

УДК 536.2.01+621.039.63+537.533

НАБЛЮДЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ СОЛИТОНОПОДОБНОЙ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ В МАССИВНОМ ОБРАЗЦЕ МЕДИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Е.М.Кудрявцев^{1,2}, А.В.Варава³, А.В.Дедов³, А.Т.Комов³

Термопарные записи колебаний температуры стенки охлаждаемой медной трубки толщиной 3 мм, на которую подан электронный пучок с плотностью 0,4–7 кВт/см², обнаруживают несколько медленных компонентов солитоноподобной волновой структуры. Они зарождаются на внешней и внутренней стенках облучаемого участка трубки и распространяются в нем со скоростями порядка 10⁻² см/с, многократно отражаясь от стенок. Скорости последующих компонентов отличаются приблизительно вдвое. Ранее аналогичные волновые структуры наблюдались для различных материалов при облучении их ИК-лазерными импульсами с плотностью мощности порядка 10 кВт/см².

Работа выполнена в ФИАН им. П.Н.Лебедева и МЭИ(ТУ) при частичной поддержке РФФИ, проект 97-02-17954-а.

Observation of Slow Components of Solitonic-Type Wave Structure Excited by e-Beam in Massive Copper Sample

E.M.Kudriavtsev et al.

There were shown several slow components of solitonic-type wave structure in the thermocouple temperature variation records of the cooled copper tube 3 mm thick. The tube was irradiated by electron beam with density (0.4–7.0) kW/cm². These components arise on the external and internal surfaces of irradiated tube area and spread within it with the velocities of the order of 10⁻² cm/sec being repeatedly reflected from the walls. The subsequent component velocities differ approximately twice. The analogous wave structures were observed previously for the different materials at its IR-laser pulse irradiation with the density of the order of 10 kW/cm².

The investigation has been performed at the Lebedev Physical Institute of RAS (Moscow) and Moscow Power Institute (Technical University) and partially supported by RFBR, project 97-02-17954-a.

¹Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Отделение оптики, Москва

²E-mail address: kudri@sgi.lpi.msk.su or <kudriavt@sci.lpi.msk.su>

³Московский энергетический институт (технический университет), кафедра общей физики и ядерного синтеза

1. ВВЕДЕНИЕ

В серии работ, посвященных исследованию воздействия импульсного лазерного ИК-излучения сначала на ВТСП-материалы [1,2], а затем и на образцы четырех главных типов кристаллов и ряда аморфных тел (см. обзор [3]), было обнаружено новое явление, названное волной изменения отражения и проводимости (ВИОП) по первым методам регистрации волны. Она представляет собой трехмерную солитоноподобную волновую структуру, в которой из области генерации в ответ на один возбуждающий импульс достаточной плотности (около 10 кВт/см^2) по поверхности материала и сквозь него расходится целая последовательность одиночных волн — компонентов ВИОП. Они имеют одинаковый и постоянный знак амплитуды (положительный или отрицательный), а величина амплитуды слабо спадает с расстоянием. Каждый компонент ВИОП имеет постоянную скорость и отражается от стенок образца с малыми потерями энергии. Скорости последующих компонентов U_i каждый раз уменьшаются примерно вдвое, начиная от продольной скорости звука v_i (порядка км/с) до скоростей порядка мм/с, согласно выражению

$$U_i = (2)^{-i} v_i, \quad (1)$$

где индекс i , как установлено в экспериментах (см. [3]), может принимать значения от 0 до 25. При этом не видно ограничений на его дальнейшее увеличение.

ВИОП была зарегистрирована сначала по обратимому изменению отражения для видимого света по методике наблюдения изменений отражения в геометрии Брюстера, а затем по изменению проводимости в образце под действием этой волны. Затем была предложена и реализована методика регистрации изменений давления как третьего независимо измеряемого параметра при прохождении ВИОП. В дальнейшем для ее регистрации использовалось изменение пропускания образцов в видимой или ИК-областях спектра и тепловое излучение образца (с помощью термовидеокамеры) [3]. Измерения колебаний температуры с помощью такого надежного средства, как термопара, представленные в настоящей работе (см. также [4]), делают результаты исследований ВИОП особенно достоверными.

Вопрос о возможной роли солитонов в переносе тепловой энергии в твердых телах обсуждался уже давно, в основном теоретически (см. краткий обзор в [3]). М.Тода [5] пришел к заключению, что солитоны играют важную роль в теплопроводности нелинейных кристаллических решеток с нарушениями. С экспериментальной точки зрения вопрос обсуждался в [6].

