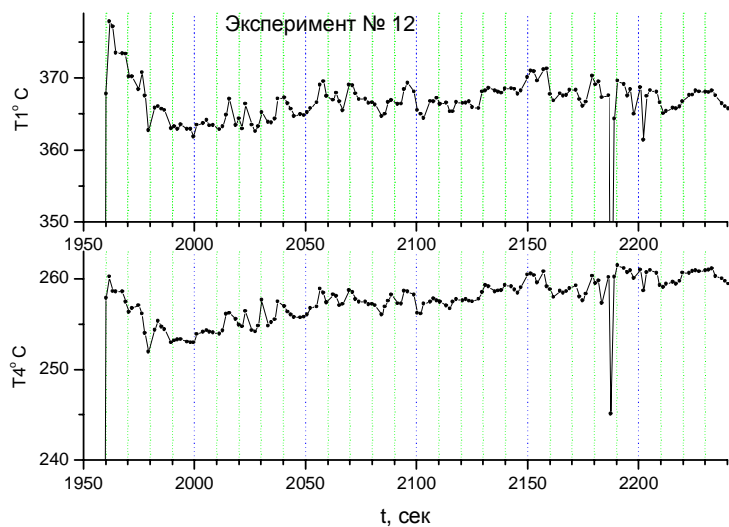


Рис. 4. Результаты измерения температур $T1$, $T4$ (эксперимент № 12)

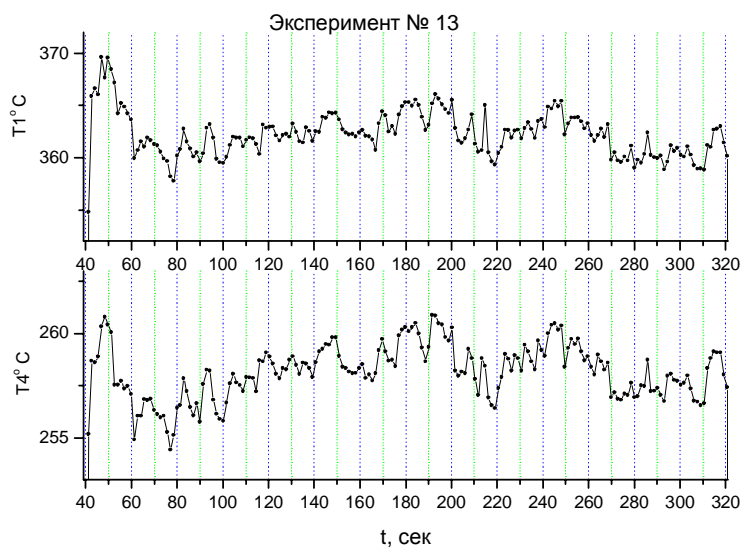


Рис. 5. Результаты измерения температур $T1$, $T4$ (эксперимент № 13)

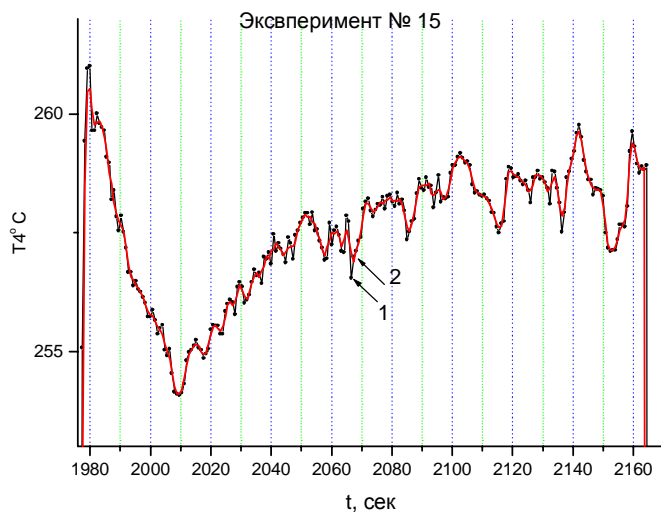


Рис. 6. Результаты измерения температуры T_4 – (1); та же зависимость, сглаженная по двум соседним точкам – (2). (Эксперимент № 15)

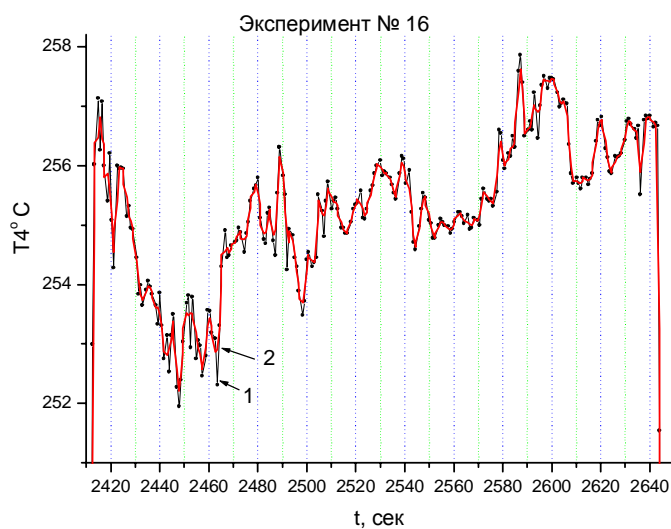


Рис. 7. Результаты измерения температуры T_4 – (1); та же зависимость, сглаженная по двум соседним точкам – (2). (Эксперимент № 16)

