

УДК 536.2.01+621.039.63+537.533

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ МЕДЛЕННЫХ КОМПОНЕНТ ТРЕХМЕРНОЙ СОЛИТОНОПОДОБНОЙ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ В МАССИВНОМ ОБРАЗЦЕ МЕДИ

Е. М. Кудрявцев, А. В. Варава¹, А. В. Дедов¹, А. Т. Комов¹

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/сек, многократно отражаясь от стенок. Скорости последующих компонент отличаются приблизительно вдвое. Ранее аналогичные волновые структуры наблюдались в различных материалах за исключением металлов при облучении их ИК лазерными импульсами.

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). Она представляет собой трехмерную солитоноподобную волновую структуру, в которой из области генерации в ответ на один возбуждающий импульс достаточной плотности (около

¹Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра Общей физики и ядерного синтеза.

10 кВт/см^2) по поверхности материала и сквозь него расходитя последовательность одиночных волн – компонентов ВАОП. Они имеют одинаковый и постоянный знак амплитуды (положительный или отрицательный), а ее величина слабо спадает с расстоянием. Каждый компонент ВАОП 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_l (порядка км/сек) до скоростей порядка мм/сек , согласно выражению

$$U_i = 2^i v_l, \quad (1)$$

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.

ВАОП была зарегистрирована по обратимому изменению *отражения* для видимого света в геометрии Брюстера; по изменению *проводимости* в образце; по изменению давления, а также по изменению пропускания образцов в видимой или ИК-областях спектра и тепловому излучению образца (с помощью термо-видеокамеры) [3]. Измерения колебаний температуры ΔT с помощью такого надежного средства как термopара, представленные в настоящей работе, делают результаты исследований ВАОП 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 [4] пришел к заключению, что солитоны играют важную роль в теплопроводности нелинейных неидеальных кристаллических решеток. С экспериментальной точки зрения вопрос обсуждался в [3].

Подробное описание экспериментальной установки приведено в [5]. Она позволяет моделировать процессы теплообмена при вынужденной конвекции теплоносителя (вода) и одностороннем корпускулярном нагреве рабочего участка экрана с помощью пучка электронов от электронной пушки ЭЛА 60/15-Т. Рабочим участком служила поверхность $10 \times 10 \text{ мм}^2$ медной трубы с наружным диаметром 14 мм и внутренним диаметром 8 мм, через которую прокачивалась холодная вода под высоким давлением. Труба была помещена в вакуумную камеру с форвакуумной и диффузионной откачкой для облучения однородным по сечению электронным пучком, мощность которого составляла $(0.4 - 7) \text{ кВт/см}^2$. Выведение пучка на полную мощность происходило за время около 1 сек. Регистрация температуры внутренней стенки облучаемой медной трубки $T_{\text{вн}}$ с частотой записи 7 Гц производилась хромель-копелевой термopарой (ее инерционность $\sim 1 \text{ мсек}$), смонтированной в рабочий участок трубы со стороны внутренней

поверхности на глубину ~ 0.5 мм.