В течение ряда лет на кафедре общей физики и ядерного синтеза Московского энергетического института (технического университета) исследовались возможности прерывания корпускулярных потоков большой мощности с помощью экранов, охлаждаемых водой, протекающей под высоким давлением через экран. Быстрый нагрев стенки экрана до температур, достигающих $500 - 600^\circ \text{C}$, приводит к различным режимам теплоотвода, что может выражаться в наблюдаемых в разных участках экрана колебаниях температуры.

Как оказалось, по крайней мере часть регистрируемых колебаний температур вызвана другой причиной — с возбуждением указанных выше медленных солитоноподобных компонентов ВИОП, что и продемонстрировано в настоящей статье.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Подробное описание экспериментальной установки приведено в [7,8]. Она позволяет моделировать процессы теплообмена при вынужденной конвекции теплоносителя (воды) и одностороннем корпускулярном нагреве рабочего участка экрана с помощью пучка электронов от электронной пушки ЭЛА 60/15-Т.

Рабочим участком служила поверхность 10×10 мм² медной трубы наружного диаметра 14 мм и внутреннего диаметра 8 мм, через которую прокачивалась холодная вода под высоким давлением. Труба была помещена в вакуумную камеру с форвакуумной и диффузионной откачкой (рабочее давление $(2-3) \cdot 10^{-3}$ 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 сечению пучка. Сама мощность регулировалась изменением анодного тока. В описываемой серии опытов она составляла величины 0,4 – 7 кВт/см².

Выведение пучка на полную мощность происходило за время ~ 1 с. Регистрация температуры (с ошибкой $\sim 1\%$) производилась хромель-копелевой термопарой с инерционностью порядка мс, вмонтированной в рабочий участок трубы со стороны внутренней поверхности на глубину $\sim 0,5$ мм.

Система измерений, сбора и обработки информации для большого числа необходимых параметров, опускаемых нами здесь (см. подробнее [7]), была полностью автоматизирована в стандарте приборного интерфейса МЭК 625.1. Измерения температуры по термоЭДС указанной термопары производились с помощью универсального цифрового вольтметра В7-43, обеспечивающего частоту измерений и записи 7 Гц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для настоящей работы были отобраны 8 экспериментов, температурные записи которых представлены на рис. 1. Во всей серии температура воды на входе в измерительную систему была 10°C , а среднее давление воды 12,6 атм.

В каждом эксперименте задавались свои условия расхода теплоносителя. После включения электронного пучка требуемой мощности происходил нагрев образца. За времена около 10 – 20 с температура T внутренней стенки облучаемой медной трубки достигала значений, близких к максимальным, и далее менялась уже незначительно.

3.1. Режим нагрева с кипением. На рис. 2а представлена в достаточно крупном масштабе сглаженная по 5 точкам часть одной из таких записей (запись 1 на рис. 1; опыт № 1, см. ниже таблицу).

Эта запись (как и остальные измерения) соответствует вариациям температуры медной трубки на расстоянии 0,5 мм от ее внутренней поверхности и, соответственно, на расстоянии 2,5 мм от облучаемой электронным пучком поверхности.

На записи, на фоне медленного роста T , видны колебания температуры ΔT , достигающие $3 - 5^\circ\text{C}$, или $0,6 - 1,0\%$ от всего изменения температуры $T_{\text{макс}} - T_0$. Первый максимум A задержан относительно включения пучка (момент $t = 0$) на ~ 17 с.

На рис. 2б представлена $x-t$ -диаграмма, характеризующая волновой процесс, происходящий в рассматриваемом образце меди после включения электронного пучка, который приводит к изменениям температуры, отмеченным на рис. 2а.