Таким образом, в том случае, если в экспериментах №№ 12-16 из-за воздействия электронного пучка возбуждаются волновые структуры, 25-ая и 26-ая компонента которых имеет продольный размер $0,5 \div 0,8$ мм, временные зависимости температуры должны иметь следующий вид.

В экспериментах №№ 12, 13 ожидаемая длительность температурных возмущений ~ 10 сек. Причем на термопаре 1 они должны появляться приблизительно через 14, 160 и 190 сек, а на термопаре 4 – через 70, 100, 240 и 270 сек после включения электронного пучка.

В экспериментах №№ 15, 16 ширина возмущений температуры равняется ~ 5 сек, а время их появления составляет $\sim 36, 50, 120$ и 140 сек после начала облучения образца.

При анализе экспериментальных данных (Рис. 2 – 7) указанные выше изменения температуры нами обнаружены не были. Причины, затрудняющие наблюдение «уединенных» волн, приведены в следующем разделе. Там же указаны экспериментальные условия, которые следует изменить для облегчения их регистрации.

4. Заключение

В работе рассмотрены временные зависимости пространственного распределения температуры в медном образце с целью обнаружения и изучения локальных изменений температуры, связанных с распространением в нем солитоноподобной волновой структуры, вызванной воздействием электронного пучка на его поверхность. Исходя из размеров образца, полного времени записи $t_{ИЗМ}$ и промежутка между измерениями Δt для каждого из экспериментов получены диапазон регистрируемых скоростей и номера компонент волновых структур i , скорости которых в него попадают. Для компонент, попадающих в регистрируемый интервал, определены предельные геометрические размеры возмущений, которые можно

зафиксировать нашей системой, время их появления и длительность прохождения через термопару, а также, с учетом расположения термодатчиков, временной сдвиг между различными каналами.

При анализе экспериментальных данных указанные выше изменения температуры нами обнаружены не были. Мы полагаем, что это может быть обусловлено рядом причин. Во-первых, отсутствие в наших экспериментах ожидаемых компонент может быть связано как с возможностями измерительной системы (отношение сигнал-шум), так и просто с пренебрежимо малой их интенсивностью. Другой причиной может являться малый продольный размер возмущений, ограничения на который в данном случае определяются временным интервалом между измеряемыми точками. Не исключено также и «зашумление» экспериментальной зависимости более быстрыми компонентами, отраженными от стенок образца. Ну и наконец, возможно подаваемая плотность мощности электронного пучка недостаточна для возбуждения солитоноподобных волновых структур. Отметим, что максимальный уровень плотности мощности, ограниченный в данной работе техническими возможностями и составляющий $\sim 2,5$ кВт/см², почти в 3 раза ниже, чем в [1-3].

В связи с вышесказанным считаем целесообразным продолжить экспериментальные исследования, изменив некоторые условия измерений. Предполагается понизить уровень шумов, одной из причин которых является нестабильность анодного тока. Улучшить быстродействие системы регистрации, сократив временной интервал между измеряемыми точками. Это позволит фиксировать более быстрые компоненты и возмущения с меньшими геометрическими размерами. Кроме того, желательно уменьшить длительность воздействия электронного пучка на образец и повысить максимальную плотность его мощности.

Работа выполнена в Московском Энергетическом Институте (Техническом Университете) и Физическом институте им.П.Н.Лебедева РАН при частичной поддержке РФФИ, проект 00-02-17249.

Литература

1. Е.М.Кудрявцев, А.В.Варава, А.В.Дедов, А.Т.Комов, Краткие сообщения ОИЯИ № 5,6 [97]- 99, стр. 13-21.
2. E.M.Kudriavtsev, A.N.Varava, A.V.Dedov, A.T.Komov, Electron-beam excitation of slow components of a three-dimensional soliton-like wave structure in a bulk cooper sample, *Kratkie Soobshchenija po Fizike*, No. 10, 1999, pp. 31-37.
3. E.M.Kudriavtsev, A.N.Varava, A.V.Dedov, A.T.Komov, S.D.Zotov, Generation of slow soliton-like excitations in massive copper sample at pulse beam effect, In: *Proceedings of 11th Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter*, Tomsk, 2000, v.1, pp.135-138, edition "Vodoley".
4. E.M.Kudriavtsev, In: *High-Power Laser Ablation*, Proc. SPIE, 1998, v. 3343, p. 411.