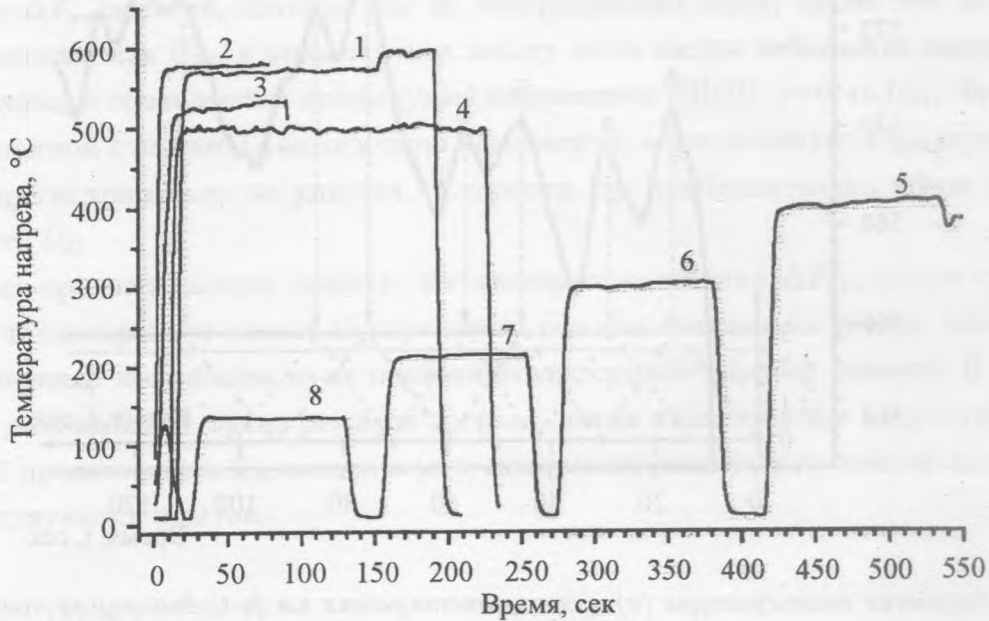


Рис. 1. Общий вид температурных записей экспериментов, отобранных для обработки.

Для настоящей работы были отобраны 8 экспериментов с наибольшей длительностью $T_{\text{вн}}$ -записей (рис. 1). Во всей серии температура воды на входе в измерительную систему была 10°C , а среднее давление воды 12.6 атм. За времена около $10 - 20$ сек $T_{\text{вн}}$ достигала значений, близких к максимальным ($230 - 580^\circ\text{C}$), в зависимости от мощности электронного пучка и расхода теплоносителя, и далее менялась уже незначительно.

На рис. 2а представлена часть одной из таких сглаженных по 5 точкам записей, соответствующая выходу на установившийся режим. На ней видны вариации $\Delta T_{\text{вн}}$ для медной трубки на расстоянии 0.5 мм от ее внутренней поверхности и, соответственно, 2.5 мм от облучаемой электронным пучком поверхности. На записи, на фоне медленного роста T , видны $\Delta T_{\text{вн}}$, достигающие $(3 - 5)^\circ\text{C}$ или $(0.6 - 1.0)\%$ от всего изменения $(T_0 - T_{\text{max}})$.

На $(x-t)$ -диаграмме (рис. 2б) штриховыми отрезками представлено движение с примерно постоянной скоростью одиночной волны, образовавшейся на лицевой, облучаемой поверхности. Она движется к внутренней поверхности, от которой отражается через 17 сек (первый максимум А на кривой рис. 2а), затем идет к лицевой поверхности, где снова отражается (максимум Б) при подходе к термопаре. Далее процесс повторяется многократно (пики А, Б, В, Г). Однако указанные пики на кривой рис. 2а являются