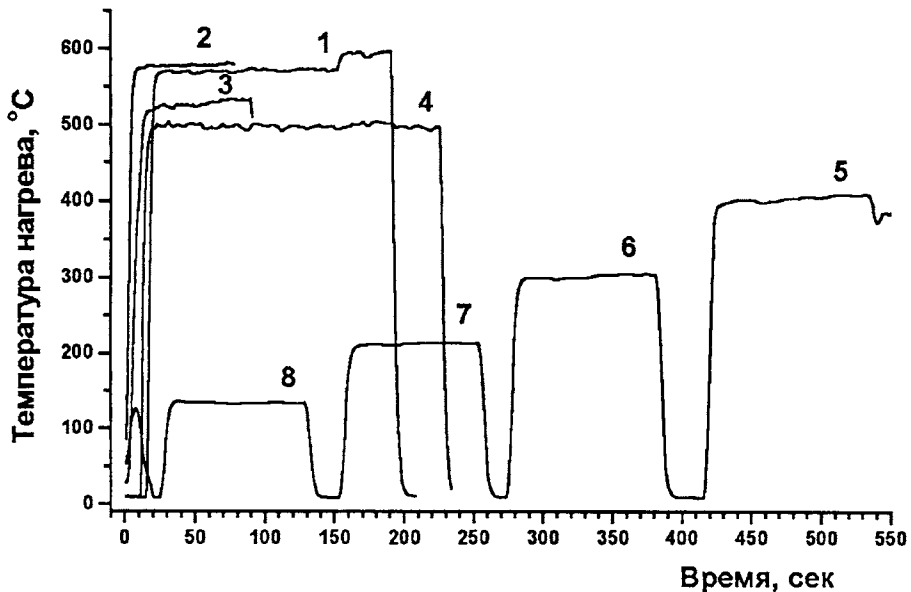


Рис. 1. Общий вид температурных записей экспериментов, отобранных для обработки

При этом мы исходили из предположения, что при прохождении ВИОП через область расположения термопары последняя регистрирует *увеличение* температуры. Вообще говоря, можно построить аналогичную диаграмму, исходя из предположения, что приход ВИОП в конкретном случае меди вызывает *снижение* температуры, что не противоречит свойствам этой солитоноподобной волновой структуры согласно нашим исследованиям [3]. Такая диаграмма хуже согласуется с экспериментальной температурной записью рис. 2а, но достаточно логична. В связи с тем, что адекватный механизм ВИОП еще не разработан, вопрос о знаке изменения ΔT в этой волне, идущей через медь, требует дальнейшей экспериментальной и теоретической проработки, однако главное утверждение о регистрации компонента ВИОП в описываемых опытах остается в силе.

На рис. 2б штриховыми отрезками представлено движение с приблизительно постоянной скоростью одиночной волны, образовавшейся на лицевой, облучаемой пучком поверхности. Она движется сперва к внутренней поверхности медной трубы, которой достигает, приблизительно, через 17 с (это время соответствует первому максимуму А на кривой рис. 2а. Затем волна отражается от этой внутренней поверхности и движется с той же (или несколько меньшей) скоростью к лицевой поверхности, где снова отражается, обуславливая максимум В при подходе к термопаре (положению термопары на $x-t$ -диаграмме рис. 2б соответствует горизонтальная штрихпунктирная прямая при $x = 2,5$ мм). Далее процесс повторяется многократно. Каждый раз, когда волна проходит область расположения термопары, она вызывает подъем средней температуры на указанные величины порядка 1% (пики А, Б, В, Г).

Однако пики А, Б, В, Г на кривой рис. 2а являются составляющими дублетов, в которые, кроме них, входят несколько меньшие по интенсивности пики a_1, b_1, v_1, g_1 . Их регулярность позволяет предположить, что они, как и А, Б, В, Г, обусловлены приходом к той же термопаре другой одиночной волны, несколько меньшей по интенсивности,

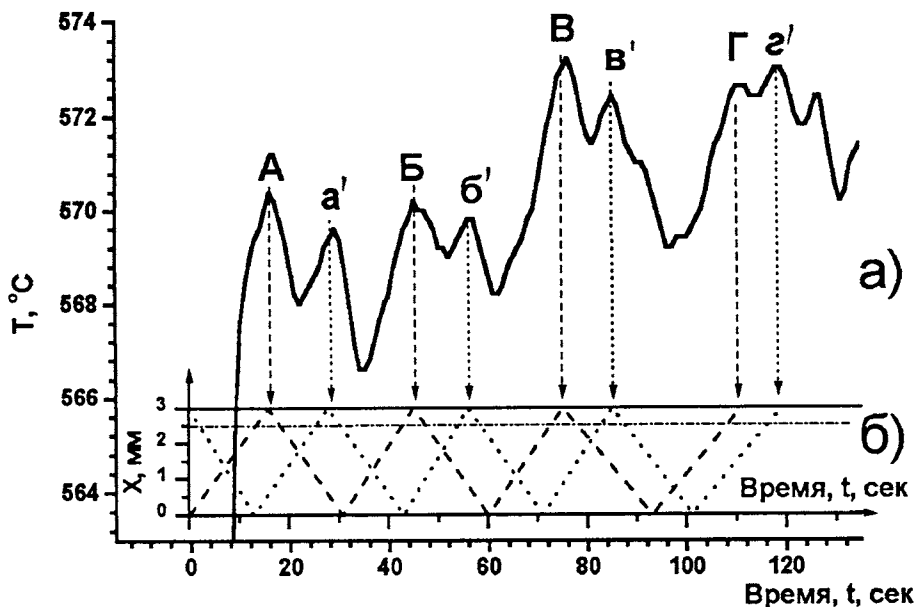


Рис. 2. Случай режима нагрева с кипением. а) Вариации температуры; б) соответствующая им x - t -диаграмма волнового процесса

движущейся приблизительно с той же скоростью, но зародившейся на внутренней поверхности медной трубы (пунктирная линия на рис. 2б). Из расположения пиков a' , $б'$, $в'$, $г'$ можно заключить, что постоянная скорость обуславливающей их волны несколько уменьшается после каждого отражения, но это ослабление менее выражено, чем для волны, обуславливающей пики А, Б, В, Г.

Здесь уместно отметить, что на рис. 2а третий дублет $Вв'$ и, особенно, четвертый $Гг'$ выглядят уже как триплеты, но этим усложнением структуры и вопросом, с чем связаны третьи компоненты таких триплетов, мы пока пренебрегаем.

Зная расстояние, проходимое каждой одиночной волной, и замерив последующие моменты прихода этих волн к термопаре, легко рассчитать их скорости. При этом, по нашим оценкам, ошибка в измерении расстояния мала, так как при периодическом повторении процесса достаточно знать толщину образца, что можно сделать с большой точностью. Ошибка в измерении моментов времени прихода волны к приемнику — термопаре может оцениваться величиной $\sim 10\%$, что и определяет ошибку в измерении скорости ВИОП в данных экспериментах.

Результаты такого расчета скоростей приведены в таблице для всей серии из 8 экспериментов. Опыту № 1, результаты которого открывают таблицу, соответствует запись температуры, представленная на рис. 2а, и помогающая ее расшифровать x - t -диаграмма рис. 2б.

В соответствии с выражением (1), обе найденные для опыта № 1 скорости соответствуют 25-му компоненту ВИОП, превышая его на $\sim 40\%$ (в расчете использовано табличное значение продольной скорости звука для меди, равное $4,70 \cdot 10^5$ см/с из [9]). Это расхождение частично можно отнести за счет распространения ВИОП по металлу,

Таблица. Условия и результаты экспериментов

№№ опы- тов	Время до пер- вого макси- мума, с	Темпера- тура нагрет- ва, ° С	Длитель- ность разверт- ки, с	Скорость ВИОП (от лицевой поверхнос- ти), см/с	Скорость ВИОП (от внутренней поверхнос- ти), см/с	Номер компо- нента ВИОП	Отклоне- ние от рассчитан- ной по (1) скорости, %
1	17	570	135	0,0195	0,0198	U_{25}	+40
2	18	578	80	0,0208	0,0173	U_{25}	+36
				0,0416	—	U_{24}	+49
3	25	525	90	0,0162	0,0173	U_{25}	+20
4	21	497	210	0,0132	0,0139	U_{25}	-3, 2
5	27	405	120	0,010	0,010	U_{26}	+43
6	15	300	110	0,0190	0,0213	U_{25}	+44
7	22	212	100	0,011	0,011	U_{26}	+57
8	10	137	100	0,0182	0,0182	U_{25}	+30

нагретому довольно значительно по отношению к его $T_{\text{плавл.}} = 1629^\circ \text{C}$. Увеличение скорости ВИОП наблюдалось ранее в экспериментах с диэлектриками, когда повышалась температура образца [3].

В первых четырех строках таблицы даны результаты экспериментов, проведенных при близких условиях малого расхода охлаждающей воды и высоких мощностей в пучке (нагрев медной трубки достигал $\sim 500 - 580^\circ \text{C}$). Для всех этих опытов были построены $x-t$ -диаграммы, которые достаточно хорошо повторяют главные особенности рис. 2б. Все данные этой первой части таблицы с некоторым разбросом согласуются с рассчитанной по (1) скорости 25-го компонента ВИОП (компонента с индексом $i = 25$).