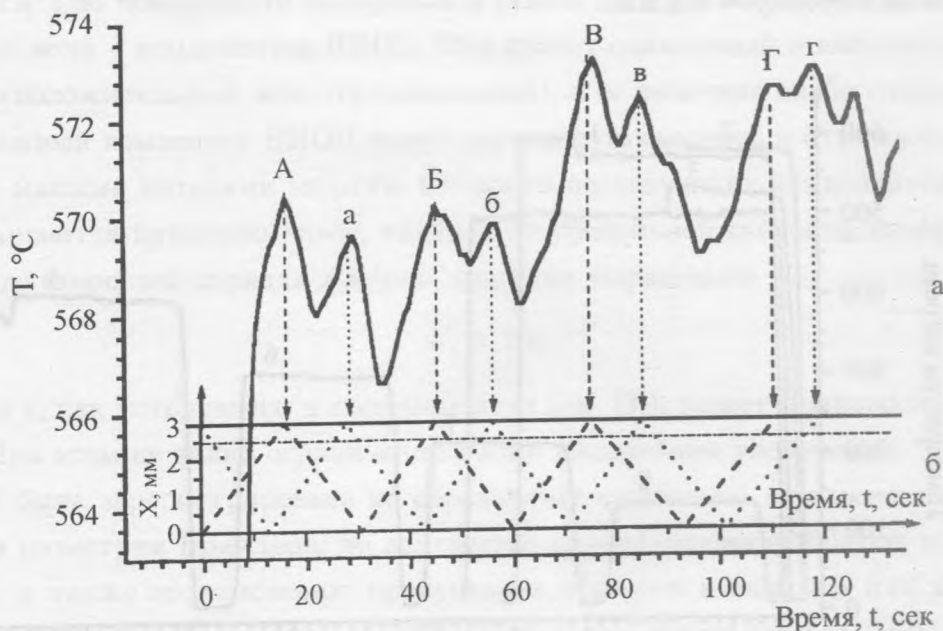


Рис. 2. Вариации температуры (а) и соответствующая им $(x-t)$ -диаграмма волнового процесса (б) в случае режима нагрева с кипением.

составляющими дублетов, в которые, кроме них, входят несколько меньшие по интенсивности пики а, б, в, г. Регулярность этих пиков позволяет предположить, что они, как и А, Б, В, Г, обусловлены приходом к той же термопаре другой одиночной волны, которая несколько меньше по интенсивности, движется примерно с той же скоростью, но зародилась на внутренней поверхности медной трубки (пунктирная линия на рис. 2б). Ошибка в измерении моментов времени прихода волны к приемнику – термопаре может оцениваться величиной $\sim 10\%$, что и определяет ошибку в измерении скорости ВАОП в данных экспериментах.

При построении $(x-t)$ -диаграммы мы исходили из предположения, что ВАОП, проходя через область расположения термопары, увеличивает $T_{\text{вн}}$. Вообще говоря, можно построить аналогичную диаграмму, исходя из предположения, что приход ВАОП в конкретном случае меди вызывает снижение температуры, что не противоречит свойствам этой солитоноподобной волновой структуры [3]. Однако главное утверждение о регистрации компоненты ВАОП в описываемых опытах остается в силе независимо от знака изменения температуры.

В соответствии с выражением (1), обе найденные скорости соответствуют 25-му компоненту ВАОП, превышая его на $\sim 40\%$ (в расчете использовано табличное значение

продольной скорости звука для меди $4.70 \cdot 10^5$ см/сек). Это расхождение частично можно отнести за счет распространения ВИОП по нагретому металлу [3].

На ряде $\Delta T_{\text{вн}}$ -записей, которые мы не воспроизводим здесь, кроме тех же пиков, отождествленных как U_{25} , в промежутках между ними видны небольшие максимумы, соответствующие проявлениям предыдущей компоненты ВИОП, то есть U_{24} , образовавшейся на лицевой стороне. (Аналогичную компоненту, образовавшуюся на внутренней стороне, зарегистрировать не удастся.) Скорости U_{24} приблизительно вдвое больше, чем скорость U_{25} .

Одной из предполагаемых причин, вызывающих колебания $\Delta T_{\text{вн}}$, могут служить изменения теплопередачи (смена пузырькового режима кипения на режим пленочного кипения, который нестабилен из-за периодических срывов паровой пленки). В связи с этим были исследованы такие режимы нагрева, когда кипение воды отсутствует. На рис. 3а и 3б представлены $T_{\text{вн}}$ -запись и $(x-t)$ -диаграмма волновых процессов для одного из соответствующих опытов.