На температурных записях в опытах № 3 и № 4, которые мы не воспроизводим здесь, кроме тех же пиков, отождествленных как U_{25} , в промежутках между ними видны небольшие максимумы, соответствующие проявлениям предыдущего компонента ВИОП, то есть U_{24} , образовавшейся на лицевой стороне. Аналогичный компонент, образовавшийся на внутренней стороне, зарегистрировать не представляется возможным. Скорости этих компонентов U_{24} на записях опытов № 3 и № 4 приблизительно вдвое больше величины U_{25} (оценивать ошибку в величине отношения $U_{24}/U_{25} = 2$ из-за недостатка данных нецелесообразно).

Возбуждение ВИОП электронным пучком позволило получить новую информацию об условиях возбуждения этих волн по сравнению с возбуждением лазерными импульсами [3]. Это относится к образованию волн *передним фронтом возбуждающего импульса*, поскольку в описываемых опытах возбуждение компонентов происходило, практически, только в начале эксперимента, когда мощность пучка менялась, достигая постоянного уровня (если опустить неясный пока вопрос о возникновении третьих компонентов дублетов на рис. 2а).

Кроме того, важным для разработки механизма явления результатом исследований ВИОП с возбуждением электронным пучком является образование некоторого i -го компонента волны на противоположной поверхности образца, *непрозрачного для частиц пучка*, одновременно с аналогичным i -м компонентом волны на облучаемой поверхности. Дело в том, что образование некоторого компонента волны на противоположной поверхности образца является обычным в лазерных опытах с диэлектриками, прозрач-

ными для ИК-излучения, возбуждающего ВИОП [3], но для непрозрачных объектов таких результатов до сих пор не было зафиксировано.

3.2. Режим нагрева без кипения. Как уже отмечалось во Введении, одной из предполагаемых причин, вызывающих колебания температуры, могут служить изменения в режиме теплопередачи. Появление колебаний может быть связано с наступлением сначала пузырькового режима кипения на внутренней (охлаждаемой) стенке трубки, который при дальнейшем увеличении температуры стенки переходит в режим плёночного кипения. Этот режим характеризуется нестабильностью существования паровой плёнки на внутренней стенке трубки и ее периодическими срывами.

В связи со сказанным были исследованы режимы нагрева электронным пучком медной трубы при таких больших расходах охлаждающей воды и таких малых мощностях пучка, когда кипение воды отсутствует.

В таблице этим условиям соответствует опыт № 8 и близко к ним подходит опыт № 7. Опыты №№ 5,6 соответствуют промежуточным условиям.

На рис. 3а,б представлены запись хода температуры и $x-t$ -диаграмма волновых процессов для опыта № 8.

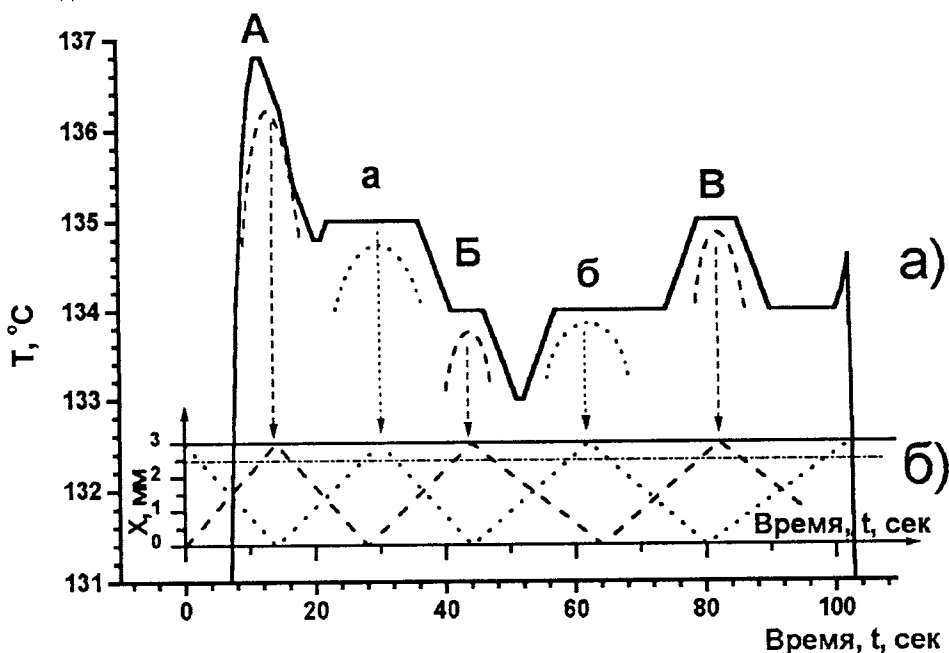


Рис. 3. Случай режима нагрева без кипения. а) Вариации температуры; б) соответствующая им $x-t$ -диаграмма волнового процесса

Поскольку чувствительность схемы не менялась, а сигнал термопары при снижении температуры от 57°C до 13°C падает весьма существенно (в 4,2 раза), температурный ход на рис. 3а содержит гораздо меньше деталей, чем на рис. 2а, и ожидаемые пики ΔT разрешены хуже (их величина не превышает $1 - 1,5^{\circ}\text{C}$). Однако, исходя из тех же предположений, что и ранее, можно предложить аналогичную $x-t$ -диаграмму процессов, рис. 3б). Кстати, на рис. 3б ширины пиков для двух волн явно различны (более широкие

пики — для волны, образованной на внутренней стороне). Это подтверждает справедливость расшифровки картины волнового процесса, представленного на $x-t$ -диаграмме, хотя изменения интенсивности последующих пиков A , B , B на рис. 3а требуют дополнительного изучения.

Из приведенной таблицы следует, что для опытов № 8 и № 7, в которых процесс кипения можно не учитывать, измеренные скорости обеих одиночных волн (возникающих на лицевой и внутренней поверхностях медной трубки) такие же, как в остальных опытах, выполненных при более высоких температурах, когда кипением уже нельзя пренебречь (№№ 6,5) или когда процесс кипения можно считать определяющим для теплопередачи (№№ 1-4).

Следует отметить, что данные таблицы без дополнительных экспериментов не позволяют пока объяснить, какие условия в опытах с № 5 по № 8 приводят к тому, что в них проявляется то 25-й, то 26-й компоненты ВИОП.

4. ВЫВОДЫ

1. Результаты представленной серии из 8 опытов показывают, что при облучении электронным пучком с плотностью мощности $0,4 - 7 \text{ кВт/см}^2$ массивного образца меди в последнем возбуждаются медленные компоненты ВИОП, которые приблизительно соответствуют расчетным (по формуле (1)) значениям 24-го, 25-го и 26-го компонентов U_{24} , U_{25} , U_{26} этой волновой структуры.

Поскольку описываемые температурные записи были случайным образом отобраны из большого массива материалов (по наибольшей их длительности) и все они, без исключения, согласуются с $x-t$ -диаграммами волновых процессов, представленными на рис. 2а,б; 3а,б, наш вывод можно считать вполне достоверным.

2. Из сравнения результатов опытов, проведенных при существенно различных температурах (от 13°C до 58°C), можно видеть, что обнаруженные температурные колебания связаны, по крайней мере, не только с изменением режима теплопередачи между теплоносителем и исследуемым образцом меди. Тем самым подтверждается вывод, что ВИОП с ее компонентами играет определённую роль в процессе теплопереноса [6].

3. С точки зрения исследования ВИОП возбуждение их электронным пучком позволило получить новую информацию об условиях возбуждения этих волн (образование волн передним фронтом возбуждающего импульса; образование волны на противоположной поверхности образца, непрозрачного для частиц пучка, одновременно с волной на облучаемой поверхности). Эти данные необходимо учитывать при разработке механизма явления, который охватывал бы всю совокупность его свойств.

Авторы благодарны РФФИ за поддержку проекта 97-02-17954-а и XII Школы-семинара под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, которая позволила осуществить настоящую работу. Авторы благодарны также С.Д.Зотову за помощь при обработке результатов и подготовке статьи.

Литература

1. Kudriavtsev E.M. et al. — Material Research Society - Meeting ofFaU'92, Book of abstracts, N3, 25, Boston, USA, 1992.

2. Kudriavtsev E.M. et al. — *Physica C*, 1994, v.234-240, p.1439.
3. Kudriavtsev E.M. — In: *High-Power Laser Ablation, Proceedings of SPIE*, 1998, v.3343, p.411.
4. Кудрявцев Е.М. и др. — Краткие сообщения по физике ФИАН (принято к публикации в № 11 за 1999 год).
5. Toda M. — *Physica Scripta*, 1979, v.20, p.424.
6. Кудрявцев Е.М., Емельянов В.И., Утрик М. — В сб.: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках (XII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева, Москва, 25–28 мая 1999 г.). М.: изд-во МЭИ, 1999. с.298.
7. Дедов А.В., Комов А.Т. — там же, с.287.
8. Касаткин А.П., Комов А.Т., Наумов В.К. и др. — ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез, 1993, вып.1–2, с.60.
9. Бабичев А.П и др. — Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.