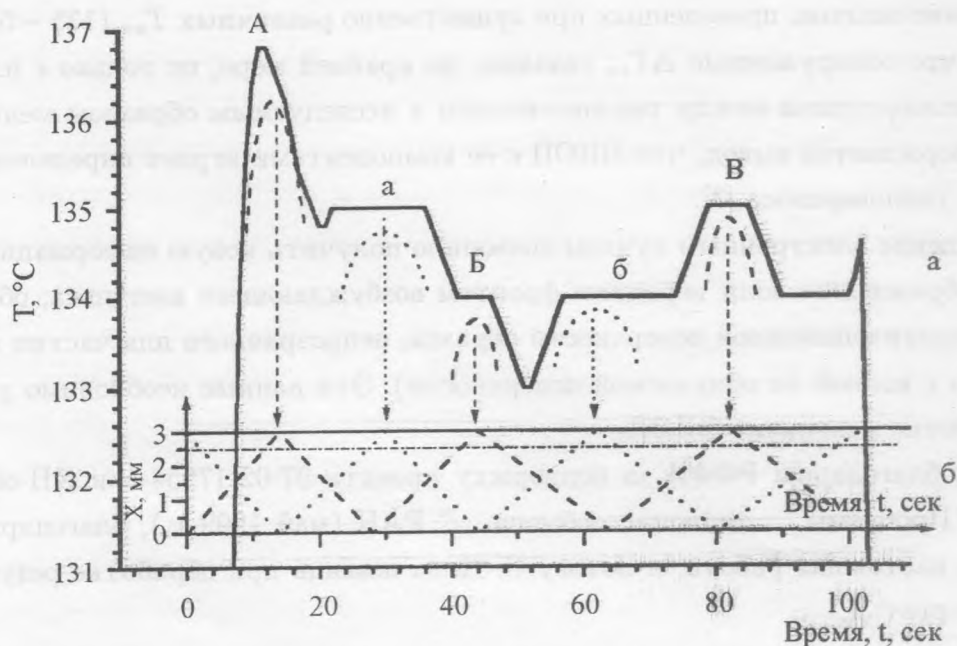


Рис. 3. Вариации температуры (а) и соответствующая им $(x-t)$ -диаграмма волнового процесса (б) в случае режима нагрева без кипения.

Хотя $T_{\text{вн}}$ -запись на рис. 3а содержит гораздо меньше деталей, чем на рис. 2а, и ожидаемые пики $\Delta T_{\text{вн}}$ разрешены хуже (их величина не превышает $1 - 1.5^\circ\text{C}$), однако

можно построить аналогичную $(x-t)$ -диаграмму процессов (см. рис. 3б). На нем ширины пиков для двух волн явно различны (шире пики для волны, образованной на внутренней стороне). Это подтверждает справедливость расшифровки картины волнового процесса, представленного на $(x-t)$ -диаграмме.

Для опытов, в которых процесс кипения можно не учитывать, измеренные скорости обеих одиночных волн (возникающих на лицевой и внутренней поверхностях трубки) оказались такими же, как в остальных опытах, выполненных при более высоких температурах.

Результаты 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, скорости которых, U_{24} , U_{25} , U_{26} , примерно соответствуют расчету по формуле (1). Этот вывод можно считать вполне достоверным, поскольку $T_{вн}$ -записи были случайным образом отобраны из большого массива материалов и все, без исключения, согласуются с $(x-t)$ -диаграммами волновых процессов на рис. 2а, 2б, 3а и 3б.

Сравнение опытов, проведенных при существенно различных $T_{вн}$ ($135 - 580^\circ\text{C}$), показывает, что обнаруженные $\Delta T_{вн}$ 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 определенную роль в процессе теплопереноса [3].

Возбуждение электронным пучком позволило получить новую информацию об этом явлении (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 ВИОП.

Авторы благодарны РФФИ за поддержку проекта 97-02-17954-а и XII-ой Школы-семинара "Проблемы ... теплообмена ..." РАН (май 1999 г.), благодаря которой состоялась настоящая работа, и Зотову С. Д. за помощь при обработке результатов и подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kudriavtsev E. M., Zotov S. D., Krivov V. V., et al. Material Research Society – Meeting of Fall'92, Book of abstracts, H3, 25, Boston, USA, 1992.

- [2] Kudriavtsev E. M., Zotov S. D., Krivov V. V., Autric M. Physica C, **234-240**, 1439 (1994).
- [3] Kudriavtsev E. M. In: High-Power Laser Ablation, ed. Claude R. Phipps, Proc. SPIE, **3343**, 411 (1998).
- [4] Toda M. Physica Scripta, **20**, 424 (1979).
- [5] К а с а т к и н А. П., К о м о в А. Т., Н а у м о в В. К. и др. "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез", вып. 1-2, 60 (1993).

Поступила в редакцию 24 сентября 1999 г.